

# Strahlung

Strahlungen können verschiedene Strukturen aufweisen. Man unterscheidet drei verschiedene Strahlungstypen. Fast alle Strahlungen können auch als Wellen definiert werden. Gerade Elektromagnetische Strahlen können auch als elektro-magnetische Wellen gesehen werden. Mechanische Strahlen brauchen immer ein Medium in dem sie sich ausbreiten. Teilchenstrahlungen bestehen immer aus realen Teilchen. Alle Formen der Strahlung übertragen eine Energie.

Teilchenstrahlung	Elektromagnetische Strahlung	Mechanische Strahlungen
$\alpha$ - Strahlen	$\gamma$ - Strahlen	Ultraschall
$\beta$ - Strahlen	Röntgenstrahlen	Schall
N - Strahlen	UV - Strahlen	
$e^-$ - Strahlen	Mikrowellen	
	Radiowellen	
	Licht	
	uvm.	

## Grundlagen von Strahlung

Alle Strahlen besitzen einige Eigenschaften die sie genauer definieren. Hier sollen die Grundlagen aller Strahlen, ob elektromagnetische Wellen oder Teilchenstrahlen beschrieben werden.

### Strahlungsleistung

Die Strahlungsleistung oder auch der Energiestrom einer Strahlung gibt an, wie viel Energie, egal ob in Form einer Welle oder von kinetischer Energie von Teilchen, von einer Energiequelle aus gesendet wird.

Also ist die Strahlungsleistung ( $\phi$ ) ein Quotient aus abgegebener (Strahlungs-)Energie ( $\Delta Q$ ) durch die Zeit ( $\Delta t$ ).

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \text{ mit der Einheit } [\phi] = \frac{J}{s} = W$$

### Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke gibt an, wie viel Leistung pro Fläche auf einen Körper auftritt. Hierbei ist die Richtung oder die Anzahl der Strahlenquellen egal.

Die Bestrahlungsstärke ( $E$ ) ist der Quotient aus der auf einer Fläche ( $A$ ) auftretenden Strahlungsleistung ( $\phi$ ) und der Fläche ( $A$ ).

$$E = \frac{\phi}{A} \text{ mit der Einheit } [E] = \frac{W}{m^2}$$

### Strahlungsintensität

Die Strahlungsintensität ist unabhängig vom einem Körper. Sie gibt die Strahlungsleistung auf einer bestimmten Fläche an. Allerdings muss die Fläche orthogonal zur Strahlungsausbreitungsrichtung stehen.

Die Strahlungsintensität ist ebenfalls ein Quotient aus einer Strahlungsleistung ( $\phi$ ) und einer Fläche ( $A$ ).

$$I = \frac{\phi}{A} \text{ mit der Einheit } [I] = \frac{W}{m^2}$$

## **Elektromagnetische Strahlung**

Zu der elektromagnetischen Strahlung zählen alle Wellen, die aus einem Schwingkreis mit Kondensator und Induktivität entstehen können und sich radial im Raum ausbreiten.

Hochenergetische elektromagnetische Strahlen (z.B.: Röntgen- und  $\gamma$ - Strahlen) können auch durch das Abbremsen eines Teilchenstrahles (meistens  $e^-$ ) entstehen. Deshalb werden sie im sog. Bremspektrum zusammengefasst.

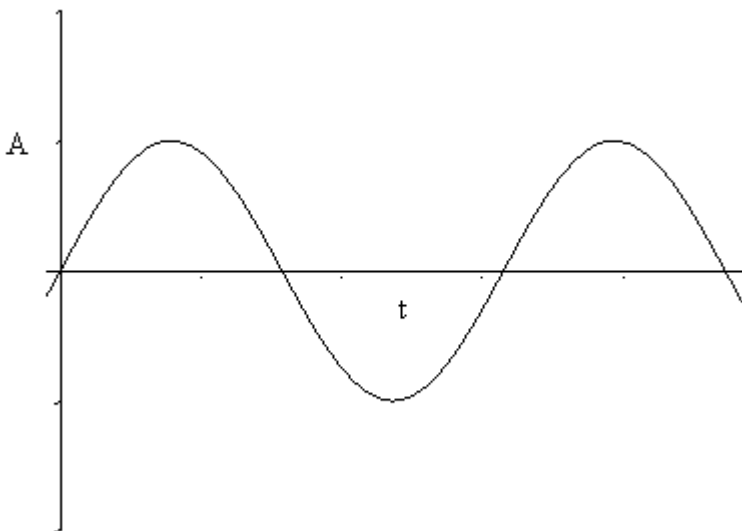
## **Charakteristika**

Elektromagnetische Strahlungen (oder elektromagnetische Wellen) können je nach Experiment Wellencharakter, definiert in der normal physikalischen Wellentheorie, oder Teilchencharakter, beschrieben in der Newtonschen Kinetik der Teilchen, aufweisen. Die Nachweise der verschiedenen Charaktere werden unten beschrieben. Gerade bei hochenergetischen Strahlen werden die Teilcheneigenschaften wichtig für die Erklärung mancher physischer Phänomene.

## **Als Welle**

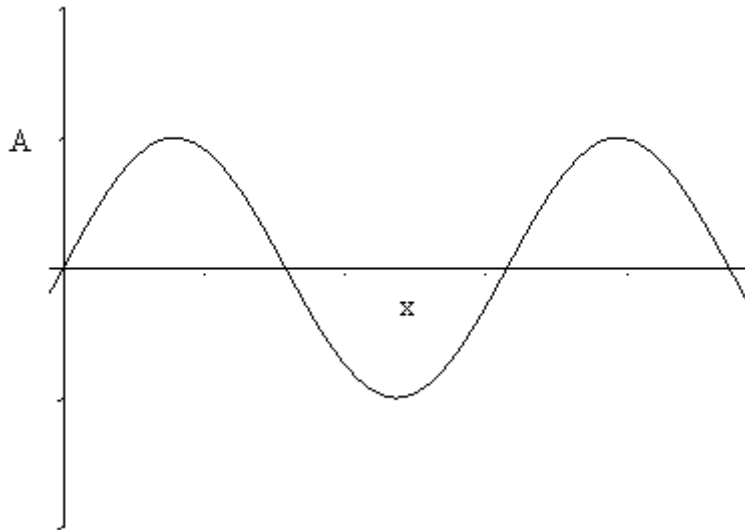
Elektromagnetische Wellen können als Ausbreitung einer Energie in zwei verschiedenen Dimensionen angesehen werden. Einerseits kann man eine zeitliche, andererseits eine räumliche Ausbreitung, aber jeweils nur eine der beiden, gezeichnet oder gemessen werden. Folgend zwei Schaubilder, die die zeitliche und die räumliche Ausbreitung darstellen:

### **zeitliche Ausbreitung**



Am Amplituden-Zeit Diagramm einer elektromagnetischen Welle kann die Periodendauer (T) und dadurch die Frequenz ( $f = \frac{1}{T}$ ) herausgelesen werden.

## räumliche Ausbreitung



Am Amplituden-Raum Diagramm stellt die Periodendauer (von einem Wellenberg bis zum nächsten) die Wellenlänge ( $\lambda$ ) dar. Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge gilt bei allen Wellen.

Gesetz: Es besteht folgender Zusammenhang zwischen Frequenz ( $f$ ), Wellenlänge ( $\lambda$ ), und Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $v_c$ ):

$$v_c = \lambda f \quad \text{oder} \quad v_c = \frac{\lambda}{T}$$

Da bei elektromagnetischen Wellen  $v_c = c \approx 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$  gilt:

$$c = \lambda f$$

### Als Teilchen

Für das Licht als Teilchencharakter muss die Quantentheorie berücksichtigt werden. Da jedes sich bewegende Teilchen eine gewisse kinetische Energie hat.

Gesetz: Für die kinetische Energie eines imaginären Lichtteilchens (Photon) gilt:

$$E_{kin} = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad h: \text{Planksches Wirkungsquantum} \quad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Die Energie wird oft in [eV] angegeben.

Definition: 1 eV entspricht der Energie die ein  $e^-$  beim Durchlaufen der Spannung von 1V gewinnt. Es gilt:

$$1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{da:} \quad W_{el} = Q \cdot U$$

$$\text{wobei:} \quad Q = 1e^- = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

## Nachweis

Lange Zeit betrachtete man elektromagnetische Strahlen als Wellen. Bei einigen Versuchen konnte man die Ergebnisse allerdings mit der Wellentheorie nicht erklären.

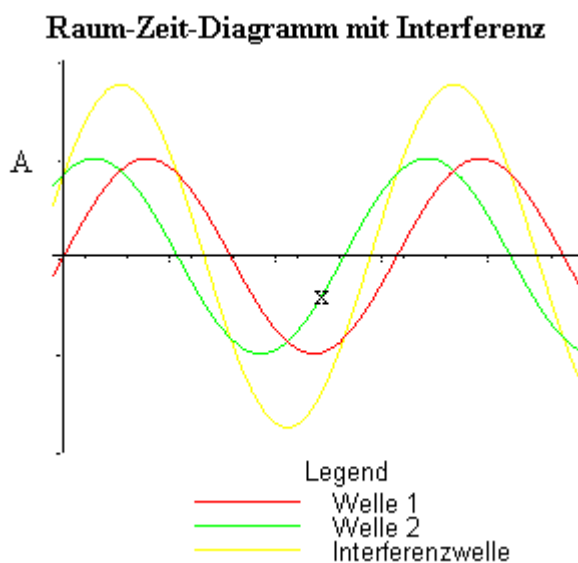
### *Des Wellencharakters*

Den Wellencharakter des Lichts kann man mit dem Doppelspalt-Experiment nachweisen. Es beruht auf den Phänomenen der Interferenz und der Beugung am engen Doppelspalt oder Gitter.

Am engen Spalt entsteht nach der Wellentheorie eine neue Radialwelle. Am Gitter entsteht an jeder Öffnung eine neue Radialwelle.

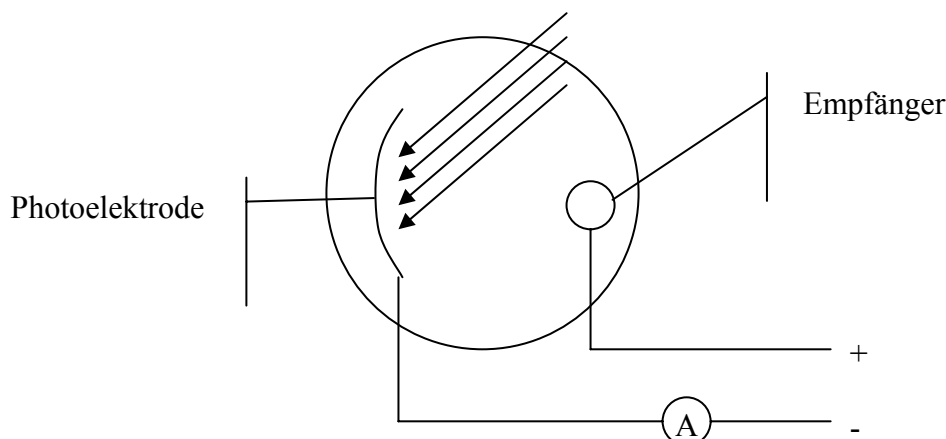
Durch Überlagerung von Wellen entsteht an einem Schirm ein sog. Interferenzbild.

Interferenz entsteht durch die Addition von verschiedenen Wellenintensitäten, so dass maxima durch Punkte und minima durch leere Flächen am Schirm erzeugen. Das folgende Diagramm zeigt die Addition zweier Wellen.



### *Des Teilchencharakters*

Als Nachweis für den Teilchencharakter wird der sogenannte Photoeffekt angeführt, dessen Prinzip in Photodioden oder Solarzellen zum Einsatz kommt. Beim Experiment zum Photoeffekt setzt man voraus, dass sich Photonen (Lichtteilchen) wie newtonsche Teilchen verhalten. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich bei einem Stoß die ganze Energie übergeht, also es sich um einen verlustfreien Stoß handelt.



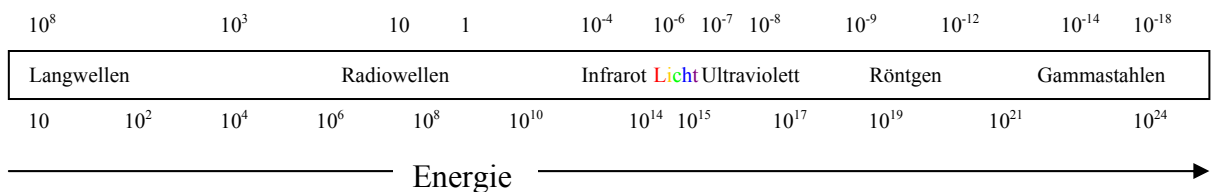
Im Vakuum fällt Licht auf eine Photoelektrode. Man geht davon aus, dass Photonen eine gewisse kinetische Energie haben. Beim Auftreffen eines Teilchen auf ein Elektron im Metallgitter übergibt das Photon seine Energie an das Elektron. Ist die übergebene Energie groß genug wird das Elektron aus dem Gitter gelöst und hat eine Restenergie als kinetische Energie. Sie bewegen sich entgegen dem elektrischen Feld (durch Anlegen einer Spannung) in Richtung Empfänger, wobei sie Energie verlieren. Man beobachtet, dass bei einer gewissen Wellenlänge, also einer gewissen kinetischen Energie der Photonen, ein Stromfluss gemessen werden kann.

$$\text{Es gilt: } E_{kin}^{Photon} = h \frac{c}{\lambda} = E_{ausl} + E_{kin}^{Elektron}$$

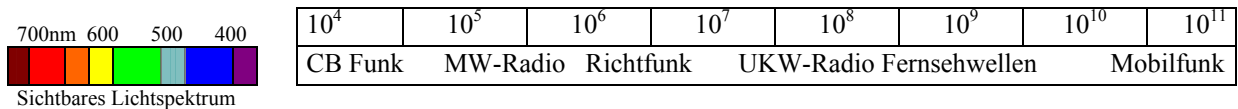
Dieses Phänomen ist nur mit dem Teilchencharakter des Lichtes zu erklären.

### Das gesamte elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich n einer Wellenlänge von einigen 1000 km bis hin zu 100 am (Attometer =  $10^{-18}$ ). Die Energie der Strahlung wird bei kurzwelliger Strahlung größer. Aber auch die Energie, die zum Erzeugen dieser Strahlung nötig ist, steigt nahezu ins unermessliche. Hochenergetische (auch hochfrequente und kurzwellige) Strahlen oder Wellen bergen aber auch ein erhöhtes Risiko, da die Energie, die beim Auftreffen auf andere Atome frei wird, sehr hoch ist.



zwei Teilspektren sieht folgendermaßen aus:



### Schwächung von EM Strahlen

Wie alle Strahlen verändert sich die Intensität von Licht, wenn es durch einen sogenannten Filter fällt. Diese Filter sind meist Wellenlängenspezifisch. So beeinträchtigt das Fensterglas das sichtbare Licht kaum, UV stahlen werden aber fast restlos resorbiert. Die Resorbierung einer bestimmten Wellenlänge ist einerseits von Stoff, andererseits von der durch den Stoff zurückgelegten Strecke abhängig.

#### Allgemeines Schwächungsgesetz

Dass allgemeine Schwächungsgesetz stellt eine Gleichung zwischen Stoffdicke und resultierender Strahlungsintensität her. Die Zunahme der Resorbierung ist exponential zur Schichtdicke zunehmend, somit ist die resultierende Strahlungsintensität exponential abnehmend.

Gesetz: Die Intensität einer Strahlung nimmt exponential zur zurückgelegten Strecke durch einen Stoff ab.

Wenn  $I(s)$  die Intensität nach dem Filter,  
 $I_0$  die Intensität vor dem Filter,  
 $s$  die im Filter zurückgelegte Strecke,

gilt:  $I(s) = I_0 e^{-\mu s}$

wobei:  $\mu$  die für den Filter und die Wellenlänge charakteristische Schwächungskonstante

Desto größer die Konstante  $\mu$  desto mehr Licht wird vom Körper verschluckt. Folglich wird bei konstanter Filterdicke aber steigender Schwächungskonstante weniger Intensität den Filter verlassen.

### **Halbwertsdicke**

Die Halbwertsdicke ist ähnlich wie Halbwertszeit eine Konstante die angibt bei welcher Filterdicke genau die Hälfte an Strahlung verloren geht. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen Halbwertsdicke ( $D$ ) und Schwächungskonstante ( $\mu$ ).

$$I(D) = \frac{1}{2} I_0 = I_0 e^{-\mu D}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\mu D}$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu D$$

$$\Rightarrow D = -\frac{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}{\mu} \approx \frac{0,693}{\mu}$$

Für den Schutz vor Röntgen- oder  $\gamma$ - Strahlen muss ein Filter mit der mindestens 10fachen Halbwertsdicke eingesetzt werden. Allerdings lassen sich Strahlen nie ganz abschotten. So werden bei 10facher Halbwertsdicke noch ca. 0,1 % der Strahlung durchgelassen.

### **Emission**

Hält man Proben von Salzen in eine Flamme, so verändert diese ihre Farbe. Zu Silvester kann man fast alle Farben am Himmel beobachten. Auch dort werden Salze eingesetzt. Allerdings kann dieser Effekt nicht nur bei Salzen nachgewiesen werden. Fast jeder Stoff, dem Energie zugeführt wird „leuchtet“. Bei Salzen, genauer bei den positiven Ionen von den Metallen, ist dieses „leuchten“ im Bereich des sichtbaren Lichts. Aber auch Makromoleküle können durch Energiezugabe elektromagnetische Wellen emittieren und somit „leuchten“.

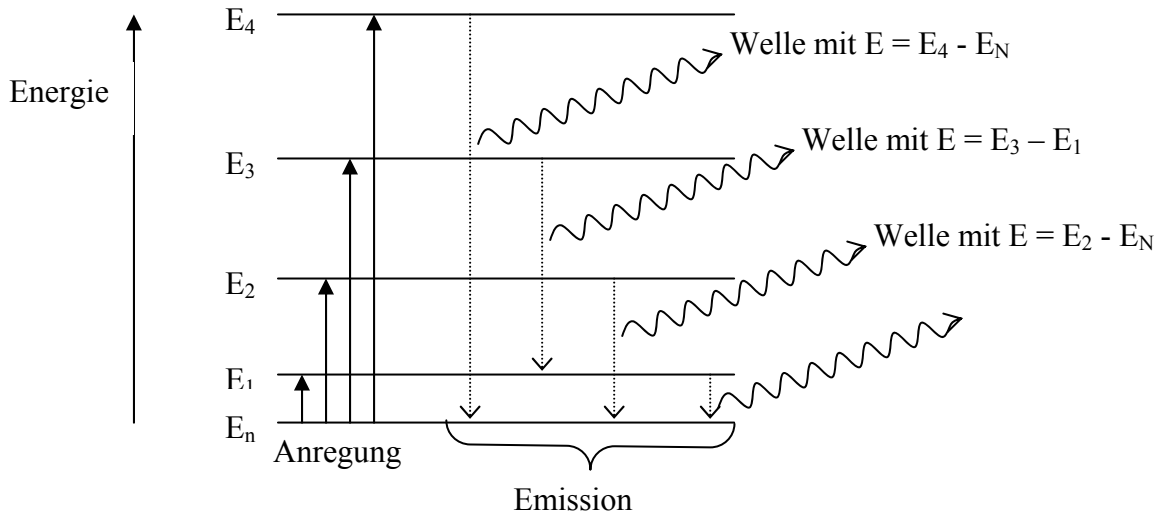
### **Definition**

Als Emission betrachtet man das Austreten von elektromagnetischen Wellen aus einem angeregtem Körper. Bei einem einfachen Stoff oder Elementen kommen im emittierten Spektrum (Aufteilung der Wellen nach Wellenlänge) nur exakte Wellenlängen vor. Diese sind für dem Stoff charakteristisch.

Beispiel:  $\text{Na}^+$  - Ionen haben im Bereich des sichtbaren Lichts nur eine emittierte Wellenlänge  $\Rightarrow \lambda = 594\text{nm} \hat{=} (\text{gelb})$ .

### **Physikalische Erklärung**

Um die Emission von Licht erklären zu können, muss man sich die Elektronen eines Stoffes anschauen. Jedes Elektron hat in Abhängigkeit vom Kernabstand eine gewisse Energie, den Normalzustand. Zur übersichtlichen Darstellung des Zusammenhangs wird oft ein Energiediagramm benutzt.



Die Energieniveaus  $E_1 - E_4$  sind die Energiezustände, die ein Elektron im Atom annehmen kann. Je nach Atom, Ion oder Molekül können sich die verschiedenen Energiemengen unterscheiden. Deshalb unterscheiden sich auch die emittierten Wellenlängen. Die energiereichen Zustände, die ein Elektron annehmen kann sind nach oben nicht begrenzt und hängen nur von der maximalen Aktivierungsenergie ab.

Das Bestreben der Elektronen einen möglichst energiearmen Zustand einzunehmen ist der Grund für das spontane Zurückfallen auf einen niedrigeren Energiezustand. Dabei können mehrere andere Energiezustände überspringen. Allerdings gibt es auch eine sogenannte angeregte Emission. Das bedeutet, dass ein oder mehrere Elektronen auf höhere Energieniveaus angehoben wurden, aber sich spontan zurückbewegen können. Sie brauchen eine Aktivierungsenergie.

In der zum Errechnen der Emissionswellenlänge muss die Quantenmechanik berücksichtigt werden. Es gilt:

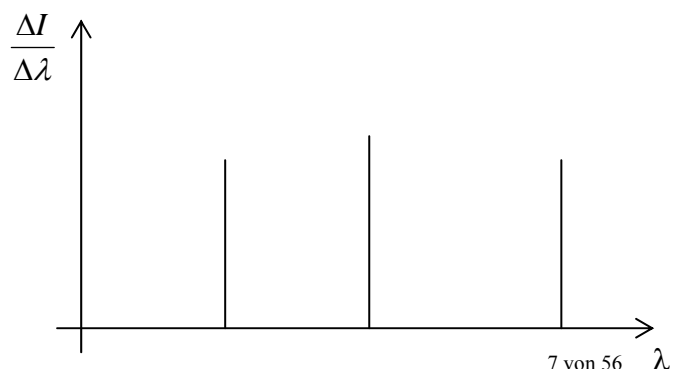
$$\Delta E = E_{ang.} - E_{norm.} = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

### Typen

Man unterscheidet die verschiedenen auftretenden Spektren anhand der auftretenden Emissionsstrahlung. Dazu dient die grafische Darstellung des **Emissionsspektrums**. Das Emissionsspektrum stellt die emittierte Energie als Funktion in Abhängigkeit der Wellenlänge dar. Man unterscheidet drei verschiedene Emissionsspektren.

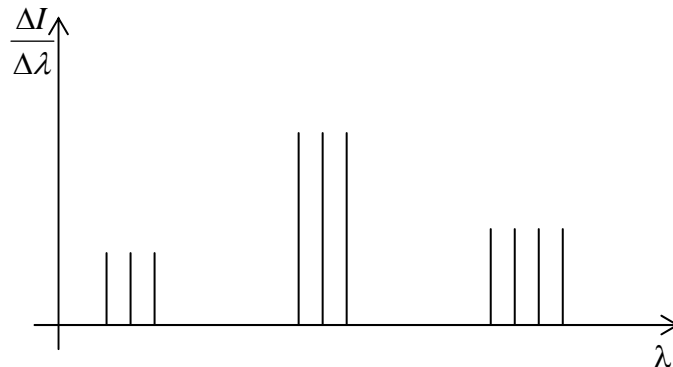
### Linienspektrum

Das Linienspektrum zeichnet sich durch einzelne Linien bei verschiedenen Frequenzen aus. Es besteht aus einer oder mehreren Linien, die auf diskrete Energien hinweisen. Linienspektren sind charakteristisch für einzelne Atome oder sehr kleine Moleküle.



### **Bandenspektrum**

Das Bandenspektrum besteht ähnlich wie das Linienspektrum aus einer Anzahl von Linien. Allerdings sind diese so angeordnet, dass sie sogenannte Banden bilden. Zum Beispiel hat Quecksilber entweder ein Linienspektrum oder ein Bandenspektrum. Die Banden sind aufgrund der Wechselwirkung verschiedener Atome miteinander zu erklären. Welches Spektrum



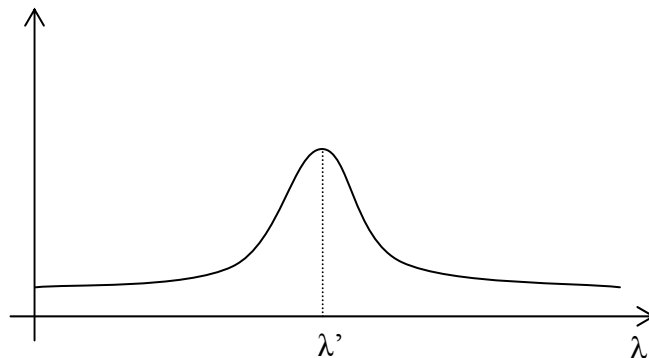
Quecksilber emittiert hängt in erster

Linie vom Druck ab. So emittiert es bei wenig Druck ( $p \approx 1$  mbar) ein Linienspektrum und bei hohem Druck ( $p \approx 100$  bar) ein Bandenspektrum.

Bandenspektren sind charakteristisch für Atome und Ionen, die miteinander wechselwirken und einfache Moleküle.

### **Kontinuierliches Spektrum**

Das Linienspektrum enthält alle Wellenlängen. Es ist oft bei der Anregung komplexer Moleküle zu beobachten. Da alle Wellenlängen in einem kontinuierlichen Spektrum zu beobachten sind erschwert das die qualitative Messung mit dem Auge (s.u.). Allerdings besitzt jedes kontinuierliche Spektrum ein Maxima, welches als  $\lambda'$  bezeichnet wird und charakteristisch für den angeregten Stoff ist.



### **Induzierte Emission - Laser**

Neben dem Transistor war der Laser ende der 40 Jahre die größte Erfindung. Auch das Licht eines Lasers entsteht, wie bei fast allen Lichtquellen, die wir kennen, aus einem Angeregten Stoff der Licht im sichtbaren Bereich emittiert. Allerdings agieren beim Laser die Atome nicht wie bei normalen Lichtquellen sondern eher als kollektiv. Dadurch ergeben sich verschiedene Eigenschaften.

### **Die Eigenschaften des Laserlichts**

Laserlicht stellt in der Technik neue Möglichkeiten zur Verfügung. Diese neuen Möglichkeiten sind aufgrund der herausragenden Eigenschaften des Laserlichts zu erklären:

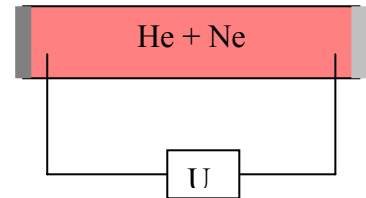
1. **Laserlicht ist hochgradig monochromatisch:** Das Licht von fluoreszierenden Stoffen ist in der Regel monochromatisch. Allerdings nicht hochgradig. Im Spektrum werden sich verschiedene Linien abzeichnen, die aber durch Bereiche mit minimaler Intensität verbunden sind. Laserlicht hat eine relative schärfe bis  $10^{15}$  und ist damit hochgradig monochromatisch.
2. **Laserlicht ist hochgradig kohärent:** Kohärent bedeutet in diesem Fall, dass sich auch nach langer Laufstrecke, weder die Wellenlänge noch die Phase zweier Laserstrahlen verändern.
3. **Laserstrahlen sind parallel:** Ein weiteres Merkmal des Laserlichts ist, dass sich auch nach langer Laufstrecke die Dicke des Strahlenbündels kaum verändert hat.



4. *Laserstrahlen können stark fokussiert werden*: Für die Strahlungsintensität können sehr hohe Werte erreicht werden. Selbst ein Laser mit der Leistung von einem Watt, kann die Strahlungsintensität von mehreren  $\text{kW/cm}^2$  durch starke Bündelung erreicht werden. Die Stärksten Laser schaffen heutzutage eine Intensität von  $10^{17} \text{ W/cm}^2$  (Zum Vergleich die Intensität eines heißen Flamme  $10^3 \text{ W/cm}^2$ ).

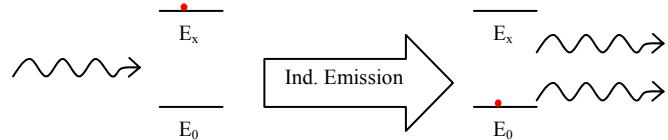
### Funktionsweise

Wie schon angedeutet entsteht das Laserlicht ähnlich wie viele anderen Lichtarten. Durch die Anregung und die Emission eines Stoffes. Der in der Forschung am häufigsten benutzte Laser ist der Helium-Neon-Laser, dessen Funktion genauer betrachtet werden soll.



Die nebenstehende Skizze verdeutlicht den Aufbau eines Gaslasers. An der einen Seite findet man einen Spiegel(dunkelgrau), an der anderen Seite einen halbdurchlässigen Spiegel(hellgrau). Im inneren des Zylinders sind die Edelgase Helium und Neon als Atmosphäre untergebracht.

Elektronen, die sich entlang des elektrischen Felds im Zylinder bewegen kollidieren mit den Heliumatomen, die dadurch angeregt werden. Die Heliumatome übertragen ihre Energie an die Neonatome, die für die Emission des Lichts zuständig sind. Die eigentliche Neuheit ist, dass die emittierten Lichtwellen innerhalb der Röhre durch die Spiegel reflektiert werden. Nun kommt die eigentliche



Eigenschaft der Neon-Atome zum tragen. Sie befinden sich, haben sie Energie aufgenommen, in einem metastabilen Zustand. Durch die Lichtstrahlen die entlang der Röhre von den Spiegeln reflektiert werden, werden sie zur Emission angeregt. Das emittierte Licht ist mit denen, die die Emission ausgelöst haben, in Phase. Man spricht von induzierter Emission. In der Röhre entsteht eine stehende Welle. Jeweils ein Teil des Lichts tritt durch den halbdurchlässigen Spiegel. Bei vielen Lasern, vor allem bei denen eine Verhältnismäßig große Raumanwendung gestattet ist, werden Gaslaser benutzt. Die typischen Laser mit den Wellenlängen der emittierten Strahlen: HeNeGas => 633nm;  $\text{CO}_2$  =>  $10,6\mu\text{m}$ ; Argonionen => 488nm oder 514nm. Generell eignen sich alle Edelgase für die Herstellung von Lasern, da ihre Elektronenstruktur eine leichte Anregung zulässt.

Die Anregung von Atomen ist bei verschiedenen Lasern unterschiedlich. Bei Kristalllasern, speziell bei den Rubinlasern werden die Atome durch ein Magnetfeld angeregt. Hierzu sind für große Lichtleistung sehr starke Magnetfelder erforderlich. Die Lösung dieses Problems liegt in den Supraleitern, die gekühlt nahezu keinen Widerstand haben.

Unter den Lasern gibt es verschiedene Betriebsarten. Die normalen Laser strahlen kontinuierlich. Allerdings ist das nicht bei allen Lasern möglich und nötig. Der größte Laser der Erde füllt ein ganzes Gebäude und hat eine Leistung von  $10^{14} \text{ W}$ . Da alle Kraftwerke der Welt nicht diese Energie erzeugen können wird dieser Laser als Impulslaser betrieben.

### Effekte von hochenergetischer Strahlung

Hochenergetische Strahlen gehen mit Stoffen in ihrer Ausbreitungsrichtung verschiedene Wechselwirkungen ein. Diese sind zwingend mit einer Energieabnahme oder einer kompletten Auslöschung der Strahlen verbunden. Die Art und die Erscheinung der Wechselwirkungen sind für Stoffe zum größten Teil charakteristisch. Meistens treten die unten vorgestellten Effekte nur bei elektromagnetischen Wellen auf. Bei Materialstaltungen

treten andere Wechselwirkungen auf, die sich alleinig mit der newtonschen Kinetik und Energetik erklären lassen.

### **Anregung**

Die Anregung ist das wohl am einfachsten zu erklärende Phänomen, das auf eine Wechselwirkung zwischen Strahlung und dem Angeregten Teilchen zu erklären ist. Dieser Effekt kann durch den Wellen oder den Teilchencharakter der elektromagnetischen Wellen erklärt werden. Die angeregten Teilchen können die zugeführte Energie auf verschiedene Arten speichern (Temperaturerhöhung u.a.) oder wieder abgeben (Emission, Reaktionen u.a.). Einige Beispiele für die Anregung mit elektromagnetischen Wellen sind: Mikrowellen (Temperaturänderung durch Anregung der Wassermoleküle), Chlorophyll (Energiereiche Bindungen durch Anregung erzeugen), Fluoreszenz (Emission einer anderen Wellenlänge). Der Effekt der Anregung ist im Vergleich bei niedrigen Wellenenergien zu beobachten.

### **Photoeffekt**

Der Photoeffekt ist ein Oberbegriff für drei verschiedene Phänomene. Man unterscheidet einen inneren und einen äußeren Photoeffekt und einen photoelektrischen Effekt. Alle diese Effekte beruhen auf der Interaktion der elektromagnetischen Wellen mit Elektronen, also newtonschen Teilchen. Daher muss dieses Experiment mit dem Teilchencharakter der elektromagnetischen Strahlen beschrieben werden.

Der äußere Photoeffekt tritt bei Metallen auf. Die elektromagnetischen Strahlen können, reicht ihre Energie aus, Elektronen aus dem Metall herauslösen. Dieses Phänomen wurde als erstes entdeckt und dient als Nachweis des Teilchencharakters der elektromagnetischen Strahlen.

Der innere Photoeffekt tritt bei Halbmetallen auf. Die Elektronen der Halbmetalle werden dadurch in das Leitungsband (Energieniveau bei dem sich die Elektronen frei zwischen den Atomen bewegen können) angehoben und verursachen eine Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit der Halbmetalle nimmt mit zunehmender Energie der Strahlen zu. Dieser Effekt findet in allen Geräten Anwendung, bei denen die Anwesenheit oder die Intensität der Strahlen gemessen werden sollen (Photodiode).

Der photoelektrische Effekt tritt in Gitterstrukturen auf. Der Mensch macht sich dieses Phänomen in Solarzellen zu Nutze. Hier kann bei Einfall von elektromagnetischen Strahlen eine Potentialdifferenz zwischen den oberen und unteren Leiterbahnen gemessen werden. Die genaue Funktion von Solarzellen soll hier nicht genau erklärt werden. Nur soviel: durch die Energie der elektromagnetischen Strahlen können Elektronen wandern. Durch eine Dotierung einer der Schichten können die Elektronen entgegengesetzt eines Potentials wandern. Allerdings ist der Wirkungsgrad von Solarzellen noch sehr begrenzt.

### **Comptoneffekt**

Der Compton beschäftigt sich mit der Wechselwirkung zwischen Elektronen und den Lichtquanten, den Photonen. Dieser Effekt kann auch als Beweis für den Teilchencharakter der elektromagnetischen Wellen herangezogen werden.

Der ursprüngliche Versuch wurde mit Röntgenstrahlen und einer dünnen Schicht aus Atomen, die aufgrund ihrer Struktur in der äußeren Atomhülle Elektronen mit wenig potentieller Energie, quasi freie Elektronen besitzen. Für die rechnerische Auswertung dieses Versuches müssen relativistische Effekte berücksichtigt werden. Von der Theorie her ergibt sich folgende Auswertung:

Elektromagnetische Wellen, speziell hochenergetische kurzwellige Strahlen, haben neben dem Wellencharakter auch einen Quantencharakter. Die Energie einer Welle ( $E = h f$ ) kann auch als Energiequant gesehen werden. Daraus folgt die Energiequanten geben die Energie

ähnlich wie ein newtonsches Teilchen an andere reale Teilchen ab. Es gelten für die Stöße zwischen Photonen und anderen Elementarteilchen sowohl Impuls als auch Energieerhaltung. Geht man nun davon aus, dass es sich bei den Elektronen in den äußeren Schichten um nahezu freie Elektronen handelt, kann die Auslösearbeit vernachlässigt werden. Danach gelten die einfachen Stoßgesetze. Das Photon wird einen Teil seiner Energie einbüßen und diese als kinetische Energie an das Elektron übergeben. Dieser Effekt ähnelt dem Photoeffekt, hat allerdings einen kleinen Unterschied. Die Photonen werden durch den Energieverlust nicht ausgelöscht sondern dynamisch gestreut. Diese gestreuten Photonen haben eine andere Energie, wegen des Energieverlust an das Elektron, als vor dem Zusammenstoß. Um nicht mit relativistischen Effekten rechnen zu müssen ist die Energieabnahme eines Photons mit der kinetischen Energie des getroffenen Elektrons gleichzusetzen. Durch die Energieänderung des Photons ändert sich auch die Energie der Welle und somit auch ihre Wellenlänge.

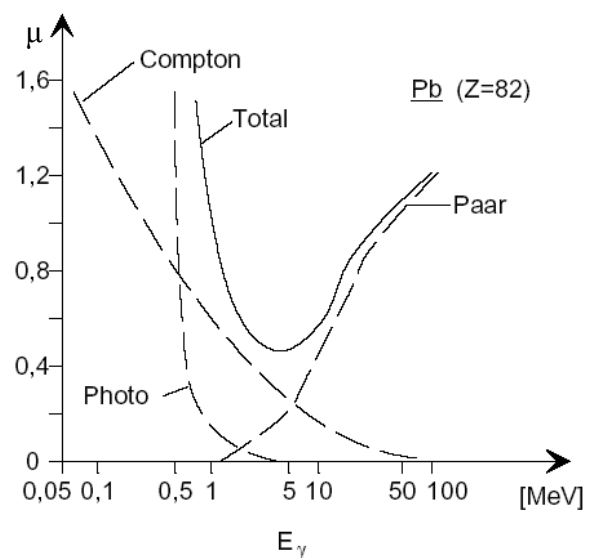
$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 = E^{Elektron}_{kin} = \Delta E_\lambda = h \Delta f = h \frac{c}{\Delta \lambda}$$

### Paarbildung

Die Paarbildung ist ein Phänomen von sehr hochenergetischen elektromagnetischen Wellen. Reicht die Energie einer Welle aus so kann sich, nach der Energie-Masse-Äquivalenz von Einstein, die Energie in eine Masse umwandeln. Dies geschieht immer in der Nähe eines anderen Teilchen, oft in der Nähe eines Atomkerns. Die Wellenenergie wird zum größten Teil in die Masse eines Teilchen und seines Antiteilchens umgewandelt. Ist Energie übrig, kann diese als kinetische Energie an die entstanden Teilchen übergeben werden. Das entstehen eines einzelnen Teilchens aus einer Welle ist nach heutiger Überzeugung nicht möglich. Die Energie, ab dem das Phänomen der Paarbildung auftreten kann ist ungefähr 1 MeV, mit kleinerer Energie können die Teilchen nicht entstehen. Die Art der einstandenen Teilchens ist nicht immer die gleiche. Es können Neutrinos und Antineutrinos, Elektronen und Positionen oder noch massehaltigere Teilchen entstehen. Die Masse der Teilchen ist aber wegen Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz durch die Energie der Welle begrenzt. Treffen Teilchen und Antiteichen wieder aufeinander wird sich die Masse und die kinetische Energie der Teilchen wieder in eine Wellenenergie umwandeln.

### Rechnen mit den Effekten

Die oben genannten Effekte sind alle zum Teil für eine Absorption von elektromagnetischen Wellen verantwortlich (vgl. Schwächungsgesetz). Für langwellige Strahlen ist für die Absorption fast ausschließlich die Anregung verantwortlich, da die andere Prozesse eine minimale Energie voraussetzen die Langwellige Strahlen aber nicht haben. Für hochenergetische Strahlen ist die Anregung von Atomen meistens zu vernachlässigen. Der näher vorgestellte Massenschwächungskoeffizient hängt in erster Linie vom Photoeffekt, von Comptoneffekt und von der Paarbildung ab. Die Schwächung durch diese Effekte sind mit  $\tau_m$  für den Photoeffekt,  $\sigma_m$  für den Comptoneffekt und  $\kappa_m$  für die Paarbildung. Der eigentliche Massenschwächungskoeffizient  $\mu_m$  ergibt sich aus der Summe aller Schwächungen.



Es gilt:  $\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$ . Aus dem Schaubild mit halblogarithmischen Skalen zeigt die Schwächung in Abhängigkeit von der Energie der Wellen für Blei. Die Schaubilder anderer Elemente sehen ähnlich aus. Es ist zu bemerken, dass der Massenschwächungskoeffizient für im niedrigen Energiebereich hauptsächlich von Photoeffekt, im mittleren Energiebereich hauptsächlich von Comptoneffekt und ab ca. 5MeV von der Paarbildung abhängig ist.

## Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen oder besser Röntgenwellen finden neben den Radiowellen und dem sichtbarem Licht wohl die bekanntesten Anwendungen der elektromagnetischen Wellen. Sie sind kurzwellige, energiereiche elektromagnetische Wellen. Ihre Wellenlänge liegt im Bereich von ungefähr  $100\text{pm} = 0,1\text{nm}$ . Röntgenwellen sind wegen ihrer kurzen Wellenlänge sehr energiereich und in großer Dosis für jeden Organismus schädlich oder sogar tödlich. In der Natur entstehen Röntgenstrahlen nur auf den Sonnen, werden aber zum größten Teil in der Atmosphäre absorbiert. In der Astronomie spielen die Röntgenwellen seit der Möglichkeit der extraterrestrischen (außerhalb der Atmosphäre) Beobachtung eine große Rolle.

### Entstehung

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, die von einem Stoff, dem Energie zugeführt wird emittiert wird. In diesem Fall wird der Stoff nicht erhitzt sondern regelrecht beschossen. Als Energiequelle für die Emission von Röntgenstrahlen wir ein Elektronenstrahl benutzt. Röntgenstrahlen werden oft als das Bremsspektrum eines Elektronenstrahls beschrieben. Je energiereicher der Elektronenstrahl (kinetische Energie) ist, desto höher ist die Intensität und die Energie der Röntgenstrahlen.

Die Grundlagen der Röntgenröhre:

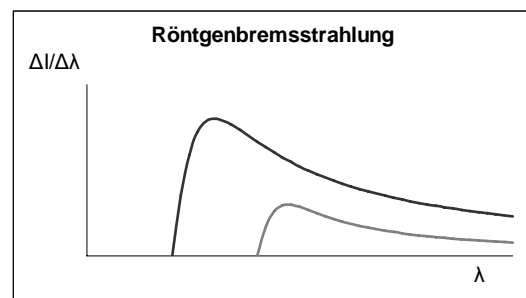
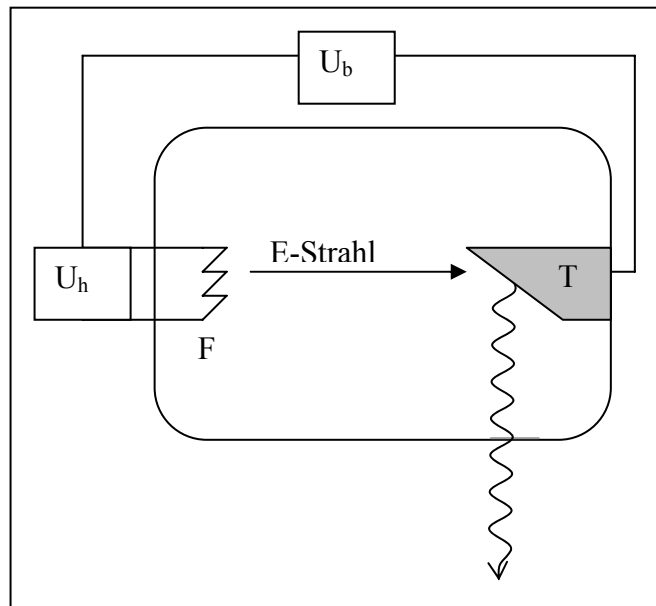
Durch eine Spannung  $U_h$ , in der Physik auch oft Heizspannung genannt, werden aus einer Spule Elektronen freigesetzt. Diese Elektronen werden in einem Potenzial zwischen der Spule F und dem sogenannten Target (T) (an dem der Elektronenstrahl abgebremst wird) in einem elektrischen Feld beschleunigt. Die dazu verwendete Spannung wird die Beschleunigungsspannung ( $U_b$ ) genannt. Die gesamte Anordnung (Spule & Target) befinden sich in einem Hochvakuum um den Verlust der Kinetischen Energie der Elektronen durch Moleküle in der Luft möglichst gering zu halten.

Für die kinetische Energie der Elektronen gilt:  $E_{kin} = Q \cdot U_b$ . Sie ist also proportional

zur Beschleunigungsspannung. Geht man davon aus, dass die Energieübertragung zwischen Elektronenstrahl und (Emissions-)Target nicht elastisch, also ohne Verlust ist, so kann man die kinetische Energie der Elektronen mit der Energie der entstehenden Röntgenwellen gleichsetzen wobei die resultierende Wellenlänge die kleinst Mögliche Wellenlänge

ist:  $E_{kin} = E_{wellen} \Rightarrow Q \cdot U_b = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda_{min}}$  wobei

Q die Elementarladung, h das plank'sche Wirkungsquantum und c die



Lichtgeschwindigkeit ist. Hierdurch erhält man die maximale Energie(oder die minimale Wellenlänge) der emittierten Strahlen. Allerdings werden nur wenige der emittierten Wellen diese Energie besitzen. Die Energieverteilung, also das Spektrum, ist ein kontinuierliches Spektrum mit einer minimalen Wellenlänge. Die minimale Wellenlänge und die maximale Intensität ist von der Beschleunigungsspannung abhängig. Im Schaubild sind zwei Röntgenspektren für unterschiedliche Beschleunigungsspannungen abgebildet. Bei energiereichen Röntgenstrahlen spricht man harten Strahlen. An den Schaubildern kann man erkennen, dass sich, wenn man die Beschleunigungsspannung erhöht, die Intensität und die Härte der Röntgenstrahlen verändert.

Das ursprüngliche kontinuierliche Röntgenspektrum zeigt mit zunehmender Beschleunigungsspannung einige Maxima, es wird zum Linienspektrum. Das Linienspektrum entsteht durch die Wechselwirkung von den Elektronen mit den Atomkernen des Targets, die angeregt werden und selber sehr harte Röntgenstrahlen emittieren. Das entstehende Linienspektrum ist charakteristisch für den Stoff des Targets.

### ***Leistung und Wirkungsgrad***

Unter der Leistung(P) einer Strahlung versteht man die Arbeit, die die Strahlung an einem Körper verrichten kann, also die Energie der Strahlen, durch die Einwirkzeit der Strahlen. Bei Röntgenstrahlen ist die Leistung abhängig von der Beschleunigungsspannung, von der Intensität der Strahlung und von der Ordnungszahl des Targets. Es gilt der Zusammenhang:

$$P \sim U^2 I Z$$

Der Wirkungsgrad der Röntgenröhre ist ein spezifischer Wert für die jeweilige Röntgenröhre. Allgemein ist der Wirkungsgrad ( $\eta$ ) der Quotient aus der Abgestrahlten Leistung und der zugeführten Leistung. Die zugeführte Leistung ist die Leistung der Beschleunigungsspannung. Für den Wirkungsgrad einer Röntgenröhre erhält man  $\eta \sim UZ$ . Der Wirkungsgrad einer Röntgenröhre ist normalerweise ca. 0,5 - 1%. Die Restleistung wird in Wärme umgesetzt. Daher müssen Röntgenröhren gekühlt werden.

### ***Spezielle Absorptionsgesetze***

Für die Schwächung der Röntgenstrahlen kann einerseits das oben vorgestellte Konzept der Schwächung für EM Strahlen benutzt werden. Andererseits ist damit eine Rechnung sehr aufwendig, da mehrere Stoffe durchleuchtet werden. Anstatt dem normalen Schwächungsgesetz benutzt man hier eine abgewandelte Art des Gesetzes.

Das Gesetz für die Schwächung von Röntgenstrahlen hat nach der Umformung folgende Form:  $I(x_m) = I_0 e^{-\mu_m x_m}$ . Die Änderungen betreffen die Absorptionskonstante und die

unabhängige Variable. Beide werden um die Masse erweitert. Die Schwächungskonstante ist Grundlage für die Massenschwächenkoeffizienten  $\mu_m$ . Er kann durch mit der Dichte berechnet

werden. Es gilt:  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$  wobei  $\rho$  die Dichte des Stoffe ist.

Der Massenschwächungskoeffizient ist, wie oben gezeigt im Bereich der hochenergetischen Strahlen von drei Effekten Abhängig. Für den Bereich des Röntgenspektrums gilt, dass der Massenschwächungskoeffizient hauptsächlich von der Schwächung durch den Photoeffekt abhängig ist. Für die Schwächung von Strahlen durch den Photoeffekt gilt:

$$\tau_m \sim \lambda^3 Z^3 \text{ mit } Z = \text{Ordnungszahl des Absorbenten.}$$

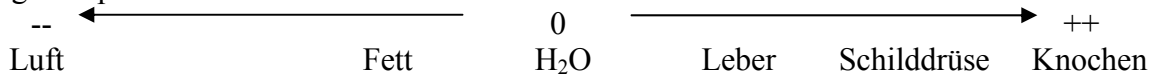
Die Schwächung der Röntgenstrahlen nimmt also mit steigender Wellenlänge und mit steigender Ordnungszahl des Absorbenten zu. Daraus ergibt sich für die Anwendung möglichst Energiereiche, also Kurzwellige Röntgenstrahlen zu benutzen, und für eventuelle Kontrastmittel Elemente mit unterschiedlichen Ordnungszahl im Vergleich zu den Elementen im Gewebe.

Sinnvolle Anwendung findet der Massenschwächungskoeffizient bei der Qualifizierung von Kontrasten bei der Auswertung von Röntgenbildern. Für diesen Zweck gibt es die Hounsfield-Skala. Sie vergleicht die entstehenden Kontraste mit dem Kontrast des Wassers.

Für den Hounsfield-Wert gilt.  $H = \frac{\mu - \mu_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} 1000$ . Für verschiedene Gewebe ergeben sich

verschiedene H Werte.

Einige Beispiele in der Hounsfield-Skala:



## Kernstrahlung

Zur Betrachtung der Kernstrahlen muss als erstes der Radioaktive Zerfall der Isotope besprochen werden.

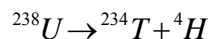
### Radioaktiver Zerfall

Es gibt in der Natur verschiedenen Radioaktive Isotope. Isotope mit kurzer Halbwertszeit kommen in der Natur nicht mehr vor, da sie höchstwahrscheinlich bei der Entstehung der Erde entstanden sind und mittlerweile nicht mehr da sind.

Radioaktive Isotope zeichnen sich durch eine erhöhte Energie im Atomkern aus, der dadurch keinen stabilen Zustand haben. Da alle Teilchen nach einer möglichst kleinen Energie streben, zerfallen die Atomkerne in verschiedene Bestandteile. Die überschüssige Energie wird in Form von Strahlung abgegeben. Die meisten abgesandten Strahlen sind in Form von Teilchenstrahlen. Ausnahme ist dort die  $\gamma$ -Strahlung, die eine Emission von hochfrequenter elektromagnetischer Wellen ist.

### $\alpha$ – Zerfall

Als Alpha-Zerfall bezeichnet man die Umwandlung eines Atomkerns in einen anderen Atomkern mit der Emission eines Alpha-Teilchens (ein Heliumkern). Als Beispiel:



Der Zerfall von Uran erfolgt spontan. Um das zu erklären muss die Massen-Energie-Äquivalenz und Energieerhaltung zugezogen werden.

Einstein stellte neben seiner Relativitätstheorie noch andere Theorien über Quanten und Energie auf. Die wohl bekannteste Formel muss betrachtet werden:  $E = mc^2$ . Diese Theorie besagt, dass sich die Masse eines Stoffes teilweise oder ganz als eine Energie anzusehen ist, oder sie auch umgewandelt werden kann.

Wiederum gilt in einem abgeschlossenem System, dass die Summe aller Energien, miteingerechnet der Bindungs- und der Massenenergie konstant ist.

Jedes Teilchen versucht eine möglichst kleine Energie anzunehmen. Da bei instabilen Atomkernen die Massenenergie größer ist, als die Massenenergie der Endprodukte, findet ein Zerfall spontan statt. Die Energie, die bei der Abspaltung des Alpha-Teilchens frei wird, ist die Spaltenenergie. Diese Energie ist für eine Atomart exakt und wird bei der Spaltung als kinetische Energie des Alpha-Teilchens umgewandelt. Mit der Quantenmechanik kann den Alpha-Teilchen eine gewisse Wellenlänge zugeordnet werden. Die Spektralanalyse dieser Strahlen ergibt ein für ein Isotop charakteristische Energie.

### $\beta$ – Zerfall

Der Beta-Zerfall ist kein Zerfall im eigentlichem Sinne. Die Masse des Atomkern verändert sich nicht. Allerdings entstehen durch eine Änderung der Ladungen im Atomkern ein neues

stabiles Element. Außerdem emittiert der Kern zwei Leptone (Teilchen mit nur schwacher Wechselwirkung). Welche Leptone emittiert werden hängt von der Art des Beta-Zerfalls ab. Zum besseren Verständnis: Zu den Leptonen zählen eine Vielzahl kleiner Teilchen, die abgesehen von einer elektrischen und einer sehr geringen Gravitationskraft, sonst nur schwache Wechselwirkungen untereinander besitzen. Die Hadrone besetzen im Gegensatz dazu eine starke Wechselwirkung untereinander. Auf die Art der Wechselwirkung soll nicht eingegangen werden. Wichtig für das Verständnis des Beta-Zerfalls sind folgende Teilchen:

1. Elektron: Elektronen sind kleine geladene Teilchen die eine negative Elementarladung besitzen. Sie haben im Vergleich zu anderen Leptonen eine relativ große Masse, spielen aber in der Atommassenbetrachtung keine Rolle.
2. Positron: Haben im Prinzip gleiche Eigenschaften, wie ein Elektron. Allerdings ist ihre Ladung nicht eine negative, sondern eine positive Elementarladung. Das Positron ist nicht das Antiteilchen eines Elektrons-
3. Neutrino: Das Neutrino wurde lange Zeit nicht für existent gehalten, da der Nachweis eines Neutrinos sehr kompliziert ist. Man hat über das Neutrino fast keine Informationen. Es ist ein sehr kleines Teilchen, das entweder eine sehr kleine oder überhaupt keine reale Masse hat. Das Neutrino tritt mit fast keinen anderen Teilchen in Wechselwirkung. Man vermutet, dass eine unvorstellbare Menge an Neutrinos unsere Erde und auch Körper pro Sekunde durchdringen, ohne einen Effekt an den Atomen oder deren Struktur zu zeigen. Zeichen für ein Neutrino:  $\nu$
4. Antineutrino: Das Antineutrino ist das Antiteilchen zu einem Neutrino. Das Antiteilchen ist mit der Massen-Energie-Äquivalenz zu erklären. Bei der Umwandlung zweier Energien in Wellenform(Gamma-Strahlen) entstehen sowohl ein Teilchen als auch ein Antiteilchen:  

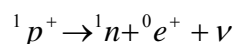
$$\gamma + \gamma \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$$

Das Umwandeln von Teilchen und Antiteilchen in Strahlungsenergie ist ebenfalls möglich. So zerstrahlen ein Elektron und sein im Teilchenbeschleuniger künstlich erzeugtes Antiteilchen zu reiner Strahlungsenergie. Diese Verschmelzungen finden zum Teil auch in den Sonnen statt, da aufgrund der immensen Energien, die bei der dort stattfindenden Kernreaktionen leicht ein Antiteilchen erzeugt werden kann. Allerdings ist noch niemandem der Nachweis natürlicher Antiteilchen gelungen. Man vermutet, dass sog. Schwarze Materie im Weltall zum Teil aus Antiteilchen besteht.

Antiteilchen verhalten sich nicht mehr wie die uns bekannten newton'schen Teilchen und sind daher nur schwer vorstellbar.

### ***positiver $\beta$ -Zerfall***

Als positiver Beta-Zerfall wird der Beta-Zerfall bezeichnet bei dem das Atom ein Elektron und ein Antineutrino emittiert. Anders gesagt verändert sich beim positiven Beta-Zerfall ein Proton des instabilen Atomkerns:



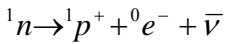
Aus einem massereichen Proton wird ein massereiches Neutron, ein massearmes Elektron und ein Neutrino. Da sich die frei werdende Energie bei diesem Zerfall auf drei Teilchen verteilt, haben die zugeordneten Wellenlängen der nachweisbaren Teilchen(Positronen) kein kontinuierliches Spektrum.

Beim positiven Beta-Zerfall erniedrigt sich die Kernladungszahl eines Atoms(Isotops). Es entsteht ein neues stabiles Element(definiert sich über die Anzahl der positiven Ladungen im Kern). Ein Beispiel für einen positiven Beta-Zerfall:

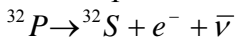


### **negativer $\beta$ -Zerfall**

Der negative Beta-Zerfall ist ähnlich dem positiven Beta-Zerfall eine Veränderung eines massereichen Teilchens im Atomkern. Hier entsteht ebenfalls ein neues Element, allerdings mit größerer Ordnungszahl. Beim negativen Beta-Zerfall wird anstatt eines Positrons ein Elektron und anstatt eines Neutrinos sein Antiteilchen emittiert.



Ein Beispiel für einen negativen Beta-Zerfall:



### **Die andere Theorie**

Der Beta-Zerfall kann auch als Elektroneneinfang erfolgen, bei dem ein Atomkern zerfällt, indem er eines seiner Elektronen absorbiert und ein Neutrino emittiert.

### **$\gamma$ – Strahlen**

Gamma-Strahlen entstehen im Gegensatz zu den Alpha- und Beta-Strahlen nicht direkt beim Kernzerfall. Sie sind hochenergetische elektromagnetische Wellen. Sie sind meistens ein Nacheffekt nach dem Kernzerfall.

Gamma-Strahlen sind allerdings nicht von der Elektronenhülle emittierte Strahlen sondern Kernstrahlen im eigentlichen Sinne. Der Kern verlässt ein Energieniveau und emittiert die freiwerdende Energie als Gamma-Strahlen. Diese sind je nach Isotop oder Atom verschieden, aber die Energie ist diskret. Die Energie des Kerns ist entweder durch einen vorausgegangenen Beta-Zerfall oder durch ein energiereiches Isotop zu erklären. Beim der direkten Gamma-Emission ist der Kern des strahlende Isotops durch seine Entstehung oder Struktur nicht auf dem geringsten Energieniveau.

### **Das Zerfallsgesetz und die Aktivität**

Ob und wann ein Atomkern zerfällt ist nicht genau vorherzusagen. Allerdings gibt es statistische Methoden um zu ermitteln ob die Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein Atomkern zerfällt. Aus der Statistik lässt sich das Verhalten mehrerer Atome vorhersagen. Betrachtet man eine bestimmte Anzahl (N) an Atomen so kann man mit Hilfe der Zerfallsgesetze nicht vorhersagen welche Kerne zerfallen sondern vielmehr die Menge der Atomkerne die in einem bestimmten Zeitraum zerfällt.

#### **Das Zerfallsgesetz:**

Für den Zerfall von einer Menge N an radioaktiven Isotopen gilt in der Zeit der unendlich kurzen Zeit dt:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{wobei } \lambda: \text{ die Zerfallskonstante mit } [\lambda] = \frac{1}{s}$$

daraus folgt die verbliebene Menge N in Abhängigkeit von der Zeit t:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Die Halbwertszeit(T) ist die Zeit nach der die Hälfte der vorliegenden Isotope zerfallen ist. In der Zeit T ist nur noch die Hälfte der Isotope vorhanden.

$$\text{Es gilt: } N(T) = N_0 e^{-\lambda T} = 0,5 \quad \text{daraus folgt: } \lambda = \frac{\ln(0,5)}{T}$$

Analog zu der Halbwertszeit (T) ist die mittlere Lebensdauer( $\tau$ ) bei der die Anzahl der Isotope auf das 1/e-fache abgesunken ist.

Die Aktivität( $\Lambda$ ) oder die Zerfallsrate zur Zeit(t) ergibt einer Menge(N(t)) radioaktiver Isotope ist durch die Anzahl(dN) der Zerfällen pro Zeiteinheit(dt) definiert. Es gilt also:



$$\Lambda(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Die Anfangsaktivität ( $\Lambda_0$ ) ist definiert als die Aktivität einer Probe zum Zeitpunkt  $t = 0$ . für die Anfangsaktivität gilt:  $\Lambda_0 = \lambda N_0$  durch das Einsetzen in die Gleichung für die Aktivität zum Zeitpunkt  $t$  ergibt sich:  $\Lambda(t) = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$

## Messverfahren

### Elektromagnetische Strahlen

Das Problem bei der Messung von elektromagnetischen Strahlen ist ein rein technisches Problem. Um genaue Größen messen zu können, sind entweder elektrische Impulse nötig. Gerade für die Digitalisierung der Messergebnisse müssen die Information binär, also als elektrische Impulse vorliegen. Auch bei quantitativen Messungen im Bereich des sichtbaren Lichts kann auf eine Umwandlung der Messergebnisse in einfach auswertbare elektrische Impulse nicht verzichtet werden. Die Umwandlung der Wellenenergien kann auf verschiedene Arten erfolgen.

### Umwandlung in sichtbares Licht

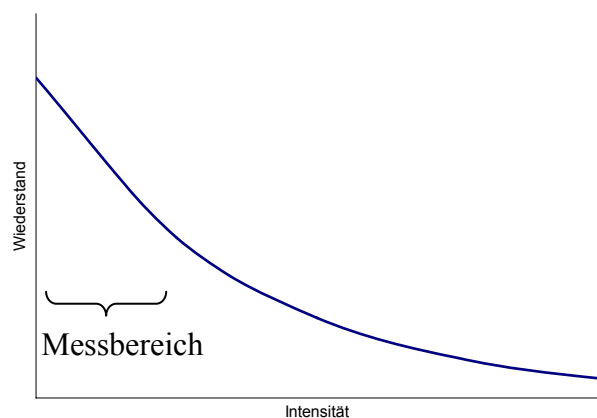
Viele elektromagnetische Wellen, die für Messungen eingesetzt werden, sind Wellen nicht im Bereich des sichtbaren Lichts. Diese Wellen können durch einfache Aufbauten in Sichtbares Licht umgewandelt werden. Als Grundlage der Umwandlung kann einerseits die Anregung oder der Comptoneffekt herangezogen werden. Da beim Comptoneffekt allerdings die Energieverteilung zwischen Lichtquant und Elektron nicht konstant ist, wird der Comptoneffekt eigentlich nicht zur Sichtbarmachung unsichtbarer Wellen angewandt. Zum Prinzip: Auf einer Mattscheibe sind Stoffe angebracht, die durch die Anregung mit Wellen einer bestimmten Wellenlänge eine andere Wellenlänge emittieren. Der Effekt wird oft als Fluoreszenz beschrieben. Die fluoreszierenden Stoffe können aber nur elektromagnetische Wellen einer gewissen Wellenlänge „umwandeln“ und sind daher spezifisch für den Nachweis von bestimmten Spektren.

### Photodiode

Die Photodiode ist das einfachste elektrische Bauteil was eine Umwandlung von Wellensignalen in elektrische Signale.

Zur Funktion:

Die Photodiode besteht aus einem halbleitenden Element. Für die Umwandlung der Lichtimpulse in eine messbare Größe bedient man sich des äußeren Photoeffekts. Der Widerstand der Photodiode ändert sich antiproportional mit der Intensität der einfallenden elektromagnetischen Wellen. Allerdings ist der Widerstand der Photodioden für gleiche Intensitäten und unterschiedliche Wellenlängen nicht konstant. Das bedeutet eine Photodiode muss immer vor einer Messung von einer bestimmten oder mehrerer Wellenlänge kalibriert werden. Folglich kann die Photodiode immer nur zur Intensitätsbestimmung oder zur Bestimmung einer Intensitätsänderung benutzt werden. Aus technische Gründen ist die Widerstandsveränderung der Photodiode immer nur für einen bestimmten Bereich der



elektromagnetischen Strahlung konstant. Die zu messenden Wellenlängen müssen immer im Messbereich der Diode sein.

### **Photokathoden**

Photokathoden sind Platten, die die elektromagnetischen Wellenimpulse direkt in elektrische Impulse, nämlich durch die Freisetzung von Elektronen, umwandeln. Diese Platten bedienen sich ebenfalls des Photoeffekts.

Mit den Anlegen einer Spannung (in einer bestimmten Richtung) können die freigegebenen Elektronen entweder alle oder nur die mit einer gewissen kinetischen Energie gewählt werden. Die Messung der Intensität ist nur passiv möglich. Durch eine Intensitätsveränderung werden pro Zeiteinheit relativ mehr Elektronen aus der Photoplatte ausgelöst. Photokathoden können aber nur bei elektromagnetischen Wellen, deren Wellenlänge zwischen dem sichtbaren Lichtspektrum und dem Röntgenspektrum, angewendet werden.

### **CCD-Sensoren**

CCD ist die Abkürzung für charge-coupled-device. Das heißt auch hier kommt der Photoeffekt zum Einsatz. Allerdings findet hier der Photoeffekt nicht auf einer Metallplatte oder nur in einem Halbleiter statt, sondern in mehreren Schichten von Halbleitern. Die CCD-Technologie ist die Grundlage für die Bilderzeugung vieler digitaler Geräte (Digitale Kamera, usw.). Die verschiedenen Schichten des CCD's sind unterschiedlich durchlässig für Licht einer bestimmten Wellenlänge. Die Abtastung oder Messung der Widerstände der verschiedenen Schicht in verschiedenen Sektoren des CCD's wird über eine Messmatrix (Geflecht in unterschiedlichen Schichten der CCD's) realisiert. Das Bild, bzw. die Farbe der einzelnen Bildpunkte, also die Intensität und die Wellenlänge des einfallenden Lichts kann näher mit einem Mikroprozessor aus den Messwerten berechnet werden. CCD's sind sehr sensible Bauteile, die auch nur ein gewisses Spektrum exakt darstellen können. Um sehr exakte (digitale) Bilder zu erhalten müssen die optischen sowie die elektronischen Bauteile hochpräzise sein. Bei zunehmender Informationsmenge erhöht sich die Datenmenge exponentiell (wegen der zwei Achsen eines Bildes).

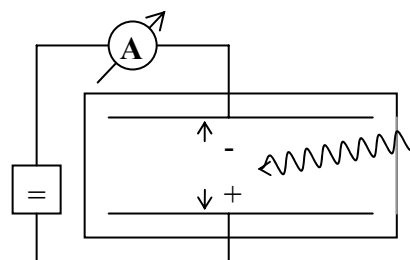
### **Kernstrahlen**

Kernstrahlen sind einerseits Teilchenstrahlen ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen), andererseits hochenergetische elektromagnetische Wellen ( $\gamma$ -Strahlen). Es gibt zwei Möglichkeiten für den Nachweis von Teilchenstrahlen. Beim aktiven Nachweis werden die Strahlen direkt, beim passiven indirekt nachgewiesen.  $\alpha$ -Strahlen haben in der Luft eine nur sehr beschränkte Reichweite. Auf dem Weg werden sie aber andere Atome anregen  $\gamma$ -Strahlen zu emittieren. Bei der passiven Messung werden die auftretenden Gamma-Strahlen gemessen. Einige Möglichkeiten zum Nachweis von Kernstrahlen

### **Gasionisationskammer**

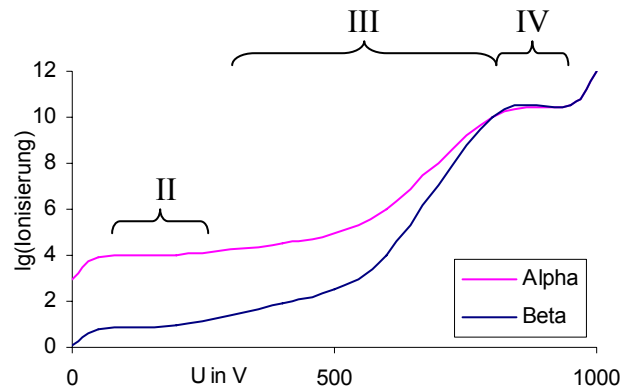
Die Gasionisationskammer dient zum Nachweis von Kernstrahlen anhand der ionisierenden Eigenschaft der Kernstrahlungen. In einer Kammer befinden sich, abgeschlossen von der Außenwelt, relativ wenige Gasatome (Unterdruck). Fallen ionisierende Strahlen, also Kernstrahlen oder sehr energetische Röntgenstrahlen in diese Kammer, können die Gasatome ionisiert werden. An den Elektroden in der Kammer wird eine Hochspannung angelegt, die

zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld erzeugt. Die geladenen Teilchen werden sich anhand dieses elektrischen Feldes in Richtung der Elektroden. Das positiv geladene Ion wird



zur negativ geladenen Elektrode, das Elektron zur positiv geladenen gezogen. Dort findet ein Ladungsausgleich statt. Durch den Ladungsausgleich wird der Stromkreis geschlossen. Man kann am Amperemeter einen Stromimpuls messen.

Allerdings ist die Stromstärke bei gleichbleibender Spannung abhängig von der angelegten Spannung. Das nebenstehende Schaubild zeigt die Anzahl der Ionisierungen in einer



Gasionsionskammer bei konstantem Strahlenbeschuss. Die verschiedenen Abschnitte des Schaubilds sollen genauer betrachtet werden.

- I: Der Bereich ist zu klein um ihn auf dem Schaubild zu markieren. Er ist der Bereich zwischen Achse und Bereich II. Hier ist es den Ionen möglich nach der Trennung sich wieder zu vereinigen.
- II: In diesem Bereich treffen alle Ionen an den Kathoden auf. Dieser Bereich wird in der Ionisationskammer zur Messung verwendet.
- III: In diesem Bereich erhalten die Ionen soviel kinetische Energie um selber Ionen zu erzeugen. Der Nachweis eines Alpha oder Beta Teilchens wird dadurch einfacher.
- IV: Die durch die Alpha und Beta Teilchen entstanden Ionen bilden eine Ionenlawine, die einen starken elektrischen Impuls auslöst. Dieser Bereich wird im Geiger Müller Zählrohr verwendet (Geräusch und Zähler). Vorteil: die Anzahl der entstehenden Ionen ist konstant, Nachteil: keine Differenzierung der anregenden Strahlung möglich.
- V: Dieser Bereich folgt nach dem vierten. In diesem Stadium ist die Ionisation ohne die Anwesenheit von Strahlen allein durch das elektrische Feld möglich. Dieser Bereich ist in der Messung der Kernstrahlen nicht benötigt.

### ***Szintillation***

Bei der Szintillation wird die Messung der Kernstrahlung über einen Umweg bewerkstelligt. Die Strahlung trifft hierbei auf einen Kristall (z.Bsp: ZnS). Durch die Energie der Kernstrahlen finden im Kristall verschiedene nicht chemische Reaktionen statt. Die erwünschte Reaktion ist eine Lichtemission. Tritt eine Ionisation auf, wird die Energie, die beim Wiederherstellen der Salzstruktur frei wird, ebenfalls durch eine Lichtemission abgegeben. Bei hochfrequenten elektromagnetischen Wellen treten unter anderem noch der Comptoneffekt (-> Emission durch Wiederherstellung der Gitterstruktur) und die Paarbildung (-> Emission durch Zerstrahlen der entstanden Teilchen) auf.

Für die Auswertung der Lichtblitze kann entweder ein einfaches Mikroskop, eine Photodiode (meist nicht benutzt wegen der Trägheit des Bauteils) oder eine Photokathode/Photomultiplier benutzt werden.

### **Hilfsmittel zur Signalverarbeitung**

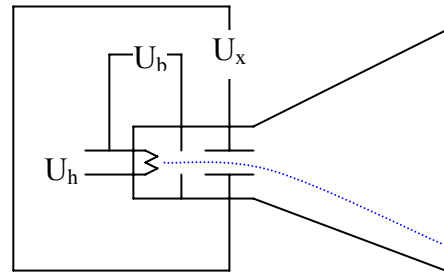
In der Signalverarbeitung werden häufig technische Geräte benutzt um verschiedenen Strahlen nachzuweisen oder die entstanden Bilder analog, vor einem CCD zu bearbeiten. Einige sollen hier vorgestellt werden.

### ***Kathodenstrahlröhre***

Die Kathodenstrahlröhre wird bei der Entstehung von Bildern in CRT - Monitoren, im Fernseher oder beim Oszilloskop wichtig. Das Prinzip ist relativ einfach. Eine mit einem Stoff

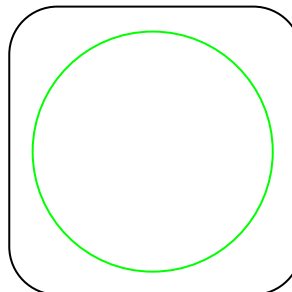
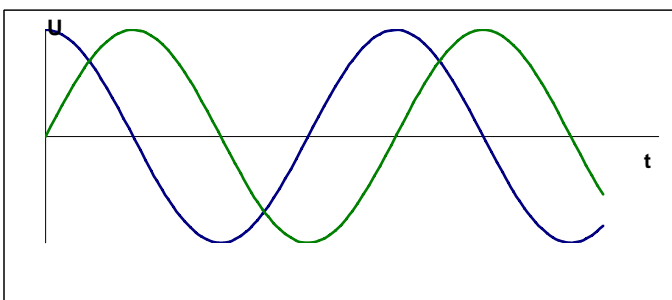
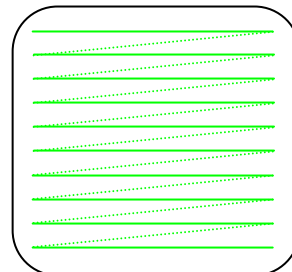
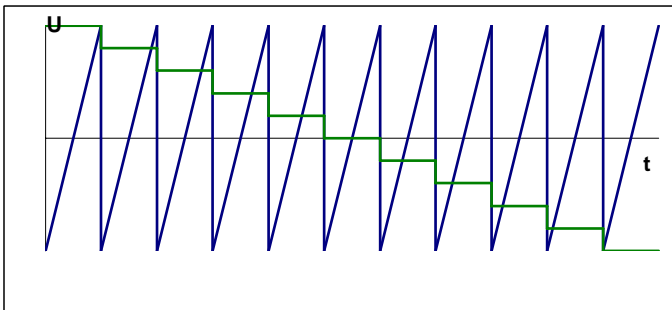
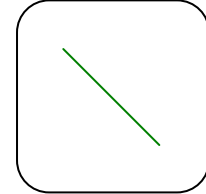
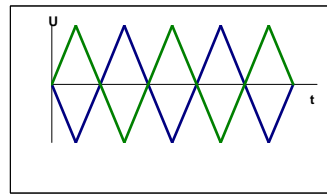
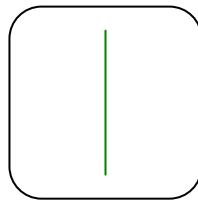
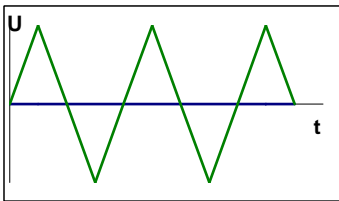
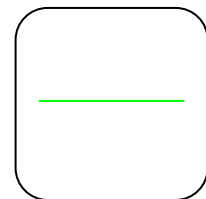
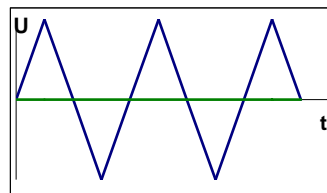
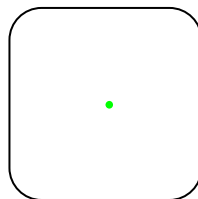
beschichtete Scheibe wird zum Leuchten angeregt. Die Anregung in der Kathodenstrahl oder Elektronenstrahlröhre erfolgt mit einem Elektronenstrahl. Elektronenstrahlen können sehr einfach durch elektrische Felder abgelenkt werden. Wichtig ist die Ablenkung des Strahles in zwei Ebenen(die Ebenen auf der Matscheibe).

Bei der Abbildung sind folgende Spannungen vorhanden:  $U_h$ : die Heizspannung,  $U_b$  die Beschleunigungsspannung und  $U_x$  die Ablenkungsspannung auf der X-Achse. Es fehlt die Ablenkungseinrichtung für die Y-Achse auf die aufgrund der zweidimensionalen Zeichnung verzichtet wird. Die Ablenkung des Elektrodenstrahls ist proportional zur Ablenkungsspannung ( $U_y$ ,  $U_y$ ) und antiproportional zur Beschleunigungsspannung ( $U_b$ ).



Einige auf der Matscheibe entstehende Bilder in Abhängigkeit der Spannungen  $U_x$ (blau) und  $U_y$ (grün)

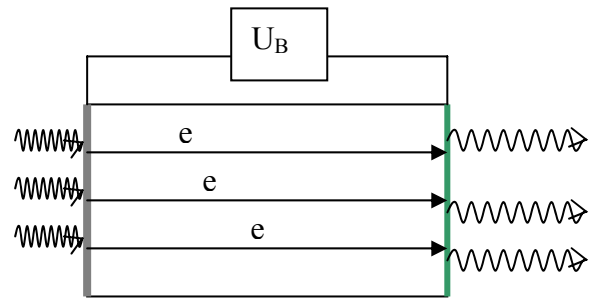
Keine Spannung



### **Bildverstärker**

Bildverstärker sind Elektronenröhren, die in ihrer einfachsten Form aus einer Fotokatode (als Katode) und einem phosphorbeschichteten Leuchtschirm (als Anode) bestehen. Der Raum zwischen diesen beiden flächenhaften Bauteilen ist evakuiert und enthält je nach Bauform weitere Elektroden.

Der Bildverstärker dient dazu, geringste Lichtmengen soweit zu verstärken, dass sie mit dem Auge oder auch elektronischen Bildaufnehmern (z.B. CCD s) registriert werden können. Wenn die Fotokatode in einem Spektralbereich außerhalb des Empfindlichkeitsbereiches des menschlichen Auges empfindlich ist, kann der Bildverstärker ultraviolette bzw. infrarote Strahlung oder Röntgenstrahlen sichtbar machen. In diesem Spezialfall bezeichnet man den Bildverstärker auch als Bildwandler. Mit Hilfe von magnetischen Linsen können die Abschnitte im Bild auch noch vergrößert werden.



### **Photomultiplier – SEV**

Photomultiplier wandeln schwache Lichtsignale (z.B. Photonen ( $\gamma$ ) eines schwachen Lichtblitzes aus einem Szintillator) in einen nachweisbaren elektrischen Impuls um. Das Gerät besteht aus mehreren Teilen. Der erste Teil, die Photokatode, wurde schon vorgestellt. Den zweiten Teil des Photomultipliers stellt der Sekundäre Elektronen Vervielfacher(SEV) dar. Zur Funktion und zum Aufbau des SEV:

Der SEV besteht aus einer Reihe sogenannter Dynoden aus einem Material mit kleiner Austrittsarbeit. Das Potential(Spannung) wird von Dynode zu Dynode um ca. 100 - 200 V gesteigert. Jede Dynode beschleunigt die erzeugten Elektronen bis zur nächsten und fügt durch Sekundäremission ein Vielfaches an weiteren Elektronen hinzu. In einem Photomultiplier befinden sich zwischen 6 bis 14 solcher Dynodenstufen, wodurch eine Verstärkung des Eingangssignals von etwa  $10^4$  bis  $10^7$  erreicht wird.

## **Optik**

Die Optik ist der Bereich der Physik, der nur den Teil des sichtbaren Lichts beschreibt. Man unterteilt die Optik in Strahlenoptik(dient zur Erklärung von der Ausbreitung) und der Wellenoptik(Interferenz und Beugung). Allerdings können beide Gebiete zusammengefasst werden.

### **Grundlagen**

In der Benennung und der Erklärungen der optischen Phänomene soll darauf verzichtet werden eine Unterscheidung zwischen Strahlen und Wellenoptik gemacht werden. Daher fallen sind alle Definitionen nicht hundertprozentig der Lehrmeinung entsprechend. Die gesamte Wellenoptik ist abgeleitet von den normalen Gesetzen für mechanische Wellen.

### **Lichtstrahlen**

Lichtstrahlen bestehen aus einer großen Menge von Lichtwellen(nicht elektromagnetische Wellen). Die Lichtwellen breiten sich in gerade im Raum und radial von einer punktförmigen Lichtquelle weg. Jeder Punkt eines Lichtstrahles kann als Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle(kleinste Einheit einer Lichtwelle) gesehen werden. Lichtwellen schwingen nur in einer Ebene. Jeder Lichtstrahl aus ein und der selben Lichtwelle schwingt in Phase, aber nicht unbedingt in der selben Ebene(mathematisch: Fläche die die Ausbreitungsrichtung beinhaltet). Die Frequenz der Elementarwellen ist das charakteristische Merkmal eines Lichtwelle. Die Amplitude der Welle entspricht der Intensität der Lichtstrahlen.

## Das Huygensche Prinzip für mechanische Wellen

Das Huygensche Prinzip für mechanische Wellen besagt, dass jede kleinste Einheit des Mediums als Ausgangspunkt einer neuen radialen Wellen ergibt. Durch die Summe aller so entstanden Wellenfronten entsteht die Wellenfront der eigentlichen Welle. Diese Elementarwellen haben die Frequenz der ursprünglichen Welle.

## Brechungsindex

Die Brechzahl eines Stoffes gibt das Verhalten eines Lichtstrahles in einem Stoff an. Das Licht hat in unterschiedlichen Medien unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit. Alle Medien haben einen größeren Brechungsindex als das Vakuum. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lichtwellen in den Medien ändern, ergibt sich für die Wellenlänge der Lichtwellen mit konstanter Frequenz ein unterschiedlicher Wert.

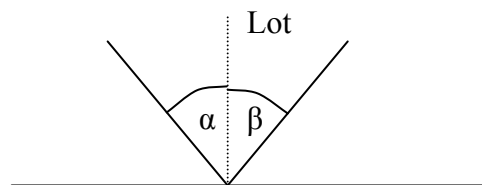
## Reflektion

Für die Reflexion an Körpern gilt:

Einfallswinkel( $\alpha$ ) = Ausfallswinkel( $\beta$ )

Beide Winkel werden immer zum Lot gemessen.

Auch bei unregelmäßigen Oberflächen findet eine Reflexion statt. Das Lot wird immer im dem Punkt bestimmt bei dem die Lichtstrahlen die Oberfläche berühren. Ist die Fläche uneben so entsteht aus parallelen Lichtstrahlen ein diffuses Licht.



Die Reflexion kann mit dem Prinzip von Huygen erklärt werden. An jedem Punkt der Oberfläche auf die ein Lichtstrahl auftrifft, gibt es eine neue Elementarwelle. Die entstehende Wellenfront läuft Entgegen der Einfallenden und mit dem entgegengesetztem Winkel zum Lot.

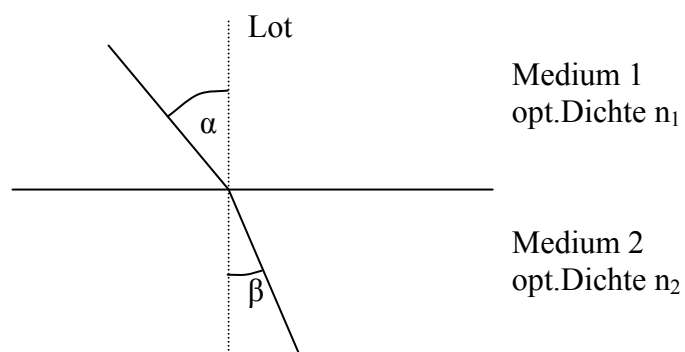
## Brechung

Die Brechung ist ein physikalisches Phänomen, dass beim Übergang einer Lichtwelle von einem Medium in ein anders auftritt. Der „Lichtstrahl“ ändert seine Richtung. Die Brechung ist natürlich von den Stoffen und der Frequenz der Lichtwellen abhängig.

### Brechungsgesetz

Elektromagnetische Wellen, die von einem Medium in ein anderes Medium mit unterschiedlicher optischer Dichte strahlen werden gebrochen.

Für die allgemeine Brechung gilt:



### Gesetz: Brechungsgesetz

Wenn  $\alpha$  der Einfallswinkel zum Lot

$\beta$  der Brechungswinkel/Austrittswinkel zum Lot

$n$  die Brechzahl

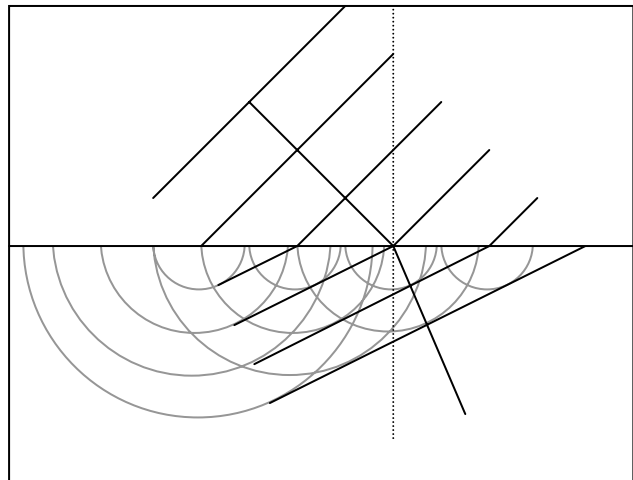
$n_1/n_2$  die Brechungsindexe im Medium 1/Medium2

$c_1/c_2$  die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Medium 1/Medium2

$$\text{gilt: } n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

### Physikalische Grundlage

Bei der Brechung ist die physikalische Grundlage eine Differenz der Wellengeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien. An der Übergangsstelle zwischen den Medien entstehen nach der Huygenschen Prinzip verschiedene Elementarwellen. Da es beim Auftreffen auf der optischen Trennschicht zu einem Laufzeitunterschied der einzelnen Lichtstrahlen kommt, wird das Licht beim Übergang von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium vom Lot weggebrochen. Natürlich wird beim Übergang in ein relativ dichteres Medium das Licht zum Lot hin gebrochen.



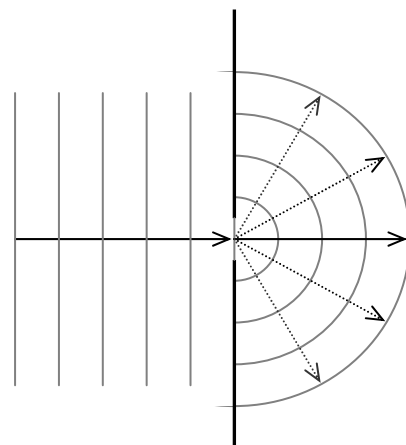
### Totalreflektion

Totalreflektion tritt beim Übergang eines Lichtstrahles in ein relativ dünneres Medium auf. Ab einem bestimmten Winkel wird der gesamte Strahl zurück in das Medium geworfen. Der Winkel, ab dem eine Totalreflektion auftritt, ist der sogenannte **Grenzwinkel**. Totalreflektion wird bei der Brechzahlbestimmung mit dem Refraktormeter benutzt. Allerdings wird sie auch in der modernen Kommunikationstechnik in LWL(Licht-Wellen-Leitern) benutzt.

### Beugung

Beugung bezeichnet das Phänomen, wenn parallel verlaufende Lichtstrahlen anhand eines Spaltes ihre Richtung ändern. Auch an dünnen Schichten mit unterschiedlicher optischer Dichte kann eine Beugung beobachtet werden. Für die Beugung ist es notwendig, dass der Spaltbreite ungefähr im Bereich der zu beugenden Wellen liegt. Auch hier kann das Prinzip von Huygen als Erklärung herangezogen werden.

Die Intensität der gebeugten Lichtstrahlen ist Abhängig vom Beugungswinkel.



## Interferenz

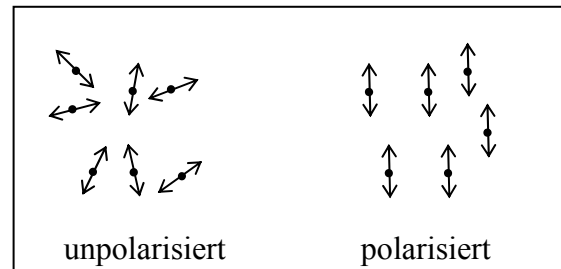
Unter der Interferenz versteht man eine Überlagerung von Wellen. Auch Lichtwellen können interferieren, vorausgesetzt sie wurden mit Reflexion, Brechung oder Beugung aus ein und demselben Wellenzug aufgespalten. Ergibt sich beim Auftreffen von mehreren dieser Wellen einen Laufzeitunterschied und eine damit verbundene Phasendifferenz können die sich Lichtstrahlen schwächen oder ganz auslöschen. Haben die Lichtwellen keine Phasenverschiebung, also einen Gangunterschied mit einem Vielfachen der Wellenlänge, so erhält man eine positive Interferenz, eine Verstärkung

## Polarisation

Eine Welle wird als polarisiert bezeichnet, wenn bestimmte Schwingungsrichtungen der Lichtwelle bevorzugt werden. Man unterscheidet drei Arten der Polarisation: die lineare, die zirkuläre und die elliptische Polarisation. Für die folgenden Geräte ist aber nur die lineare Polarisation wichtig.

Bei der linearen Polarisation schwingen alle Lichtwellen in die selbe Richtung quer zur

Ausbreitungsrichtung. Natürliches Licht schwingt in alle Richtung. Übertragen auf den Charakter der elektromagnetischen Wellen ist die Schwingungsrichtung der Lichtwellen die der elektrischen Schwingung  $\vec{E}$ .



## Polarisation durch Stoffe

Trifft ein Lichtstrahl auf eine optisch anderes Medium so gibt verschiedene Möglichkeiten. Entweder wird der Lichtstrahl reflektiert oder gebrochen. Die Brechung und die Reflexion können Lichtwellen polarisieren. Das reflektierte Licht schwingt vorzugsweise senkrecht zur Einfallsebene, das gebrochene Licht in der Einfallsebene. Die Brechung von Lichtwellen hängt auch von der Polarisation des Lichts ab

Einige Stoffe können das Licht in zwei verschiedene unterschiedlich polarisierte Lichtstrahlen aufteilen(Doppelbrechung). Diese Stoffe werden als anisotrope Stoffe bezeichnet.

Doppelbrechende Strukturen sind viele Kristalle und viele durchsichtige Stoffe unter der Einwirkung von äußeren Kräften(Spannungsdoppelbrechung).

Der Brechungsindex, die optische Dichte und die Fähigkeit zur Polarisation von anisotropen Stoffen ist abhängig von der Richtung des einfallenden Lichtstahles.

## Auflösung

Die Auflösung gibt den Winkel zwischen zwei Lichtstrahlen an, die an ein Gerät zur optischen Verarbeitung gelangen, an.

Der Mensch kann mit dem Auge, bedingt durch den Aufbau, nicht alle Strukturen wahrnehmen. Als Auflösungsvermögen( $f$ ) bezeichnet man den minimalen Abstand den zwei Strukturen haben müssen um sie als unterschiedlich wahrnehmen zu können. Das Auflösung des menschlichen Auges beträgt ca.  $1'$ (Gradminute). Daraus ergibt sich eine Auflösungsvermögen von ca. 1mm auf 3,5m. Allerdings kann der Mensch durch die Verarbeitung der Signale im Gehirn auch regelmäßige Strukturen mit dem Abstandswinkel von einigen Bogensekunden(ca.  $10''$ ) wahrnehmen. [Umrechnung:  $1^\circ = 60'$ ;  $1' = 60''$ ;  $1^\circ = 60' = 3600''$ ]



## Optische Bauteile

Optische Bauteile sind meist durchsichtige Teile die aufgrund ihrer optischen Eigenschaften Lichtwellen oder Lichtstrahlen manipulieren können. Sie sind die Grundlage für viele Arten von optischen Geräten. Die wichtigsten sollen kurz vorgestellt werden.

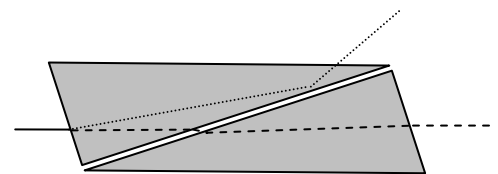
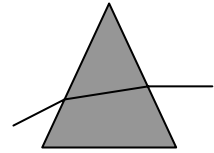
### Prismen

Prismen bestehen aus durchsichtigen Materialien. Sie haben eine dreieckige Grundfläche. Im Prisma wird ein Lichtstrahl zweimal gebrochen.

Prismen können, da die Brechung des Lichts abhängig von der Lichtwellenlänge ist dazu benutzt werden um Licht in unterschiedliche Wellenlängen zu zerlegen. (Lichtzerlegung). Durch die Totalreflektion können in Prismen Lichtstrahlen umgelenkt werden.

Wenn Prismen aus anisotropen Stoffen bestehen, kann durch sie polarisiertes Licht erzeugt werden. Solche Prismen können als Polarisationsfilter genutzt werden.

[Im Bild: durch zwei aneinander befestigte Prismen wird ein Lichtstrahl in einen „ordentlichen“ (Austritt nach oben; Schwingung in der Einfallsebene) und einen außerordentlichen (Austritt fast gerade; Schwingung senkrecht zur Einfallsebene) Lichtstrahl zerlegt.]

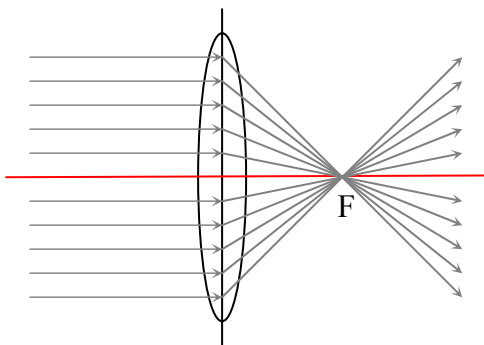


### Linsen

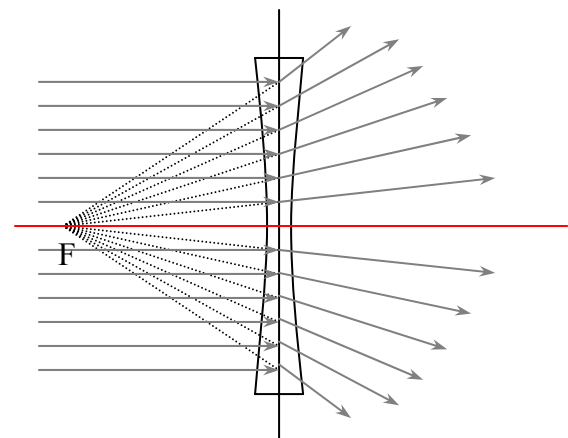
Linsen sind die einfachsten optischen Bauteile. Linsen bei denen die Begrenzungsflächen Teil einer Kugel sind werden als sphärische Linsen bezeichnet. Beim Durchlaufen der Linse wird ein Lichtstrahl zweimal gebrochen. Die Brechung an den Oberflächen wird für die Rechnung durch die Brechung zwei Hauptebenen ersetzt. Bei dünnen Linsen (Krümmradius  $\gg$  Dicke) kann die Brechung durch die Linse durch die an einer Hauptebene ersetzt werden.

### Linsentypen

Es gibt im Grunde zwei verschiedene Linsenarten. Konkavlinen haben die Fähigkeit parallele Lichtstrahlen in einem Punkt zu bündeln. Konkave Linsen streuen parallele Lichtstrahlen. Der Brennpunkt (F) ist der Punkt entlang der optischen Achse an dem sich alle Lichtstrahlen oder deren Verlängerungen treffen. Bei Konkavlinen liegt der Brennpunkt hinter der Linse. Konkavlinen haben einen Brennpunkt vor der Linse.



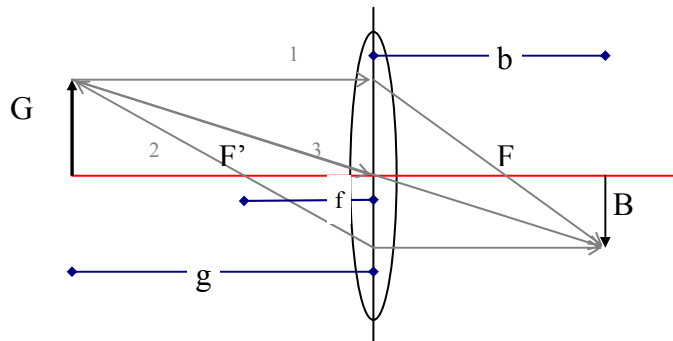
Konkavlinse mit Lichtstrahlverlauf



Konkavlinse mit Lichtstrahlverlauf

## Linsensbildentstehung

Bei der Konstruktion eines Linsenbildes werden mindestens zwei von den drei Hauptstrahlen betrachtet. Betrachtet wird der Parallelstrahl[1](parallel zur optischen Achse), der Brennpunktstrahl[2](geht durch den Punkt  $F'$  der optischen Achse entgegen den Brennpunkt) und der Mittelpunktstrahl[3](geht durch den Schnittpunkt der optischen mit der Linsenachse). Die Entfernung der Linsenachse zum Gegenstand[G] ist die Gegenstandsweite[g] auf der optischen Achse, die zum Abbild[B] die Bildweite[b], ebenfalls auf der optischen Achse. Die Entfernung zum Brennpunkt[F], die Brennweite[f] ist zu dem realen Brennpunkt und zum imaginären Brennpunkt[F'] gleich.



Für das Verhältnis von Abbild und Gegenstand lässt sich durch die Abbildungsgleichung folgender Zusammenhang herleiten:

$$\text{Es gilt: } \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Abbildungsfehler können wegen verschiedener Fehler entstehen:

1. Wie jedes Material brechen Linsen unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich stark. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Brennpunkte für unterschiedliche Wellenlängen (→ chromatische Aberration).
2. In den Randbereichen der Linse werden die Lichtstrahlen stärker gebrochen als in der Mitte der Linse (→ Sphärische Fehler)
3. Die Ränder der Bilder werden durch dicke Linsen unscharf (→ Bildfeldwölbung)
4. Betrachtet man ein Gitternetz durch eine Linse so krümmen sich die Geraden meist am Rand (→ Verzeichnung)

Die Bilder von Sammellinsen lassen sich durch das Verhältnis zwischen Bild und Gegenstandsweite charakterisieren. Für  $2f > g > f$  ist der Abbildungsmaßstab größer als eins. Daraus folgt, dass das Bild vergrößert wird. Daraus erhält man ein reelles aber umgekehrtes Bild.

Ist die Gegenstandsweite kleiner als die Brennweite der Linse so erhält man ebenfalls eine Vergrößerung ohne eine Umkehrung, allerdings ist das Bild ein virtuelles Bild, das heißt die Bildweite liegt nicht auf der Bildseite sondern auf der Gegenstandsseite.

## Optische Gitter, Einfach- und Doppelspalte

Das Grundphänomen einer Beugung am Einfachspalt ist bereits gezeigt worden. Beim Doppelspalt oder optischen Gitter findet ein solcher Effekt an jedem Spalt statt.

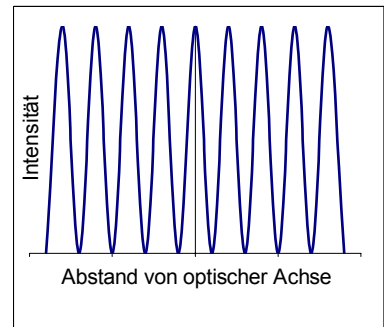
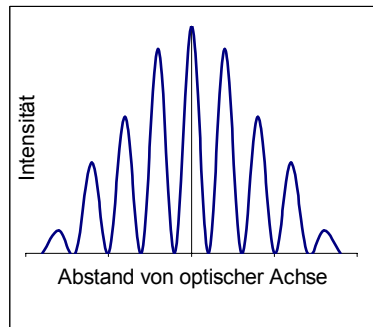
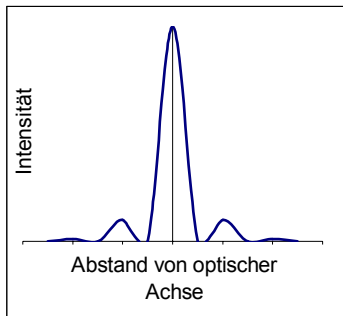
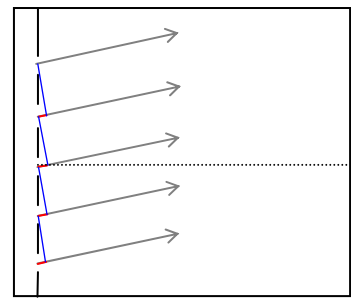
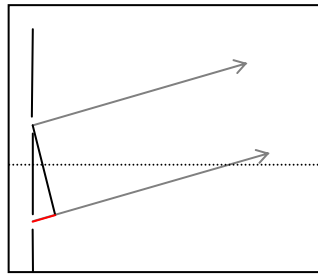
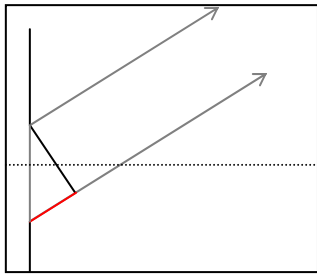
Voraussetzung ist eine Spaltbreite im Bereich der Wellenlängen.

An einem Schirm der nach dem optischen Gitter, dem Einfach- oder dem Doppelspalt kann man eine Intensitätsverteilung durch eine Interferenz der austretenden Lichtwellen beobachten. Diese sind abhängig von der Wellenlänge, der Spaltbreite und dem Abstand der Spalte, der viel größer als die Spaltbreite sein muss. Alle Interferenzbilder lassen sich durch einen Laufunterschied erklären. [Abbildung: Gepunktet: Optische Achse]

Einfachspalt

Doppelspalt

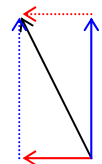
Gitter



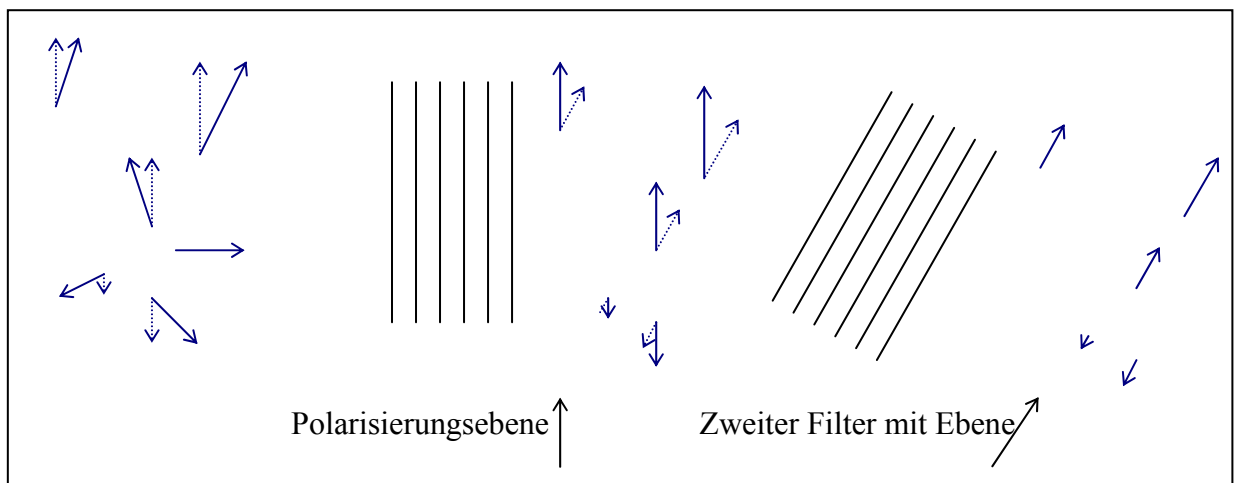
## Polarisationsfilter

Wie schon bei den Prismen erwähnt kann eine Polarisierung von Licht durch doppelbrechende Strukturen oder Prismen herbeigeführt werden. Ein technisch einfacher Weg ist die Polarisierung von Licht mit sogenannten Polarisationsfiltern. Polarisationsfilter haben, wie optische Gitter, Spalte, die allerdings nicht im Bereich der Wellenlänge liegen. Polarisationsfilter können also entweder doppelbrechende Strukturen oder Gitter(regelmäßige Strukturen) sein. Jeder Polarisationsfilter wirkt sich auf die Intensität der Lichtstrahlen aus.

Zur Funktion der Polarisierungsgitter: Nichtpolarisiertes Licht schwingt in allen Ebenen. Jede Schwingung (schwarz) kann durch zwei unabhängige Schwingungsvektoren (rot und blau) beschrieben werden. Mindestens einer sollte in der Polarisierungsebene des Filters liegen.



Der Ablauf der Polarisation in der Grafik: nur die Schwingungsvektoren, die durch den Filter kommen sind gepunktet dargestellt:



Dargestellt ist die Folge von zwei Polarisierungsfiltern. Die Intensität des Lichtstrahls entspricht der Summe aller Schwingungsvektoren. Geht man davon aus, dass unpolarisiertes Licht Schwingungen in alle Richtungen zu gleichen Teilen beinhaltet ist die maximale Intensität nach einer Polarisierung höchstens 50%. Durch eine Hintereinanderschaltung von zwei Polarisierungsfiltern, kann die durchgelassene Intensität der zwischen 50% und 0% variiert werden (Prinzip der Sonnenbrille).

## Optische Geräte

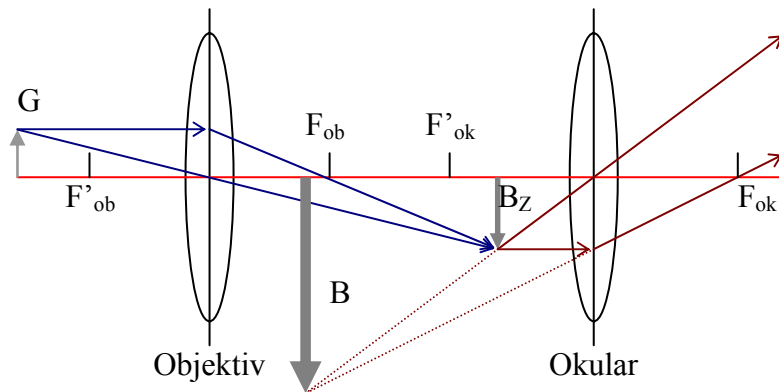
Optische Geräte können für verschiedene Aufgaben verwendet werden. Einerseits ermöglichen sie anhand der optischen Eigenschaften eines Körpers, diesen genauer zu untersuchen, andererseits dienen sie zum Messen von den optischen Eigenschaften.

### Mikroskope

Mikroskope bieten dem Menschen die Möglichkeit Strukturen, die kleiner sind als das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges sind, zu untersuchen.

Alle Mikroskope bedienen sich zur Bilderzeugung der folgenden optischen Apparatur.

Das optische Bild des Gegenstandes G wird durch ein Objektiv vergrößert. Das entstehende Bild ( $B_Z$ ) ist ein reelles, seitenverkehrtes Bild und kann mit verschiedenen anderen optischen Geräten weiterverarbeitet werden. Um das so entstandene Bild zu betrachten wird ein



Okular benötigt. Das Okular erzeugt aus dem reellen Bild ein virtuelles und im Bezug auf  $B_Z$  nicht gespiegeltes Bild (B). Die Objektive und Okulare bestehen meistens nicht nur aus einer Linse, sondern aus mehreren. Dies hat den Vorteil, dass nicht so dicke Linsen benutzt werden müssen und die Fehler in der Bildentstehung durch Linsen zum größten Teil minimiert werden können.

Wie das menschliche Auge hat auch jedes optische Gerät ein bestimmtes Auflösungsvermögen, eine Auflösungsgrenze. Für die Auflösungsgrenze eines Mikroskops

$$\text{gilt: } \delta = 0,61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin \omega}$$

In dieser Gleichung ist  $\delta$  die Auflösungsgrenze (Abstand zweier Strukturen),  $\lambda$  die Wellenlänge der genutzten Strahlen,  $n \sin(\omega)$  die numerische Apparatur, die vom Öffnungswinkel des Objektivs ( $\omega$  ist der Halböffnungswinkel, also der Winkel zum Lot oder der halbe Öffnungswinkel) und der Brechzahl ( $n$ ) des Mediums zwischen Objekt und

Objektiv. Hochauflösende Mikroskope mit großer Numerischer Apparatur können bis  $\delta = \frac{\lambda}{2}$

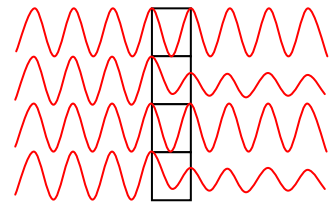
auflösen. Durch eine Immersionsflüssigkeit (Stoff mit hoher optischer Dichte  $n$ , der zwischen Objektiv und Objekt aufgebracht wird) kann einerseits die Wellenlänge und andererseits die Brechzahl ( $n$ ), also der Ausdruck  $\lambda/n$  verändert werden.

Zur besseren Ansicht können die im Objektiv entstandenen Bilder durch spezielle Spiegel oder Prismen durch zwei oder mehrere Okulare oder bildverarbeitende Geräte aufgeteilt werden.

Die Art der Bildverarbeitung ist bei allen Mikroskopen nahezu der selbe. Allerdings unterscheidet man eine Vielzahl von Mikroskopen bei denen sich die Art der Bildentstehung zum Teil stark unterscheidet. Die wichtigsten sind unten erklärt.

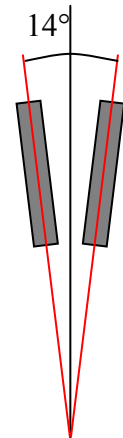
### ***Kontrastmikroskope***

Kontrastmikroskope sind die Mikroskope bei denen das Bild durch ein Kontrast im Objekt entsteht. Durch verschiedene Strukturen wird Licht(einer bestimmten Wellenlänge) unterschiedlich stark absorbiert. Nach der Art der Entstehung sind die entstandenen Bilder Kontrastbilder. Der Kontrast im Objekt kann durch verschiedenen Färbungen verstärkt werden. Weil das Objekt durchstrahlt werden muss um einen Kontrast zu erhalten benötigt man für die Kontrastmikroskopie ein sehr dünnes Präparat.



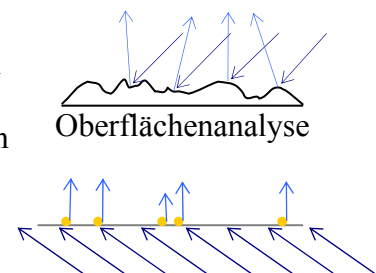
### ***Stereomikroskope***

Stereomikroskope besitzen im Vergleich zu anderen Mikroskopen nicht einen gemeinsamen Lichtweg für beide Okulare, sondern haben für beide Okulare einen getrennten Lichtweg. Durch die Bildverarbeitung im menschlichen Gehirn kann das so entstandene Bild als dreidimensionales Bild gesehen werden. Stereomikroskope erzeugen räumliche, seitenrichtige und aufrechte Bilder. Zu den oben genannten Komponenten der Bildverarbeitenden Apparatur kommt bei Stereomikroskopen in jeder Einheit ein Umkehrprisma, das die entstandenen Bilder spiegelt, also die Darstellung räumlich richtig erscheinen lässt. Die optischen Achsen der optischen Einheiten liegen auf einer Ebene und haben meistens einen Winkel von  $14^\circ$  zueinander. Dieser Winkel darf nur geringfügig abweichen, da sonst die Verarbeitung der Bilder im Gehirn nicht stattfinden kann.



### ***Dunkelfeldmikroskope***

Dunkelfeldmikroskope sind für die Darstellung von reflektierten Lichtstrahlen zu gebrauchen. Hierbei wird das Objekt nicht von unten sondern von der Seite angestrahlt. Hier werden nur die von den Strukturen reflektierten Lichtstrahlen wahrgenommen. Hierfür ist ein dünnes Objekt nötig. Wird das Objekt von oben bestrahlt können Dunkelfeldmikroskope zur Oberflächenanalyse eingesetzt werden.



### ***Lumineszenzmikroskope***

Lumineszenzmikroskope können zur Betrachtung von Strukturen genutzt werden, die die Fähigkeit haben, auf Anregung Licht im sichtbaren Bereich zu emittieren. Alternativ können Präparate auch mit einem speziellen lumineszierenden Farbstoff angefärbt werden. Bei der fast allen Lumineszenzmikroskopen wird als anregende Strahlung ein UV-Licht benutzt. Neuere Farbstoffe können allerdings auch durch normales Licht angeregt werden. In der Zelle können mit einem Lumineszenzmikroskop Strukturen mit Kohlenstoffdoppelbindungen und Aromaringen auch ohne Färbung dargestellt werden. Diese Strukturen haben unter anderen die Fähigkeit Licht im sichtbaren Spektrum bei einer Anregung mit UV-Strahlen zu emittieren.

### ***Polarisationsmikroskope***

Das Polarisationsmikroskop bestreut ein Objekt mit linear polarisiertem Licht. Nach dem Objekt steht in der Regel ein zweiter Polarisationsfilter orthogonal zum ersten. Der Effekt dieser Schaltung ist ohne Objekt nicht sinnvoll, da kein Lichtstrahl das Objektiv erreichen wird. Allerdings gibt es zwei Stofftypen die man in einem Polarisationsmikroskop beobachten kann.

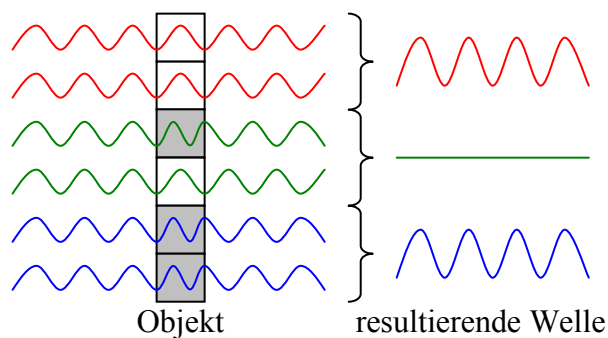
1. Anisotrope Stoffe: Strukturen in den Objekten, die anisotrope Stoffe enthalten wirken als dritter Polarisationsfilter zwischen den fest eingebauten. Allerdings ist die Doppelbrechung, also die Polarisation von Licht bei anisotropen Stoffen, bei diesen Stoffen abhängig vom Lichtweg durch den Stoff. Durch eine Drehung des Objekts wird also der optische Charakter dieser Stoffe verändert. Alternativ zu anisotropen Stoffen können auch Strukturen mit anisotropen Charakter, meistens regelmäßige Strukturen (z.Bsp.: Zellmembranen), einen ähnlichen Effekt auf linear polarisiertes Licht haben. Diese Strukturen sind auch unter dem Polarisationsmikroskop zu erkennen.
2. Optisch aktive Stoffe: Bestimmte Stoffe drehen die Schwingungsrichtung des durch sie hindurchgehenden Lichtes. Der Winkel der Drehung des polarisierten Lichts ist immer abhängig von der Strecke durch den optisch aktiven Stoff, bei Lösungen dieser Stoffe auch von der Konzentration. Zum Beispiel dreht eine Traubenzuckerlösung mit der Konzentration von einem Gramm pro Milliliter  $6,6^\circ$  auf einem Zentimeter. Die Drehung ist eine Rechtsdrehung, wenn man entgegengesetzt der Ausbreitungsrichtung blickt. Der Winkel der Drehung ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts und der Temperatur der Lösung

Fast alle isotrope Stoffe können zur Polarisation angeregt werden, allerdings ist dazu ein sehr starkes magnetisches Feld nötig.

Der Lichtweg bei Polarisationsmikroskope kann entweder durch das Objekt gehen oder die Objekte werden mit polarisiertem Licht bestrahlt.

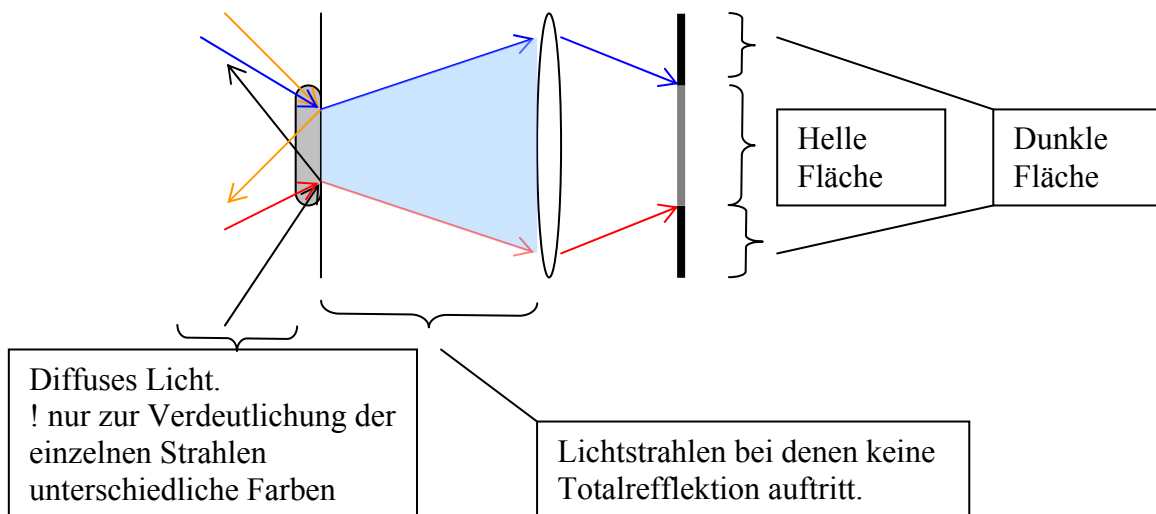
### **Phasenkontrastmikroskope**

Das Phasenkontrastmikroskop stellt Stoffe mit unterschiedlicher optischer Dichte als Kontrast dar. Für die Phasenverschiebung können verschiedene Brechzahlen in den Stoffen verantwortlich gemacht werden. Die Lichtgeschwindigkeit in den verschiedenen Medien ist unterschiedlich und in erster Linie abhängig von dem Brechungsindexen der Stoffe. Da die Frequenz der Lichtwellen konstant ist



kann es beim Durchlaufen zweier Lichtstrahlen durch Stoffe mit unterschiedlicher Brechzahl zu einer Phasenverschiebung kommen. Werden die beiden Lichtstrahlen nach dem Durchlaufen wieder zusammengeführt, so entsteht eine Interferenz und damit ein wahrnehmbarer Intensitätsunterschied im Vergleich zur normalen Intensität des Lichts. In der Darstellungen sind nur drei Fälle gezeigt: zwei konstruktive und eine destruktive Interferenz. Allerdings sind Als resultierende Intensität alle Intensitäten zwischen der doppelten Anfangsintensität(konstruktive Interferenz) und keiner Intensität(bei komplett destruktiver Interferenz) möglich.

### **Refraktometer**

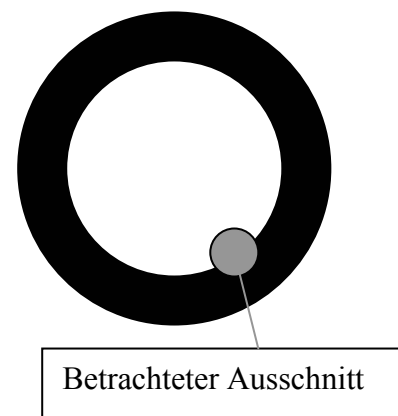


Das Abbe-Refraktometer ist ein Gerät mit dem sehr einfach die Brechzahl einer Flüssigkeit bestimmt werden kann. Das Prinzip beruht auf der Totalreflektion.

Das Refraktormeter nutzt insog. diffuses Licht, das mit Hilfe einer aufgerauten Scheibe erzeugt wird. Ein diffuses Licht hat keinen Ursprung und keine Richtung. Lichtstrahlen „fallen“ in alle Richtungen, auch durch den zu untersuchenden Stoff. Je nach Einfallswinkel zu unserem Stoff werden die Lichtstrahlen reflektiert oder gebrochen. Die Summe der gebrochenen Lichtstrahlen ist in der oberen Abbildung als Fläche dargestellt. Danach können alle gebrochenen Lichtstrahlen mit einer Sammellinse auf eine Fläche projiziert oder mit dem Auge angesehen werden. Man erhält folgendes Bild:

Wir erhalten einen hellen Kreis in der Mitte umgeben von einem dunkeln Kreis. Weshalb einen Kreis:

Die Abbildung oben ist ein Querschnitt, da wir nicht mit zweidimensionalen Apparaturen arbeiten. So erhalten wir nicht wir keinen „Strich“ sondern einen Kreis. Alle Lichtstrahlen, die den hellen Kreis erzeugen wurden vollständig gebrochen. Der dunkle Kreis ist der Bereich, an den die reflektierten Lichtstrahlen fallen würden. Also gibt uns der Übergang zwischen hellem und dunklem Kreis Aufschluss über einen Grenzwinkel. Der Grenzwinkel entsteht beim Übergang in ein optisch dickeres Medium. In diesem Fall ist das dünnere Medium die optische Anordnung nach der Probe. Anhand des Grenzwinkels lässt sich nun die Brechzahl der Probe ausrechnen.



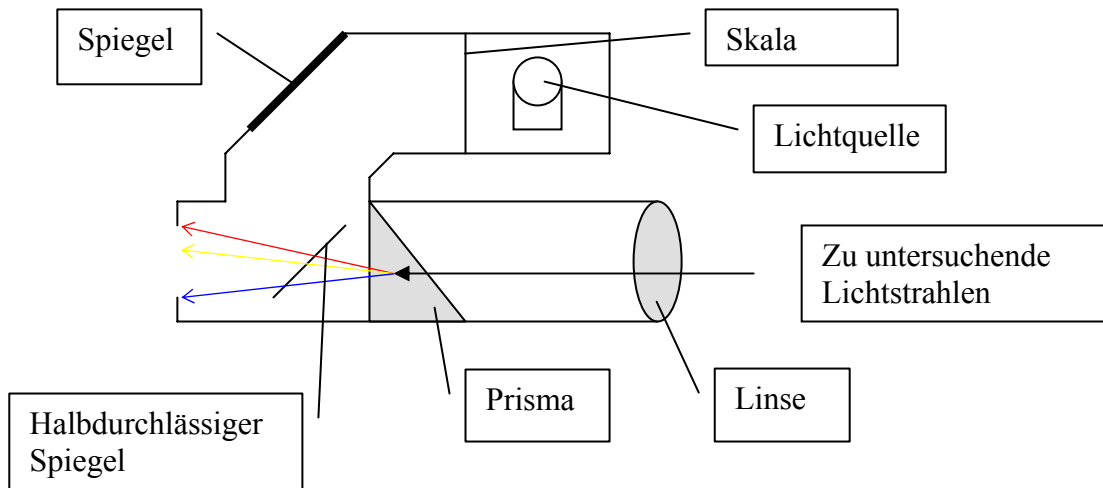
Durch Drehen der optischen Anordnung kann der Übergang zwischen Heller und Dunkler Fläche ermittelt werden und anhand einer Skala der Brechungsindex unserer Probe abgelesen werden. So spart man sich das rechnen (komplizierte Rechnung mit mindestens 6 Anderen Brechungsindex und einer Überschneidung).

## Spektralanalyse

Die Spektralanalyse kann einseinstens zur qualitativen oder zur quantitativen Untersuchung eines Unbekanten Stoffes eingesetzt werden. Grundlage der qualitativen Stoffuntersuchung ist das Auftreten einer Wellenlänge. Für die quantitative Untersuchung eins Stoffes muss berücksichtigt werden, dass die Intensität der emittierten Strahlen proportional zur Konzentration des Stoffes ist. Da das menschliche Auge zwar durchaus in der Lage ist

verschiedene Wellenlängen zu unterscheiden, aber nicht ihre absolute Intensität bestimmen kann, ist die quantitative Untersuchung eines Stoffes nur technisch möglich. Für beide Arten der Spektralanalyse ist das aufspalten des Lichts in seine verschiedenen Wellenlängen nötig. Dies kann entweder mit einem Prisma (nicht lineare Lichtaufspaltung) oder mit einem optischen Gitter(lineare Lichtaufspaltung) bewerkstelligt werden. Meistens wird das Licht in den Geräten durch ein Prisma aufgespaltet.

### **Spektroskop**



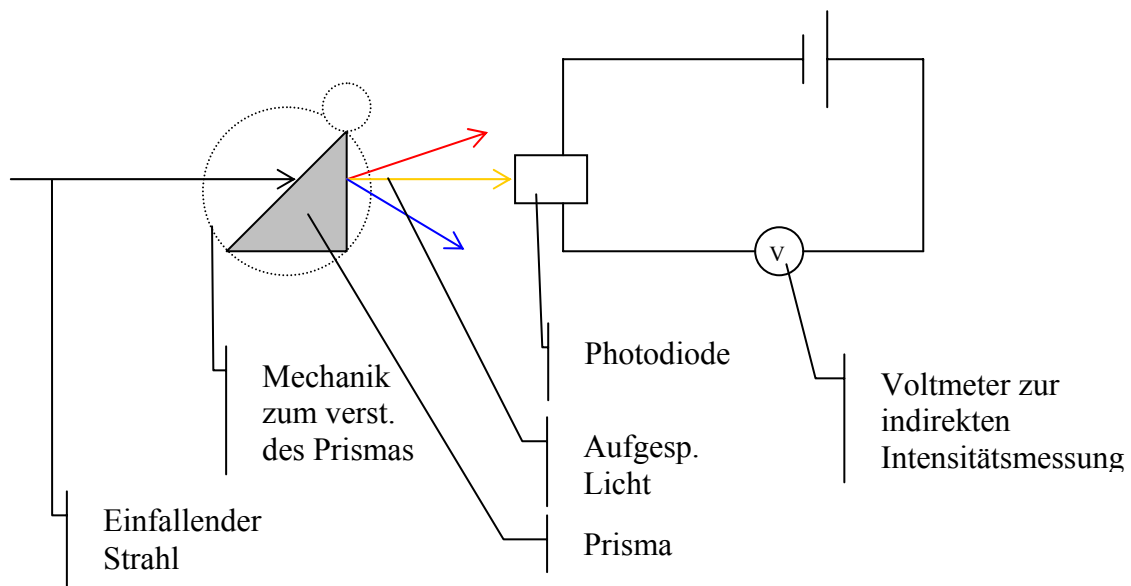
Durch eine Linse wird ein einfallender Lichtstrahl gebündelt und durch ein Prisma, durch die unterschiedliche Brechung verschiedener Wellenlängen, aufgespaltet. Fällt nur Licht einer gewissen Wellenlänge durch das Spektroskop so sind sogenannte Spektrallinien zu erkennen. Anhand der verschiedenen Spektrallinien kann man die Wellenlänge mit einer eingblendeten Skala ablesen. Die Skala wird mit einem halbdurchlässigem Spiegel auf die entstandenen Spektrallinien projiziert.

Mit dieser Vorrichtung kann allerdings nur die Qualität des einfallenden Lichts untersucht werden. Für eine quantitative Untersuchung der Lichtstrahlen muss auf die Technik(Photodiode) zurückgegriffen werden, da das menschliche Auge bestimmte Lichtwellen besser wahrnimmt als andere und so eine Bestimmung mit dem Auge nicht möglich ist.

### **Spektrometer**

Das Spektrometer dient zur quantitativen Lichtestimmung. Es kann entweder direkte Konzentrationen von Stoffen bestimmen oder es liefert ein Wellenspektrum(s.o.). Die Funktionsweise ähnelt dem des Handspektroskops. Allerdings ist das Prisma auf einer Mechanik drehbar. Die Intensität der Wellenlängen wird dann von einer Photodiode ermittelt. Anhand der Stellung des Prismas kann errechnet werden welche Wellenlänge in die Photodiode fällt. Anhand einer Widerstandsänderung der Photodiode kann die Intensität des einfallenden Lichts errechnet werden. Das Emissionsspektrum stellt die Intensität des Lichts in Abhängigkeit der Wellenlänge dar. Somit liefert das Gerät ein Emissionsspektrum. Die Abbildung oben zeigt die Mechanik stark vereinfacht. Für exakte Messungen muss das Prisma bis auf mehrere 1/1000 Grad exakt eingestellt werden. Anstatt dem Prisma kann im Spektrometer auch ein Gitter verwendet werden. Anstatt das Prisma (oder Gitter) zu drehen, wird geräteabhängig auch die Photodiode auf einer Kreisbahn um das Prisma bewegt.





Kann ein Gerät(Bsp: Flammenphotometer) nur eine gewisse Anzahl an Stoffen nachweisen, so können die Komponenten mit einer oder auch mehrerer Photodioden auch fix im Gerät eingebaut sein.

## Die Physik der Körper

Die Physik beschäftigt sich mit der Erklärung verschiedener Naturphänomene, aber auch mit der Erklärung der alltäglichen Gegebenheiten. Die makroskopische und mikroskopische Beschreibung von Materie gehört also unweigerlich zu den Aufgaben der Physik. Besonderer Augenmerk fällt hierbei auf die Analyse von Gasen und Festkörpern. Da viele Gesetze, die für Gase gelten ebenfalls auf flüssige Strukturen anwendbar sind, fällt eher wenig Aufmerksamkeit auf die flüssigen Stoffe.

Das Verhalten der kleinsten Teilchen zum Beispiel elektrische oder magnetische Felder untereinander aufzubauen ist auch bei den zusammengesetzten Teilchen zu beobachten und auf die Wirkungen der kleinsten Teilchen zurückzuführen. Die Teilchenphysik beschäftigt sich mit dem Verhalten der kleinsten Teilchen. Obwohl schon eine Reihe kleinerer Teilchen bekannt ist, reicht es in diesem Zusammenhang die Wechselwirkungen der Atome zu untersuchen. Viele Stoffe kommen, unabhängig vom Aggregatzustand, als Bindungen mehrerer Atome, so genannter Moleküle, vor.

## Die Bindungen der Atome

Generell gehört die Lehre der Atombindungen nicht unbedingt zur normalen Physik. Allerdings sind die Grundlagen auch hier wichtig. Kurz die Vorstellung der verschiedenen Bindungsmotiven und der wichtigen physikalischen Eigenschaften:

- **Die Ionenbindung:** Sie ist die Folge unterschiedlicher Elektronenaffinitäten. Ein Atom gibt ein oder mehrere Elektronen an ein anderes ab. Der Ladungsunterschied zwischen den entstehenden Ionen ist immer ein vielfaches der Elementarladungen. Zwischen den Ionen entsteht nun ein elektrisches Feld, das in erster Linie für die Anziehungskraft der Ionen verantwortlich ist. Alle bekannten Ionen sind bei Normalzustand fest und bilden eine regelmäßige dreidimensionale Anordnung, das Ionengitter. Nach außen hin haben die Gitter eine neutrale Ladung. Neben der Elektronenaffinität spielt die Ionisierungsenergie für die Bildung der Ionen eine Rolle. Das relative Verhältnis der beiden messbaren Werte wird als

- Elektronegativität bezeichnet. Nur bei hoher Elektronenaffinitätsdifferenz und geringer Elektronenaffinität des Elektronendonators ergibt sich eine Ionenbindung.
- *Die kovalente Bindung:* Sie ist, bildlich gesprochen, eine Bindung durch das Mitbenutzen von Elektronen anderer Atom. Sie bildet sich zwischen Atomen mit niedriger Elektronenaffinität und vergleichsweise hoher Ionisierungsenergie. Sie ist das Resultat des Bestrebens der Atome einen möglichst geringen Energiezustand einzunehmen. Kovalent gebundene Atome bilden Moleküle. Viele bekannten Stoffe sind aus den Molekülen aufgebaut. Das oder die bindenden Elektronenpaare, oder Orbitale, befindet sich zwischen den verbundenen Atomen. Über den Aggregatzustand der Stoffe bestimmen die intermolekularen Wechselwirkungen. Allgemein kann man eine Aussage über den Aggregatzustand anhand der Größe der Moleküle machen, diese Trifft aber nicht auf alle Moleküle zu.
  - *Die Metallbindungen:* Ähnlich wie die kovalenten Bindungen entstehen die Metallbindungen zwischen Atomen mit vergleichsweise kleiner Elektronenaffinität. Allerdings sind die Ionisierungsenergien der Metalle auch relativ gering. Es bilden sich Komplexe, in denen die bindenden Elektronen delokalisiert, also nicht zwischen zwei speziellen Atomen fixiert sind. Metallisch gebundene Atome sind meistens fest und zeichnen sich durch eine regelmäßige Struktur, ähnlich den Ionen, und einer Leitfähigkeit wegen der freien Elektronen aus.
  - *Intermolekulare Wechselwirkungen:* Zwischen Molekülen können verschiedene sich andere Wechselwirkungen ausbilden. Die schwächsten dabei sind die Gravitationskräfte zwischen den Molekülen. Relativ starke intermolekulare Wechselwirkungen sind elektrostatische Wechselwirkungen. *Wasserstoffbrücken* und *Dipolkräfte* entstehen zwischen polaren Molekülen oder Teilen von diesen. Wasserstoffbrücken sind für den Aggregatzustand des Wassers verantwortlich. Flüssige kleine Moleküle bilden meistens Wasserstoffbrücken oder Dipolkräfte. Neben den elektrostatischen Wechselwirkungen findet man noch die elektrodynamischen Wechselwirkungen, durch die van der Waals-Kräfte zusammengefasst. Sie entstehen durch eine kurzzeitige Ladungsverschiebung im Molekül, bedingt durch die Wahrscheinlichkeit oder durch äußere Einflüsse, speziell elektrische oder magnetische Felder. Die van der Waals-Kräfte bilden sich besonders zwischen großen Molekülen aus. Dabei ist auch die Oberfläche der Moleküle entscheidend.

## **Die kinetische Gastheorie**

Die kinetische Gastheorie beschreibt die Eigenschaften eines idealen Gases. Sowohl die makroskopische als auch die mikroskopische Beschreibung beziehen sich immer auf ideale Gase, da nur diese den physikalischen Gesetzen vollkommen Folge leisten. Alle auf der Erde bekannten Gase entsprechen aber nicht der Modellvorstellung des idealen Gases. Dies gilt insbesondere für zusammengesetzte Gase. Auf sie sind zwar die Gesetze anwendbar, aber nicht hundertprozentig exakt.

## **Mengenangaben – Die Avogadro-Zahl**

Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Gases gehört die Menge an Teilchen. Diese wird in fast allen Naturwissenschaften entweder als normale Zahl oder speziell bei Atomen als „mol“ angegeben. Ein „mol“ ist mit der Atomanzahl von 0,012 kg von dem Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$  definiert. Aus Experimenten ergibt sich die Anzahl der Atome. Die Avogadro-Zahl ( $N_A$ ) ergibt sich aus dem Zusammenhang.

$$n(12\text{ g}) = \frac{N}{N_A} = 1\text{ mol} \quad \text{mit} \quad N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$$

## Ideales Gasgesetz

Das allgemeine Gasgesetz setzt die messbaren Eigenschaften eines Gases in Relation. Zu den messbaren Eigenschaften gehören der absolute Druck(p), das Volumen(V) und die absolute Temperatur(T). Durch Experimente kann man den Zusammenhang aufstellen:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

In einem abgeschlossenen System hängt also der Druck vom Volumen und der Temperatur ab und natürlich auch umgekehrt. Dieses Phänomen ist die Folgerung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik. Nimmt man noch die letzte messbare Größe, die Stoffmenge(n in mol) hinzu ergibt sich eine Naturkonstante, die allgemeine Gaskonstante(R):

$$\frac{p \cdot V}{T \cdot n} = R \Rightarrow p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Letztere Gleichung ist das allgemeine Gasgesetz. Die allgemeine Gaskonstante ist das Produkt der Boltzmann-Konstante(k) und der Avogadro-Zahl( $N_A$ ). Es gilt:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \Rightarrow R = 8,31 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

Die Boltzmann-Konstante gibt die Energie eines Teilchens bei einer absoluten Temperatur von 1K an, während die Gaskonstante die Energie eines mols angibt.

Aus dem allgemeinen Gasgesetz ergibt sich mit dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik die Volumenarbeit( $p\Delta V$ ) eines Gases, die bei konstantem Volumen null ist.

## Druck, Temperatur und Geschwindigkeit

Aus dem Ausdruck der kinetischen Gastheorie lässt sich schon erahnen, dass die Energie, durch Druck und Temperatur bestimmt, eines Gases durch eine Geschwindigkeit definiert ist. Mikroskopisch betrachtet ergibt sich allerdings der Druck eines Idealen Gases durch die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen, die sich durch die Temperatur des Gases ergibt. Die Herleitung erfolgt über die allgemeinen Regeln der Mechanik:

### Druck und Geschwindigkeit

Jedes Teilchen mit einer gerichteten Geschwindigkeit( $\vec{v}$ ) und einer Masse(m) hat einen gerichteten Impuls( $\vec{p}$ ). In einem Würfel der Kantenlänge L befindet sich unser Teilchen. Die auf das Teilchen wirkenden Kräfte sind zu vernachlässigen. Geht man nun davon aus, dass wenn das Teilchen gegen eine Wand des Würfels stößt ein elastische Stoß stattfindet so negativiert sich nur eine Geschwindigkeitskomponente( $v_x$ ). Die damit verbundene Impuls Veränderung ist der Impuls, den die Wand vom kollidierenden Teilchen erhält. Für die Wand erfährt diese einen positiven Impuls von  $\Delta \vec{p} = 2mv_x$  ( $\vec{p}$  steht hier für den Impuls, p für den Druck). Wenn sich nun das Teilchen innerhalb des Würfels von der einen Seite zu anderen bewegt überwindet es eine Strecke von 2L in der Zeit  $\Delta t = \frac{2L}{v_x}$ . In dieser Zeit wirkt auf die

Wand also der oben erwähnte Impuls. Nach dem newteschen Gesetzen ist die Änderung eines Impulses pro Zeiteinheit eine Kraft( $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ ). Für die Kraft, die zur Zeiteinheit  $\Delta t$  auf die

Wand wirkt ergibt sich also der Zusammenhang.  $\vec{F} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$ . Da der Druck(p) als

Kraft pro Fläche definiert ist kann für den Druck angenommen werden:  $p = \frac{F_x}{L^2} = \frac{mv_x^2}{L^3}$ .

Dieser Zusammenhang gilt für den Druck den ein Teilchen auf die Wand des Würfels ausübt. Nimmt man nun an, dass in einem Gefäß nicht ein, sondern die Anzahl N Teilchen sind, deren

mittlere Geschwindigkeit sich aus den Geschwindigkeitskomponenten der Achsen zusammensetzt ( $\bar{v}^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \Rightarrow v_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2$ ), folgt daraus:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m N \bar{v}^2}{L^3} \quad \text{mit } „L^3 = V“ \quad \text{und } „m N_{(\text{Anzahl in 1})} = n_{(\text{Anzahl in mol})} m N_A = n M_{(\text{Molmasse})}“$$

$$p = \frac{1}{3} \frac{n M \bar{v}^2}{V} \Rightarrow pV = \frac{1}{3} n M \bar{v}^2$$

Dieser Zusammenhang ergibt sich für den Druck und die Geschwindigkeit der Teilchen bei einem bestimmten Volumen.

### Temperatur und Geschwindigkeit

Die Hergeleitete Formel für die mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Druck beinhaltet den Ausdruck (pV), den man durch die Aussage des allgemeinen Gasgesetzes substituieren kann.

$$pV = nRT = \frac{1}{3} n M \bar{v}^2 \Rightarrow 3RT = M \bar{v}^2$$

Mit dieser Bedingung lässt sich die Temperatur und die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen in ein Verhältnis setzen, das hauptsächlich von der Molmasse(M) des Gases abhängt.

### Vorsicht Falle

Vorsicht ist geboten bei der Wahl der Variablen und deren Bedeutung. In manchen Büchern können andere Variablen für gleiche Begriffe oder unterschiedliche Begriffe für gleiche Variablen stehen. Das Gesetz des Drucks kann umgeformt werden:

$$p = \frac{1}{3} n \mu \bar{v}^2 \quad \text{mit Druck}([p] = \text{Pa}), \text{Konzentration}([n] = \text{Anzahl}/\text{m}^3), \text{der Masse eines}$$

Teilchen( $[\mu] = \text{kg}$ ) und Geschwindigkeit ( $[v] = \text{m/s}$ )

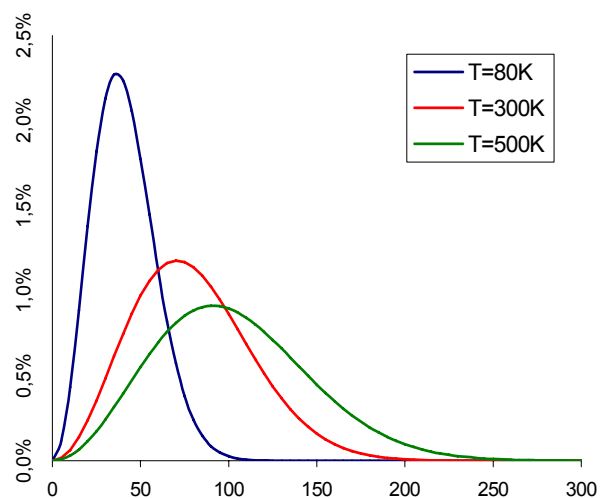
Und das Gesetz der Temperatur kann umgeformt werden:

$$\frac{1}{2} \mu \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT \quad \text{mit der Masse eines Teilchen}([ \mu ] = \text{kg}), \text{der Geschwindigkeit}([v] = \text{m/s}), \text{der}$$

Boltzmannkonstante( $[k] = \text{J/K}$ ) und der Temperatur( $[T] = \text{K}$ ).

### Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

Durch die Formeln hat man nun die Möglichkeit durch verschiedenen messbare Größen die Mittlere Geschwindigkeit zu ermitteln. Allerdings ist die Geschwindigkeitsverteilung der Gasteilchen unbekannt und von statistischer Natur. Mit der Formel der maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung, eine statistische Formel, kann vorhergesagt werden, welche Geschwindigkeiten wahrscheinlich sind. Wichtig werden diese Formeln bei aller Art von physikalischen und chemischen Wechselwirkungen. Für viele Prozesse ist eine Mindestenergie in Form von kinetischer Energie erforderlich. Ob eine Reaktion ablaufen wird hängt in erster



Linie davon ab ob und wie viele Teile die für eine Reaktion nötige Energie aufweisen. Dies kann mit der maxwellschen Formel und dem mathematischen Integral (die Fläche unter dem Schaubild, die Anzahl der Teilchen mit der Geschwindigkeit zwischen den Grenzen des Integral) errechnet werden. Aus der Geschwindigkeit kann direkt die Kinetische Energie errechnet werden. Als Beispiel die Verteilungskurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine hohe Temperatur ( $T = 500\text{K}$ ) Zimmertemperatur ( $T = 300\text{K}$ ) und  $T = 80\text{K}$ . Auf der Y-Achse sind die relativen Wahrscheinlichkeiten für ein Teilchen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgetragen. Das zeigt Beispiel die maxwellsche Verteilung für Wasserstoffatome. Gleichzeitig lässt sich durch die Integration der Kurve, die Anzahl der Teilchen ermitteln die in einem Geschwindigkeitsintervall liegen.

## **Feste Körper**

Feste Körper können durch die ionischen Wechselwirkungen, die metallischen Bindungen oder die kovalente Bindungen entstehen. Entscheidend für die Eigenschaften der festen Körper ist aber nicht die Art der Bindung, sondern vielmehr ihre Struktur. Man kann feste Körper nach vielen Gesichtspunkten einteilen. Die wichtigen sollen hier vorgestellt werden. Auch die Temperatur fester Körper kann durch die Bewegung der Atome beschrieben werden. Auch hier sind kinetischen Energien im Spiel. Kinetische Energie ist eine Energie aufgrund einer relativen Bewegung. Obwohl die Atome in der Struktur fester Körper fixiert sind können eine kinetische Energie haben. Diese kann in zwei Verhalten aufgeteilt werden, die Rotation und die Oszillation. Beides sind mechanische Wege kinetische Energie zu speichern, ohne die Position zu verlassen. Mit der Oszillation durch zugeführte Energie lässt auch das Phänomen der Längenausdehnung bei einer Temperaturerhöhung erklären. Oszillierende Atome benötigen mehr Platz, dadurch wird die Bindungslänge zwischen den Atomen länger. Die Summe dieser Verlängerungen ist makroskopisch messbar.

## **Die Kristalle**

Ein Kristall ist ein anisotroper, homogener Körper, der aus einer dreidimensional und periodisch angeordneten Struktureinheit besteht. Alle Ionen bilden Kristalle, die so genannten Salze, aber auch Metalle haben kristalline Strukturen. Auch einige kovalent gebundene Moleküle oder die Anordnung mehrerer haben eine Kristallstruktur.

Die Modellvorstellung der Kristalle entspricht aber nicht der Realität. In Realität finden sich in Kristallen immer Fehlerstellen, so genannte Vakanzen. Die Einzigen Fehlerstellen, deren Auftreten nicht abhängig von der Temperatur ist sind Leerstellen.

Punktfehler sind durch das vorübergehende Verlassen oder das Wandern von den Atomen in der Kristallstruktur bedingt. Hierbei kann man die Schottky-Defekte, die durch das Wandern von Atomen in der Kristallstruktur an der Oberfläche entstehen und die Frenkel-Defekte, die sich im inneren des Kristalls finden lassen und entstehen, wenn sich Atome von ihrer Position durch die Gitterstruktur bewegen. Schottky-Defekte sind variable Punktfehler, das heißt die Defekte wandern durch den Kristall. Bei der Entstehung dieser Effekte ist eine volumenmäßige Vergrößerung des Kristalls nachweisbar. Im Gegensatz dazu sind die Frenkel-Defekte ortsfeste Fehlerstellen, die durch das Zurückkehren des aus der Fehlerstelle kommenden Atoms bedingt sind. Für beide dieser Effekte kann ein Zusammenhang zwischen

Auftreten und der Temperatur gezogen werden. Die allgemeine Formel  $n_{s/f}(T) = N_0 e^{-\frac{E_{s/f}}{kT}}$

stellt die Anzahl (oder vielmehr die Konzentration da  $N_0$  die Anzahl der Eckstellen pro Volumeneinheit) der Fehlerstellen in Relation mit der absoluten Temperatur ( $T$ ). Die Energie ( $E$ ) ist die Energie, die für das generieren einer Fehlerstelle notwendig ist. Auch für Kristalle kann eine Boltzmann-Verteilung für die Energie eines Atoms aufgestellt werden.

Genauer gesagt, entspricht der Ausdruck der rechten Seite der Anzahl an Eckstellen, die die Energie besitzen einen Punktfehler herbeizuführen.

Eine andere Art von Defekten sind Einlagerungsdefekte. Hierbei handelt es sich um andere Atome, die die Struktur des Kristalls stören. Den Vorgang des Einlagerns verschiedener kristallfremder Atome in kristalline Strukturen wird Dotieren genannt.

## Flüssige Kristalle

Flüssige Stoffe zeichnen sich durch einen isotropen Zustand aus. Die einzelnen Moleküle in einer Flüssigkeit haben keine angelegten Ausrichtungen. Alle messbaren Größen sind unabhängig von der Richtung der Messung.

Kristalline Strukturen sind in vielerlei Hinsicht anisotrope Strukturen. Graphit besteht zum Beispiel aus vielen Schichten von Kohlenstoffpolymeren. Entlang dieser Schichten kann Graphit elektrischen Strom gut leiten, senkrecht zu den Schichten nicht. Ein anderes Beispiel ist die Brechung an anisotropen Stoffen.

Um anisotrop zu wirken ist aber nicht unbedingt eine kristalline Struktur von Nöten.

Flüssigkristalle sind anisotrope Stoffe, die aber flüssiger Natur sind. Einige Stoffe gewinnen ihre flüssigkristalline Phase bei einer bestimmten Temperatur. Bei diesen Stoffen spricht man von thermotropen Flüssigkristallen. Anhand der Temperatur verändert sich die Phase der Kristalle und so die optischen Eigenschaften der Kristalle. Manche andere Kristalle verändern ihre Phase als Wirkung von elektrischer Ladung. Nahezu jeder kennt einige Verwendungen der Flüssigkristalle. Sie sind aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Die möglichen Anwendungen erstrecken sich von Taschenrechner (speziell dem Display) bis hin zum Computer (dem LCD-Display).

Andere Stoffe erreichen nur in Lösung die flüssigkristalline Phase. Bei diesen lyothropen Stoffen ist eine Vielzahl von Umständen für das Ausbilden der Phase verantwortlich.

Bekanntere Beispiele für lyothrophe Flüssigkristalle sind Seifen oder Lipide.

## Von Metallen, Halbleitern und Isolatoren – Das Bändermodell

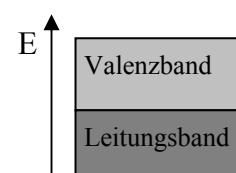
Im Bändermodell werden die Zustände von Elektronen in einem Kristall beschrieben. Es gibt mehrere Energiebereiche, in denen viele quantenphysikalisch mögliche Zustände existieren, die energetisch so dicht liegen, dass sie als Kontinuum, als Energieband, angesehen werden können.

Bei der Betrachtung der elektronischen Eigenschaften eines Kristalls sind vor allem das Valenz- und das Leitungsband von Bedeutung. Am absoluten Nullpunkt ist das Valenzband das höchste vollständig besetzte Energieband. Das energetisch darüberliegende Band nennt man Leitungsband. Im allgemeinen liegt zwischen beiden ein verbotener Bereich, der Bandlücke genannt wird.

Die Leitfähigkeit des Kristalls hängt zum einen davon, ob das Leitungsband am Nullpunkt halb besetzt oder unbesetzt ist, und zum anderen von der Temperatur ab. Letztere bestimmt, inwieweit Elektronen aus dem Valenzband thermisch angeregt und in das Leitungsband gehoben werden können. Auf diese Weise kann ein unbesetztes Leitungsband teilbesetzt werden. Ein voll besetztes Band trägt genau wie ein unbesetztes Band nichts zum Stromtransport bei, denn die Geschwindigkeit aller Elektronen eines Bandes ist im Mittel Null. Erst ein teilbesetztes Band ermöglicht im elektrischen Feld einen von Null verschiedenen Nettostrom.

### *Metall*

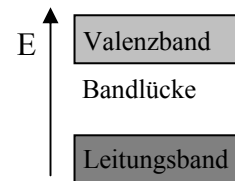
In einem Metall ist das Leitungsband zur Hälfte besetzt. Es handelt sich daher um einen guten elektrischen Leiter. Eine Temperaturerhöhung führt im allgemeinen zur Verringerung der



Leitfähigkeit des Kristall, da die erhöhte Streuung der Elektronen eine niedrigere mittlere Geschwindigkeit bedingt.

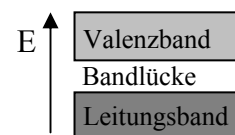
### **Isolator**

Ein Isolator hat ein unbesetztes Leitungsband und eine so große Bandlücke, dass bei Raumtemperatur und auch bei deutlich höheren Temperaturen nur sehr wenige Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband thermisch angeregt werden. Der spezifische Widerstand eines solchen Kristalls ist sehr hoch.



### **Halbleiter**

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei einem Halbleiter, jedoch ist die Bandlücke hier so klein, dass sie durch thermische Energiezufuhr überwunden werden kann. Ein Elektron kann ins Leitungsband angehoben werden und ist hier beweglich. Zugleich hinterlässt es im Valenzband eine Lücke, die durch benachbarte Elektronen aufgefüllt werden kann. Somit ist im Valenzband die Lücke beweglich. Bei Raumtemperatur weist ein Halbleiter dadurch eine geringe Eigenleitfähigkeit auf, die durch Temperaturerhöhung gesteigert werden kann.



### **Die Dotierung**

Durch Dotierung kann ein Halbleiter gezielt mit Ladungsträgern ausgestattet werden. Der Halbleiterkristall beruht auf einem Kristallgitter aus 4-wertigen Atomen, die jeweils durch vier Elektronenpaare gebunden sind. Dotierung mit 5-wertigen Atomen hinterlässt im Gitter ein für die Bindung nicht erforderliches Elektron, das somit nur locker gebunden ist. Mit nur geringer Energie kann es daher ins Leitungsband angehoben werden und ist hier beweglich. Der Kristall wird mit beweglichen negativen Ladungsträgern ausgestattet, man spricht von einer **n**-Dotierung. Zugleich bleibt ein positiver Atomrumpf im Gitter zurück. Lässt man den Hintergrund der neutralen Grundsubstanz außer Betracht, so hat man eine positive feste und eine negative bewegliche Ladung ins Gitter eingebracht.

Dotierung mit 3-wertigen Atomen führt zu einer ungesättigten Bindung, in der ein Elektron fehlt. Dieses kann mit geringem Energieaufwand aus einer anderen Bindung gerissen werden. Es entsteht eine negative ortsfeste Ladung. Zugleich hinterlässt das Elektron im Kristall eine Lücke, die durch ein anderes Elektron aufgefüllt werden kann, also eine bewegliche Elektronenfehlstelle. Im Resultat hat man eine negative feste und eine positive bewegliche Ladung eingebracht. Man spricht dann von **p**-Dotierung.

### **Der pn-Übergang**

Ein pn-Übergang ist die Übergangszone zwischen einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiterkristall. Sie zeichnet sich durch ein Fehlen beweglicher Ladungsträger aus, da die positiven des p-Kristalls sich hier mit den negativen des n-Kristalls ausgeglichen (rekombiniert) haben. Da die ebenfalls vorhandenen ortsfesten Ladungen nicht rekombinieren können, herrscht innerhalb der Zone ein elektrisches Feld, welches einen Ladungstransport unterbindet. Dieses Feld kann durch eine von außen angelegte Spannung - je nach Polung - kompensiert werden, dann wird der pn-Übergang leitfähig, oder es kann verstärkt werden, dann bleibt er gesperrt. Diese von der Polung abhängige Leitfähigkeit ist die Grundlage der Halbleiterdiode, der wichtigsten Anwendung des pn-Übergangs.

## Temperatur und Strahlung

Die Temperatur eines Körpers ist ein Potential Arbeit zu verrichten, also eine Form von Energie. Nach den Gesetzen der Thermodynamik versucht ein Körper immer seine Energie zu verringern, also Energie abzugeben. Manche dieser Vorgänge erfordern eine Aktivierung von außen, wie zum Beispiel der Stein auf dem Tisch. Er kann seine potentielle Energie abgeben, wenn er über den Rand des Tisches gestoßen wird. Andere Energieformen bedürfen keiner Aktivierung um abgegeben zu werden. Die Energie eines Körpers, bedingt durch seine Wärme, wird kontinuierlich an seine Umgebung abgegeben. In einer normalen Umgebung ist der Wärmefluss durch das Medium leicht zu erklären. Allerdings gibt auch ein Körper im Vakuum, also ohne Medium, Wärmeenergie in Form von Strahlung ab. Auch ein Körper im Thermischen Gleichgewicht emittiert Wärmestrahlen, nimmt aber den Betrag der Energie wieder von außen auf. Es ist also ein dynamisches Gleichgewicht.

Die Rate in der ein Körper Energie abgibt ist proportional zur Temperatur des Körpers:

$$E_{ab}(T) = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4$$

In der Gleichung ist  $\sigma$  die Stefan Boltzmann Konstante ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ ),  $\varepsilon$  der

Emissionsgrad die von der Oberfläche des Körpers abhängt,  $A$  die Oberfläche des Körpers und  $T$  die Temperatur in K.

Für die aufgenommene Energie steht das Gesetz analog mit der Temperatur der Umgebung. Für die Änderung der Energie ( $\Delta E$ ) ergibt sich aus der Sicht des Strahlers:

$$\Delta E(T) = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_{Strahler}^4 - T_{Umgebung}^4)$$

Der Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ) ist ein Wert, der hauptsächlich von der Oberfläche des Strahlers abhängt. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Körper mit einem Emissionsgrad von 1 sind schwarze Strahler. Sie nehmen die gesamte Energie der Strahlung auf und geben diese auch durch Strahlung ab. Beispiele für annähernd schwarze Strahler sind die Sonne, die Glühlampe oder auch ein Lebewesen. Weiße Körper haben einen Emissionsgrad von 0. Sie reflektieren alle Strahlung von außen und emittieren keine Strahlung. Sie haben also keinen Energieaustausch mit der Umgebung.

Schwarze Körper haben ein relativ exaktes Linien-Emissionsspektrum, das in erster Linie von der Temperatur abhängt. Mit zunehmender Temperatur wird die Wellenlänge bei der die Emission maximal ist kleiner. Körper mit annähernd 300K emittieren elektromagnetische Strahlen im Bereich des Infrarotspektrums. Erst ab einer Temperatur von 1000K sind einige Emissionen im Bereich des sichtbaren Lichts. Die Sonne mit einer Temperatur von  $10^6$ K emittiert hauptsächlich im UV-Spektrum.

## Elektrik

Die Elektrik ist die Lehre von bewegten Ladungen. Diese Ladungen werden meistens durch Elektronen in Leitern dargestellt. Die kleinstmögliche Ladung ist folglich die Ladung eines Elektrons.

### Grundlagen

Für die genauere Betrachtung der Hautwiderstände müssen zuerst die Grundlagen der Elektrik erklärt und vorgestellt werden. Hierzu muss der „Strom“ in zwei Arten, die sich in einigen Punkten unterscheiden, unterteilt werden.

Die Grundlagen der Elektrik kurz zusammengefasst:

1. Elektrischer Strom: Er ist die Bewegung *freier Elektronen* in einem Leiter, die sich aus dem Atomverbund gelöst haben.
2. Stromstärke: Ist eine Basiseinheit des SI und gibt an wie viele Ladungen pro Zeiteinheit durch einen Leiterquerschnitt „fließen“. (gerichtete Größe) [Die genaue Definition:



Wenn durch zwei unendlich lange parallele Leiter ein Strom der Stärke 1A fließt, wirkt auf sie pro Meter die Anziehungskraft von  $2 \cdot 10^{-7}$  N. (Magnetische Anziehungskraft, Gleichstrom) DC/AC = Gleich(direct)/Wechsel(alternating)Strom(current)

- Spannung: Sie gibt an wie schnell sich die Ladungen im Leiter bewegen. (gerichtete Größe) [Sie gibt den Potentialunterschied zwischen zwei Punkten und somit die Kraft, die auf die Ladungen wirken an.] DV/AV = Gleich(direct)/Wechsel(alternating)Spannung

## Gleichstrom

Der Gleichstrom als gleichmäßiger Stromfluss definiert werden. Das heißt, dass Stromstärke und Spannung in die selbe Richtung gerichtet sind und ein kontinuierlicher Stromfluss(Energie) an einem Verbraucher zustande kommt.

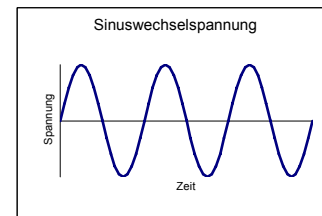
## Wechselstrom

Als Wechselstrom bezeichnet man alle Ströme, die ihre Stärke und/oder Spannung pro Zeiteinheit ändern. Einige Beispiele für Wechselspannungen:



In der normalen Wechselstromlehre wird normalerweise nicht von den oben vorgestellten Wechselspannungen ausgegangen, sondern von der sogenannten Sinuswechselspannung. Die wichtigsten Eigenschaften der Sinuswechselspannung

- Phase: Spannung und Stromstärke sind normalerweise in Phase. Sie haben zur gleichen Zeit den maximalen Wert.
- Frequenz(f): Gibt an wie oft sich die Spannung einen maximal positiven Wert pro Sekunde annimmt. [T = Periodendauer]
- Kreisfrequenz( $\omega$ ): Ein Wert, der sich von der Erzeugung der Wechselspannung ableitet. Es gilt:  $\omega = 2\pi f$ .



- Maximale Werte: Die maximale Spannung und Stromstärke sind die eigentlichen Größen die bei einer Wechselspannung gemessen werden. Bei der Sinuswechselspannung gibt es einen positiven und einen Negativen Maximalwert von Spannung und Stromstärke.


Zeichen:  $\hat{U}$  und  $\hat{I}$  [Sie treten bei T/4 auf. Sie sind die Effektivwerte durch  $\sqrt{2}$ ]

- Effektive Werte: Als effektive Werte der Spannung und Stromstärke werden die mit dem Gleichstrom vergleichbaren Werte angegeben. Sie sind die messbaren Werte. Zeichen:  $U_{\text{eff}}$  und  $I_{\text{eff}}$  (Im folgenden wird von den Effektivwerten ausgegangen).

## Bauteillehre

Alle sich in einem Stromkreis befindlichen Geräte können als sogenannte Bauteile aufgefasst werden. Diese haben verschiedene Eigenschaften. Die benötigten Bauteile sollen hier kurz vorgestellt werden:

### Widerstand

Der Widerstand (R):  Der ohmsche Widerstand ist das einfachste Bauteil der Elektrik. Der Widerstand eines Systems ist das Verhältnis der Spannung zwischen den


beiden Enden des Systems zur Stromstärke (Ohmsche Gesetz:  $R = \frac{U}{I}$ ). Jeder Leiter besitzt

einen Widerstand, der abhängig vom spezifischen Widerstand( $\rho$ ) des Leiters, von der Länge

und des Leiterquerschnitts ist ( $R = \frac{\rho l}{A}$ ). Der Widerstand eines Leiters ist

temperaturabhängig. Die Einheit des Widerstandes ist Ohm( $\Omega$ ). [Der Widerstand eines metallischen Leiters wächst mit steigender Temperatur, der eines halbmetallischen Leiters sinkt. Supraleiter sind Stoffe die bei einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt( $T \approx -273^\circ\text{C}$ ) annähernd keinen Widerstand mehr haben.]

## Kondensator

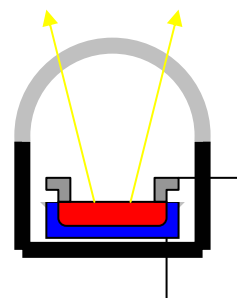
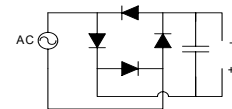
Der Kondensator (C):  Ein Kondensator ist einfach gesagt ein Ladungsspeicher. Die Funktionsweise eines Kondensators lässt sich am einfachsten an der eines Plattenkondensators erklären. Lädt man einen Plattenkondensator auf so bildet sich zwischen den Platten ein elektrisches Feld mit einer Feldenergie. Diese stellt einen Potentialunterschied dar und macht es beim Entladen über einen Verbraucher möglich, dass ein Strom fließt. Als Kapazität eines Kondensators bezeichnet man die Fähigkeit des Bauteils Ladung zu speichern. Der Wert der Kapazität ist definiert als Ladung, welche der Kondensator bei einer gewissen Stromstärke aufnehmen kann. ( $C = \frac{Q}{U}$  oder  $C = \gamma A$ , Einheit: Farad(F)). [Die

Kapazität eines Kondensators kann durch ein sog. Dielektrikum zwischen den Kondensatorflächen verändert werden.]

## Halbleiterbauteile

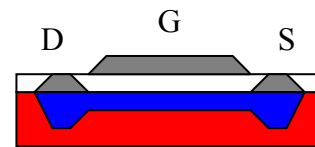
Halbleiter werden in der Elektrotechnik vielerorts eingesetzt. Ihre wichtigsten Einsatzgebiete kurz zusammengefasst und erklärt:

- Die Sperrdiode/Gleichrichter: Die Sperrdiode ist das einfachste Halbleiterbauelement in der Mikroelektronik. Es wird benutzt um Spannungen abzublocken. Bei einer Diode unterscheidet man eine Durchlassrichtung, bei der das elektrische Feld am pn-Übergang kompensiert wird und eine Sperrichtung, bei der das Feld verstärkt wird, also kein Elektronen fließen können. Die Dioden haben nach der Bauweise einen Mindeststrom, der fließen muss um durchlässig zu werden. Die einfachste Anwendung der ist die Gleichrichtung. Durch eine Quaderschaltung werden Wechselspannungen in Gleichspannungen umgewandelt. Die Spannungsschwankungen werden durch Kondensatoren ausgeglichen.
- Die Lumineszenzdiode(LED): Die LED entspricht im Aufbau dem Aufbau einer Sperrdiode. Auch die Spannungen werden ähnlich wie bei der Sperrdiode angelegt. Die LED ist auch nur in eine Richtung durchlässig. Der einzige Unterschied zur Sperrdiode ist der verwendete Halbleiter. Es werden Halbleiter gewählt bei denen die Energie, die beim Schließen der Lücken frei wird, nicht in Wärme umsetzen, sondern stattdessen Licht emittieren. Praktisch kann für jeden Wellenlängenbereich das richtige Halbleitermaterial und die richtige Dotierung gefunden werden. Rechts die schematische Darstellung einer Leuchtdiode. Die n-dotierte Schicht(rot) ist so dünn, dass Licht durch sie dringen kann. Sie ist mit einem Metallring mit dem Anschluss an der Diode verbunden. Das Gehäuse der Diode ist oben durchsichtig.
- Die Photodiode: Sie dient zum Nachweisen und zur Intensitätsmessung von Licht. Hierbei bringt das Licht die Energie um den Übergang zwischen n- und p-Schicht zu ermöglichen. Also verringert sich der Widerstand zwischen den beiden Schichten.
- Transistoren: Es gibt eine Vielzahl an Transistoren, die alle unterschiedliche Aufgaben, Wirkungen und Eigenschaften haben. Die gebräuchlichsten sind aber die FET(Feldeffekttransistor). Er regelt den Durchgang zwischen zwei Anschlüssen, dem

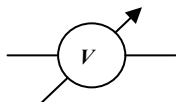
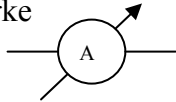



S(Source) und D(Drain) über ein anliegendes Potential zwischen G(Gate) und S. Folglich hat er drei Anschlüsse. Da der FET in vielerlei Hinsicht nur zwei Zustände, nämlich EIN(Spannung liegt an G an und Elektronen können nicht von S nach D fließen) oder AUS(Spannung liegt nicht an G an und Fluss ist möglich), kennt, ist er die Grundlage für alle logischen Schaltungen in der Elektrotechnik. Physikalisch ist die Funktion des FET interessant. Zu Erklärung das nebenstehende Skizze eines FET. Die Anschlüsse des FET führen zu den Metallelektroden(grau) auf dem Halbleitermaterial. Zur Isolierung wird meist das Oxid des Halbleiters benutzt, hier weiß dargestellt. Die n-dotierte Schicht(blau) ist mit der D und der S verbunden. Elektronen können von S nach D durch den n-Kanal fließen. Legt man nun an G negative Ladungen an, so entsteht zwischen G-Elektrode und p-dotierter Schicht(rot) ein Elektrisches Feld, dass Elektronen aus dem n-Kanal in die P-Schicht drängt. Durch die Verringerung der Elektronen im Leitungsband wächst der Widerstand zwischen S und D. Ist die Angelegte Ladung groß genug können nahezu alle Elektronen aus den n-Kanal verdrängt werden und so der Transistor ausgeschaltet werden. Für das ausschalten eines Transistors sind in der Regel nicht mehr als 1-5V nötig, je nach Bauart sogar noch weniger.

- Integrierte Schaltungen: Nahezu jede elektrische Schaltung lässt sich aus Transistoren, Widerständen und Kondensatoren aufbauen. Schwierig sind nach wie vor hochfrequente Schaltungen. Sie benötigen zur Erzeugung der Schwingungen spezielle Bauteile, die Schwingquarze. Bis auf diese Ausnahme bestehen alle elektrischen Schaltungen aus den oben genannten Bauteilen. Aus Platz und Energiegründen werden heute alle diese Bauteile in einem Chip zusammengesetzt. Die Mikrochips meist aus einer Hülle aus Siliciumoxid in die alle elektrischen Bauteile auf geringsten Raum eingelassen sind. Durch die Verkleinerung können Ströme eingespart, Frequenzen erhöht und Größen reduziert werden. Zum Vergleich: Ein Taschenrechner hat heute mehr Bauteile als ein PC(der fast einen Raum füllte) vor 30 Jahren. Dadurch lassen sich komplexe Schaltungen auf geringste Räume unterbringen und bringen den Anwendern ein hohe Leistung bei kleinem Raumbedarf.



## Messgeräte

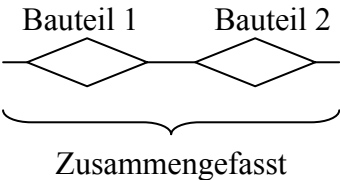
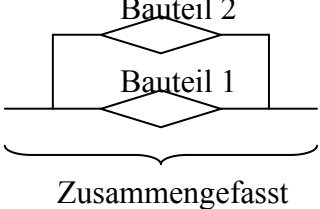
1. Das Voltmeter: Das Voltmeter dient zum Messen einer Spannung. Die Spannung muss in einem Stromkreis immer parallel zu eventuellen Verbrauchern gemessen werden. Viele Voltmeter können entweder Wechselspannungen oder Gleichspannungen messen. Beim Messen von Wechselspannungen wird der Effektivwert der Wechselspannung angezeigt.[Ein ideales Voltmeter hat einen unendlich hohen Widerstand, das ist aber technisch nicht realisierbar. Deshalb kommt es gerade beim Messen von kleinen Stromstärken zu Ungenauigkeiten.] 
2. Das Amperemeter: Das Amperemeter dient zum Messen der Stromstärke in einem Stromkreis. Sie messen im Wechselstromkreis ebenfalls nur die Effektivwerte.[Ein ideales Amperemeter hat keinen Widerstand]. 
3. Das Oszilloskop: Das Oszilloskop dient zum Messen von Spannungen. Allerdings kann mit ihm nicht nur die Spannung sondern auch eine zeitliche Veränderung der Spannung gemessen werden. Zum Anzeigen des Spannungsverlaufes wird eine Kathodenstrahlröhre benutzt. Die gemessenen Spannungen werden hierbei auf der Y-Achse dargestellt. An die X-Achse wird eine von Oszilloskop generierte Sägezahnspannung angelegt, so dass eine Auswertung der Spannungsänderung in der Zeit möglich ist. In weiteren Funktionen kann die Phase zweier Wechselspannungen überprüft werden. Die phasentypischen Bilder geben einen Aufschluss über die Phase und die Schwingungsdifferenz der beiden 

Wechselspannungen. Oszilloskop sind sehr feine Messgeräte, die vor allem in der Entwicklung von Mikroelektronischen Bauteilen Anwendung finden. Grundsätzlich können sie aber für alle Messungen von Strömen eingesetzt werden.

### Zusammenfassung von Bauteilen

In einem Stromkreis kommen normalerweise nicht nur einzelne Bauteile vor. Um trotzdem mit Widerständen und Kapazitäten rechnen zu können, ist es möglich verschiedene Bauteile zu einem Zusammenzufassen. Für Kapazitäten und Ohmsche Widerstände gibt es verschiedene Rechenarten wie sie zusammengefasst werden können. Diese Zusammenfassungen gelten sowohl im Gleichstromkreis, und unter Berücksichtigung der Phase im Wechselstromkreis.

### Reihenschaltung vs. Parallelschaltung

Reihenschaltung	Parallelschaltung
	
Gesamtwiderstand(ohmsche Widerstände)	
$R_{ges} = R_1 + R_2$ $\Rightarrow U_{ges} = R_1 + R_2$ $\Rightarrow I_{ges} = I_1 = I_2$	$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $\Rightarrow U_{ges} = U_1 = U_2$ $\Rightarrow I_{ges} = I_1 + I_2$
Gesamtkapazität(Kondensatoren)	
$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$	$C_{ges} = C_1 + C_2$

### Im Gleichstromkreis

Im Gleichstromkreis wirkt ein ohmscher Widerstand wie ein Widerstand. Ein Kondensator ist ein Bauteil mit einem unendlichem Widerstand. Allerdings lädt sich der Kondensator beim Anlegen einer Spannung auf. Ist die Stromstärke nicht durch einen ohmschen Widerstand begrenzt, so wird diese für eine sehr kurze Zeit ins Unendliche steigen. Ähnlich dem Aufladen entlädt sich ein Kondensator beim Wegnehmen einer Spannung. [Kombiniert mit einer Spule ist dieser Effekt für den Knall beim Ausschalten eines Verstärkers verantwortlich.]

### Im Wechselstromkreis

Im Wechselstromkreis wirkt der ohmsche Widerstand wie ein Widerstand. Strom und Spannung laufen in Phase.

Der Kondensator dagegen wirkt nicht als Unterbrechung. Betrachtet werden muss die Spannung und die Stromstärke am Kondensator. Da der Widerstand als Quotient aus Spannung und Stromstärke definiert wurde, kann man dem Kondensator einen sogenannten Wechselstromwiderstand zuordnen, der abhängig von der Kapazität des Kondensators und der Kreisfrequenz der angelegten Wechselspannung ist. Für den kapazitiven

Scheinwiderstand eines Bauteils gilt:  $X_c = \frac{1}{\omega C}$ . Allerdings gibt es wegen den

Aufladevorgängen des Kondensators eine Phasendifferenz von  $-\frac{\pi}{2}$ . Das heißt die Spannung läuft der Stromstärke um eine viertel Periode hinterher.

## Schwingkreise

Schwingkreise bilden die Grundlage für alle technischen Geräte, die in irgendeiner Weise eine Frequenz benötigen. Sehen es Radiogeräte, bei denen ein Schwingkreis für den Empfang von Radiowellen, oder Mikroprozessoren, bei denen die Schwingkreise über die Taktfrequenz entscheiden.

### Kondensatoren beim Ein- und Ausschalten

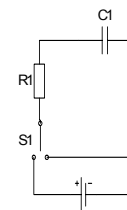
Wichtig für das Verstehen der Erscheinungen im Schwingkreis mit erzwungener Schwingung sind die Eigenschaften der Bauteile beim Variieren einer Spannungen.

Bereits bekannt ist, dass sich ein ohmscher Widerstand bei einer Spannungsveränderung immer wie ein ohmscher Widerstand verhält, also keine Veränderung zeigt.

Der Kondensator hat aber die Eigenschaft die elektrische Energie in ein elektrisches Feld umzuwandeln und so Energie zu speichern. Ein Kondensator kann Ladungen speichern. Die maximale Ladung des Kondensators ist abhängig von der Kapazität. Beim Anlegen einer Spannung an den Kondensator fließen Ladungen auf den Kondensator. Ein Elektrisches Feld entsteht zwischen den Platten des Kondensators. Die Kraft des elektrischen Feldes zwischen den Platten wirkt der Kraft der Spannungsquelle entgegen. Die Spannung, also der Potentialunterschied zwischen den Kondensatorplatten baut sich also nach dem Einschalten erst „langsam“ auf. Da die fließenden Ladungen als Stromstärke definiert sind, ist die Stromstärke am Kondensator theoretisch unendlich groß. Mit dem Aufbau der Spannung sinkt die Stromstärke. Beim Abnehmen der Spannung Speicher der Kondensator die Ladungen und die Energie als elektrisches Feld.

### Der RC-Kreis

Die Eigenschaften des Kondensators beim Ein- und Ausschalten werden im RC-Kreis von entscheidender Bedeutung. Wird der Schalter S1 geschlossen so fließen Ladungen von der Spannungsquelle über den Widerstand(R1) auf den Kondensator(C1). Die Spannung am Kondensator( $U_C$ ) zur Zeit t kann durch folgende Gleichung beschrieben werden.



$$U_C(t) = U_s(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

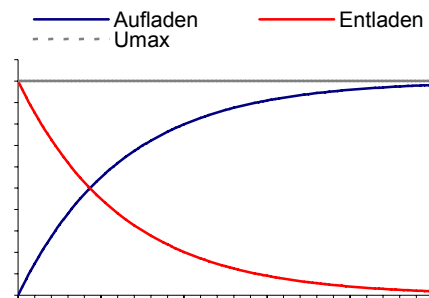
Wobei  $U_s$  die angelegte Spannung, R der ohmsche Widerstand im System(hier hauptsächlich von R1 bestimmt) und C die Kapazität des Kondensators ist.

Die kapazitive Zeitkonstante  $\tau$  ist eine Zeit ab der die Spannung am Kondensator auf das 1-1/e-fache(ca.63%) angestiegen ist. Sie kann auch als Konstante gesehen werden die einen RC-Kreis spezifiziert. Sie kann aus der Kapazität des Kondensators und dem ohmschen Widerstand des Stromkreises errechnet werden. Es gilt:  $\tau = RC$

Für das entladen eines Kondensators kann eine ähnliche Formel aufgestellt werden. Für die Spannung am Kondensator  $U_c(t)$  gilt beim entladen:

$$U_c(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ wobei } U_0 \text{ die Anfangsspannung am Kondensator ist.}$$

Dargestellt im Diagramm ergeben sich die nebenstehenden Schaubilder. Bei ihnen ist zu beachten, dass die Spannungen am Anfang nahezu einer gerade entsprechen. Die Möglichkeit mit einem RC-Kreis eine Sägezahnspannung herzustellen, stößt aber bei großen Leistungen auf Probleme. Daher werden Sägezahnspannungen für hohe Leistungen nicht mit der Hilfe von Schwingkreisen hergestellt, sondern resultieren aus der Addition anderer Wechselspannungen.



## Informationen und Signal

Die Hauptaufgabe der Wissenschaft ist die Beschaffung und die Speicherung von Informationen. Signale können bei der Informationsübertragung wertvolle Dienste leisten.

### Definition

Ein Signal ist eine physikalische oder chemische Größe oder deren Änderung, die Informationen speichert und überträgt.

Nach dieser Definition sind natürlich eine große Menge von Unterteilungen der Signale möglich. Signale können aufgrund ihres Auftretens als entweder periodisch oder stochastische Signale eingeteilt werden. Oder man spezifiziert die Art der Informationsübertragung in entweder kontinuierliche oder impulsartige Informationsübertragung. Eine weitere Möglichkeit zur Einteilung von Signalen ist die nach dem Medium der Signalübertragung. Die für die Physik wichtigen Signale sind die direkt messbaren. Es müssen daher alle Signale in eine messbare Form gebracht werden. Eine einfache Möglichkeit für die Messung bieten elektrische Signale.

### Elektrische Signale

Elektrische Signale sind Signale deren Medium der elektrische Strom ist. Sie sind sehr einfach zu messen und zu verarbeiten. Allerdings können mittels des elektrischen Stroms Signale auf zwei Arten übertragen werden. Eine Möglichkeit ist die Übertragung per Stromstärke, die andere, am meisten benutzte die Übertragung durch eine Spannung. Die Möglichkeit der mehrfachen Signalübertragung durch den elektrischen Strom macht natürlich für den Vergleich von den Signalen nicht gerade einfach.

### Vergleichen von Signalen

Elektrische Signale können, weil sie zwei Möglichkeiten zur Signalübertragung bieten nicht einfach durch einen Vergleich einer Basisgrößen des elektrischen Stroms verglichen werden. Aus diesem Grund wird für den Vergleich von zwei Signalen die elektrische Leistung (P) herangezogen. Sie errechnet sich aus der Stromstärke und der Spannung und ist somit eine Größe die sich mit der Änderung der Basisgrößen ändert. Die Leistung gibt an wie viel elektrische Arbeit an einem Widerstand in einer Sekunde verrichtet wird.

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

Für den Vergleich von Leistungen kann die von der Einheit bel (1 bel = 10W/1W) abgeleitete Einheit Dezibel verwendet werden. Sie ist folgendermaßen definiert.

$n_{dB} = 10 \log\left(\frac{P_{mess}}{P_{ref}}\right) dB$  Wenn die Leistungen am gleichen Widerstand gemessen wurden kann

aus dieser Formel hergeleitet werden:  $n_{dB} = 20 \log\left(\frac{U_{mess}}{U_{ref}}\right) dB = 20 \log\left(\frac{I_{mess}}{I_{ref}}\right) dB$

## Signalmanipulation

Viele Signale müssen vor der Verarbeitung noch verändert werden. Man unterscheidet im Prinzip zwei Veränderungen. Die nichtselektive Veränderung ändert alle Signale, während die selektive Veränderung nur bestimmte Signale verändert. Vor der Signalverarbeitung werden die Signale meistens verstärkt und analog verändert. Will man nachher Signale Digital verarbeiten so muss eine Digitalisierung oder eine Binarisierung. Manche dieser Schritte können in elektrischen Bauteilen zur gleichen Zeit passieren. Damit verringert sich der Einfluss von eventuellen Störquellen.

Die einzelnen Schritte der Signalmanipulation.

### Verstärker

Ein Verstärker ist ein elektrisches Bauteil, das das Level der Signale anhebt. Jedes Signal wird bearbeitet und um einen bestimmten Faktor, dem Verstärkungsfaktor, angehoben. Der Verstärker verstärkt entweder die Stromstärke oder, wie die meisten Verstärker, nur die Amplitude der Spannung. Die Verstärkung ist entweder linear, logarithmisch oder exponentiell. Manchmal wird der Verstärkungsfaktor auch in dB angegeben. Hier spricht man vom sogenannten Leistungsverstärkungsfaktor ( $v_p$ ). es gelten die Zusammenhänge:

$$v = \frac{U_{aus}}{U_{ein}} \text{ oder } \frac{I_{aus}}{I_{ein}} \quad \text{und} \quad v_p = 10 \log\left(\frac{P_{aus}}{P_{ein}}\right) = 20 \log(v)$$

### Hochpass- und Bandfilter

Filter dienen zur selektiven Auswahl der verschiedenen Signale. Sie unterdrücken je nach Konfiguration verschiedene Signale, die den Voraussetzungen des Filters nicht entsprechen. In der elektrischen Signalimpulsverarbeitung kommen hauptsächlich zwei verschiedene Filter zum Einsatz. Kurz zur Funktion der beiden Filter:

Der Hochpassfilter hat eine Schwelle. Er lässt nur Signale durch die eine gewisse Schwelle überschreiten. Somit werden Signale mit einem niedrigerem Wert einfach unterdrückt.

Der Bandfilter hat zwei Schwellen. Er lässt nur Signale durch die eine gewisse Schwelle überschreiten und eine andere Schwelle nicht überschreiten. Er unterdrückt alle Signale deren Wert nicht zwischen den Werten der beiden Einstellungen also in seinem Band liegen.

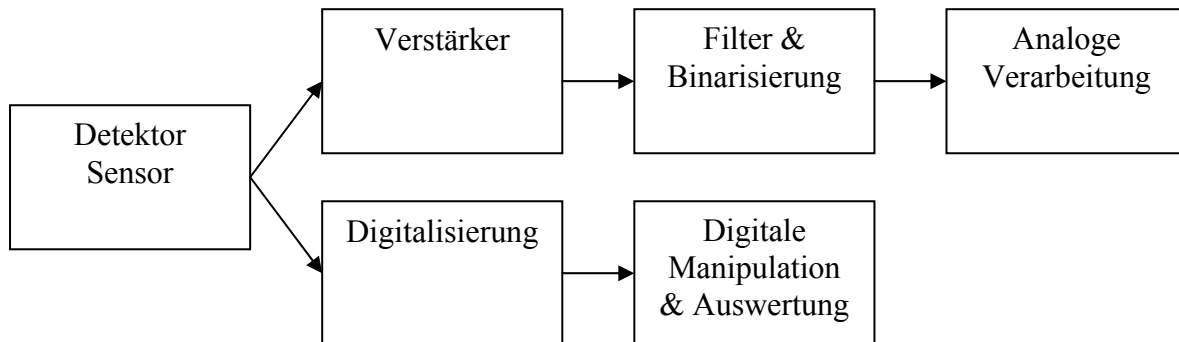
### Binarisierung / Digitalisierung

Unter der Binarisierung versteht man die Umwandlung der elektrischen Signale in binäre elektrische Signale. Binäre Signale haben nur zwei Zustände, *true* and *false*, und eine bestimmte Signalzeit. Binäre elektrische Signale haben einen gleichen exakten Wert oder den Wert null.

Unter einer Digitalisierung versteht man im allgemeinen die Umwandlung der Daten in eine digitale Signalsequenz. Diese beinhaltet alle Informationen über das digitalisierte Signal, nämlich die Signalstärke. Wenn Signale digitalisiert werden kann auf eine Filterung und oft auch auf eine Verstärkung der Signale verzichtet werden, da die digitale Signalverarbeitung mehr Möglichkeiten bietet.

## Allgemeine Signalverarbeitung

Zu jeder Verarbeitung von elektrischen Signalen eine Signalverarbeitungskette aufstellt werden. Die Signalverarbeitung erfolgt entweder analog oder digital.



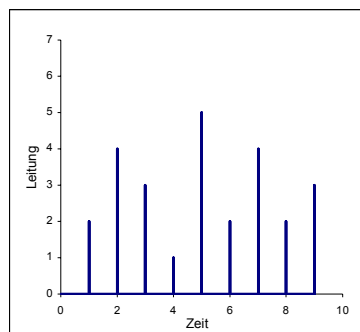
Alle Verarbeitungsketten fangen im Prinzip mit einem Bauteil an, das Signale in analoge elektrische Signale umwandelt. Diese Signale werden dann entweder digitalisiert und digital weiterverarbeitet oder in einer analogen Signalverarbeitungskette weiterverarbeitet.

Die analoge Signalverarbeitungskette umfasst mehrere Schritte. Als erstes werden die Signale mit einem Verstärker verstärkt. Das erleichtert die weitere Verarbeitung, da bei vielen der Bauteile ansonsten Informationen verloren gingen. Der nächste Schritt ist die Manipulation der Signale. Diese kann durch passive Filter, Invertierer oder aktive Filter erfolgen. Nach der Manipulation müssen die Signale zur weiteren analogen Verarbeitung (z.Bsp: Zählwerk) in angegliche binäre Signale erzeugt werden. Bei vielen Signalverarbeitungsketten werden die Filterung und die Binarisierung zusammengefasst. Sogenannte Diskriminatoren, elektrische Bauteile, können Signale filtern und binarisieren. Man unterscheidet einen Differential-Diskriminator (D.D.), ein Bandfilter mit Binarisierer, und einen Integral-Diskriminator (I.D.), ein Hochpassfilter mit Binarisierer. Das nachgestellte Bauteil zur Signalverarbeitung benutzt zur Bearbeitung (Zählen) die binarisierten Signale.

Die digitale Signalverarbeitung bietet sich für die Auswertung von vielen Signalen an. Müssen an den Signalen verschiedenen Operationen ausgeführt werden so können diese durch eine digitale Bearbeitung in Vergleichsweise kurzer Zeit ausgeführt werden. Allerdings ist die Genauigkeit der digitalen Signalen, gerade bei großen Leistungsunterschieden, durch die Art der Digitalisierung begrenzt. Müssen hochfrequente Signale gemessen werden, so sind die benötigten Bauteile zur Digitalisierung sehr teuer und störungsanfällig.

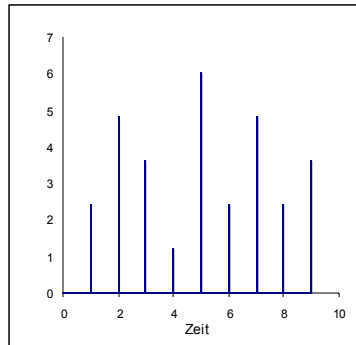
### Beispiel

Im Beispiel wird eine Messreihe elektrischer Signale betrachtet die alle drei Schritte nacheinander durchlaufen.

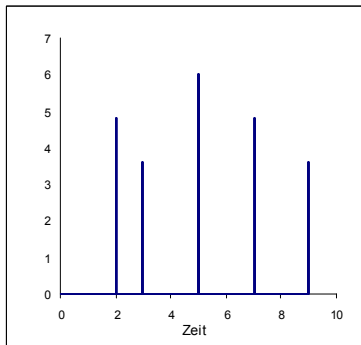


Verstärker ( $v_p = 1,2$ )

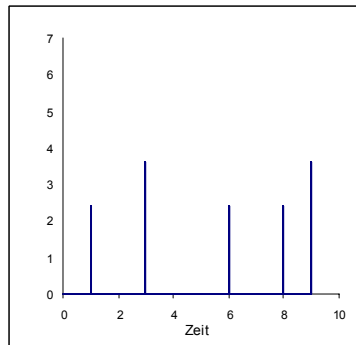




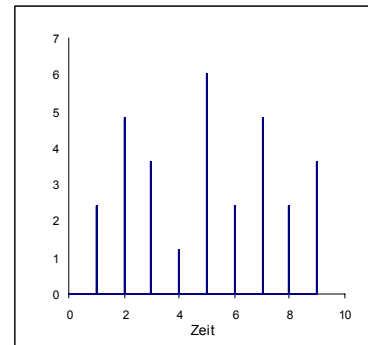
Hochpassfilter.(S = 3)



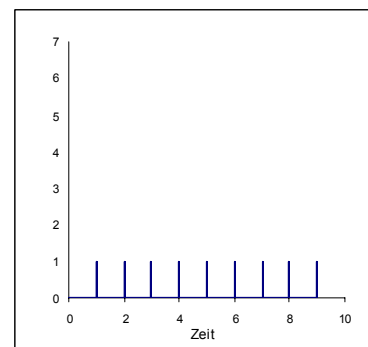
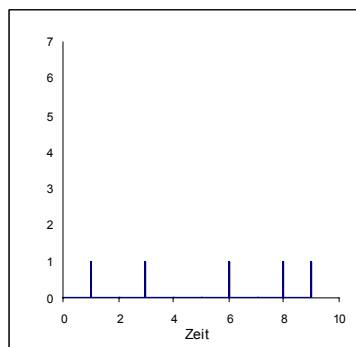
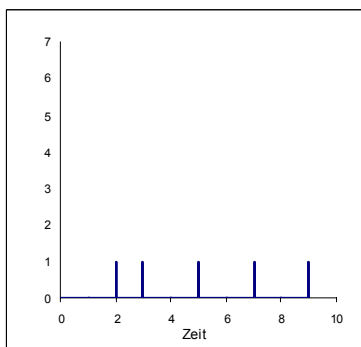
Bandfilter.(S= 2..4)



Unverändert



Binarisierung



## Medizinische Anwendungen

Die Physik stellt in vieler Hinsicht eine wichtige Grundlage dar. Jede Maschine und jedes Gerät beruht letztendlich auf den Gesetzen der Physik. In der Physik werden die Grundlagen für fast alle anderen Naturwissenschaften in Regeln gefasst. Einige von der Physik abgeleitete Wissenschaften, zum Beispiel die Elektrik und Elektronik, sind aus der heutigen Medizin nicht mehr wegzudenken.

Viele der physikalischen Gesetze werden in der Medizin entweder für die Forschung, die Diagnostik oder die Therapie angewandt.

## Strahlungen

Strahlung im weitesten Sinne ist die älteste Untersuchungsmethode. Ohne die Strahlung von Lichtquellen wäre eine Diagnostik, die oft auf dem Aussehen der zu untersuchenden Stoffe beruht, nicht vorstellbar. Aber auch energiereiche Strahlung oder manchmal auch energieärmere Strahlung als die Lichtwellen werden zum Teil für diagnostische und zum Teil für therapeutische Zwecke angewendet.

## **Elektromagnetische Wellen**

Nahezu das gesamte Elektromagnetische Spektrum kommt in der Medizin zur Anwendung. Als besonders Hilfreich haben sich aber die energiereichen Strahlen herausgestellt.

### ***Spektralanalyse***

Die Spektralanalyse kann einerseits zur quantitativen oder qualitativen Untersuchung von Lösungen oder Geweben eingesetzt werden. Je nach dem welche Informationen zu bestimmen sind, unterscheiden sich die Anwendungen. So kann mit einer Spektralanalyse, spezieller mit einem Flammen-Spektrometer, die Zusammensetzung und die Konzentration von Elektrolytlösungen gemessen werden.

### ***Absorptionsphotometrie***

Mit der Absorptionsphotometrie kann, wie die Spektralanalyse auch, die Konzentration von verschiedenen Lösungen bestimmt werden. Allerdings werden mit der Photometrischen Absorptionsspektralanalyse meistens nicht Elektrolyte gemessen. Die Absorptionsspektren von den medizinisch relevanten Elektrolyten zeigen in Lösungen meist nur eine kleine Absorptions- Fähigkeit. Vielmehr können mit der Absorptionsphotometrie große Substrate in Lösungen, wie Proteine, nachgewiesen und quantitativ bestimmt werden. Die Absorption ist für verschiedene Wellenlängen ist für einen Stoff charakteristisch und das Maß der absorbierten Strahlung lässt auf eine Konzentration und eine Stoffzusammensetzung schließen.

### ***Laserlicht***

Laserlicht hat, bezogen auf andere Strahlen, die Eigenschaft eine sehr hohe Energiedichte zu erreichen. Die Intensität eines Lasers ist, im Vergleich zu anderem Licht, sehr hoch. Dadurch können Laser relativ hohe Energien auf einem Punkt fokussieren. Diese können zur Verödung von verschiedenen Geweben genutzt werden. Durch die Interferenz zweier Laserstrahlen aus einer Laserquelle, die alleine nicht genügend Energie haben, können die Wirkungsregionen des Lasers sehr genau dosiert und positioniert werden. Viele Untersuchungen am Auge können mit schwachem Laserlicht vorgenommen werden. Auch das relativ Energiereiche Laserlicht findet bei Operationen einen Einsatz. Hierbei werden durch die Energie der Laserstrahlen Gewebe zerstört. Theoretisch ist auch das Scheiden mit Laser möglich, das Problem ist allerdings die Begrenzung des Laserstrahl. Schnitte mit Lasern sind durch das Verbrennen von Gewebe entstanden und bluten demnach nicht.

Laserlicht ist aber wegen der hohen Energiedichte extrem schädlich für die Netzhaut des Auges. Selbst die relativ energiearmen Laserstrahlen der Laserpointer können bei einmaliger Einwirkung die Netzhaut irreversibel Schädigen. Laser der Klasse 4 (in den DVD-Laufwerken) verursachen selbst bei der Betrachtung des Strahls, durch Reflektion an Staubpartikeln in der Luft, Schäden am Auge. Laser der Klasse I sind normalerweise ungefährlich.

### ***Röntgenstrahlen***

Röntgenstrahlen können wegen ihrer relativ kuren Wellenlänge Gewebe besser durchdringen, werden aber durch unterschiedliches Gewebe(vgl. Knochen und Muskel) unterschiedlich absorbiert. Röntgenstrahlen werden von Blei am besten Absorbiert(vgl. Strahlenschutz). Im Gegensatz zu anderen noch kurzwelligeren Strahlen(vgl.  $\gamma$ -Strahlen) richten sie aber nicht so viel Schaden an. Ein weiterer Vorteil ist die Belichtung von einer normalen Photoschicht, die auch bei der schwarzweiß Photographie zum Einsatz kommt. Man kann also Bilder von Geweben machen und diese sofort auf eine Photoschicht belichten. Mittlerweile ist eine digitale Auswertung(mit Photodioden vgl. Photoeffekt) von Röntgenstrahlen auch möglich.

Röntgenstrahlen sind in der Medizin also ein gutes, allerdings in hohen Dosen gefährliches Diagnosemittel. Dazu muss gesagt werden, dass neuere Röntgenröhren ein minimales an der Strahlung emittieren, wie die ersten ihrer Art. Durch bessere Auswertungsmethoden kann die Strahlendosis wiederum erniedrigt werden.

Als Anhang: Röntgenröhren müssen nach einer gewissen Anzahl von Betriebsstunden ausgetauscht werden, da sich das Target mit der Zeit abnutzt.

### **Röntgenbilder**

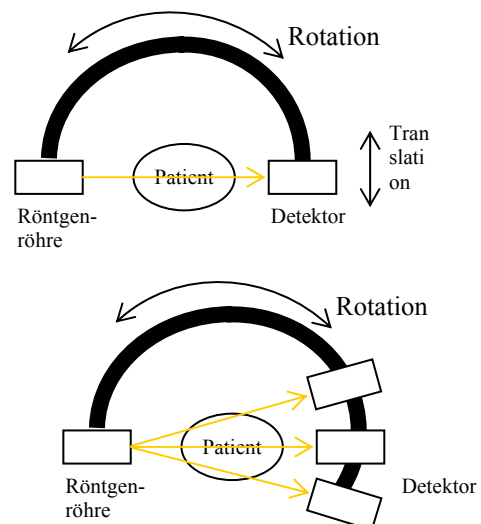
Normale Röntgenbilder sind Bilder, bei denen der Patient meist von einer Seite mit den Röntgenstrahlen durchleuchtet wird. Auf der Anderen Seite des Patienten befindet sich eine geeignete Apparatur um die Röntgenstrahlen sichtbar zu machen. Die gebräuchlichsten Apparaturen sind fluoreszierende Schirme, die aber heute keine Anwendung mehr finden, Röntgenfilme, auf die die Strahlung ähnliche Auswirkungen wie das sichtbare Licht hat, oder eine Digitale Art der Datenverarbeitung. Bei der digitalen Datenerfassung können neben den stehenden Bildern auch aufnahmen von bewegten Bildern, also Filme aufgenommen werden. So können in der Medizin verschiedene Vorgänge betrachtet werden, zum Beispiel die Atembewegungen des knöchernen Brustkorbs oder mit einem geeignetem Kontrastmittel die Bewegungen der Blutbahnen(speziell am Herz eingesetzt) oder die Peristaltik der inneren Organe

### **CT**

Das CT(Computer Tomographie) bietet gleich eine Reihe Anwendungsmöglichkeiten für die Datenverarbeitung. Der Messung am Patienten erfolgt eine Verarbeitung der digitalisierten Daten.

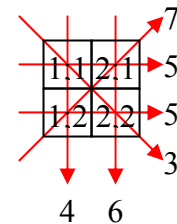
Die Tomographie bedeutet eigentliche die Aufnahme von Schichtbildern des Körpers. Zur Datengewinnung muss also der Körper in Schichten untersucht werden. Die Art der Geräte hat sich in den letzten Jahren sehr verändert. Allgemein werden die Messwerte durch einen dünnen Röntgenstrahl erzeugt, also verschiedene Schichten(mit Schichtdicke des Durchmessers vom Röntgenstrahl) aufgenommen. Hier sollen die Generationen der CT-Geräte kurz dargestellt und die Funktion beschrieben werden:

- Translate-Rotate Geräte: Hierbei sind eine Röntgenröhre und ein Detektor statisch miteinander verbunden. Der Röntgenstrahl durchdringt zwischen den beiden den Patienten. Um nun eine Aufnahme von der Schicht zu bekommen muss die Einheit durch eine Translation den Patienten schneiden und danach die gesamte Einheit eine Rotation um den Patienten machen.
- Rotate-Rotate Geräte: Hier muss die Röhren-Detektor Einheit keine Translation um den Patienten vornehmen. Durch einen gefächerten Röntgenstrahl und mehrere Detektoren ist ein Translation um den Patienten nicht mehr notwendig. Allerdings die Rotation muss vorgenommen werden.
- Rotate-Stationary Geräte(Spiral-CT): Bei diesen Geräten rotiert nur noch die Röntgenröhre um den Patienten herum, während die Detektoren in einem vollen 360° Kreis um den Patienten angebracht sind. Bei der Spiralaufnahme bewegt sich der Patient mit konstanter Geschwindigkeit durch das CT-Gerät, während der Röhre um den Patienten rotiert.



- Stationary-Stationary Geräte: Bei diesen Geräten bewegt sich nichts mehr. Um den Patienten herum befindet sich ein 360° Kreis mit Detektoren und ein Kreis aus einem Material, welcher als Target für einen Elektronenstrahl dient. Dieser Elektronenstrahl wird mittels elektrischer Felder jeweils zur gewünschten Position auf dem Target gelenkt. Wo er auftrifft entsteht die benötigte Röntgenstrahlung, welche dann den Patienten durchleuchtet. Durch diese Technik können sehr schnell Bilder erzeugt werden, sogar Echtzeit-Aufnahmen am Herzen sind möglich. Diese Geräte werden bisher nur in der Forschung eingesetzt. Bei allen CT-Geräten ist aber eine Bewegung des Patienten nötig. Nach dem Abschließen einer Schicht wird der Patient so bewegt, dass sich die nächste Schicht im Bereich der Wirkung befindet.

Die Errechnung der Schichtbilder erfordert das Auswerten einer Vielzahl von Messwerten. Da es sich bei allen Röntgenbildern um Summationsbilder handelt müssen mathematische Operationen an den Messwerten und Vergleiche angestellt werden. Wir wissen, dass sich die Absorption jedes Gewebes zu einer Gesamt Absorption für einen Strahlungsweg addiert. Durch einen Vergleich der Absorption verschiedener Wege lässt sich nun die Absorption eines Punktes berechnen. Als Beispiel zur Errechnung dient das Feld rechts dargestellt. In einer Matrix von 2 mal 2 Werten sind 6 Messwerte nötig um die Absorption, die sich aus der Summe der Absorptionen ergibt, des einzelnen Feldes zu bestimmen.



Als Beispiel die Bestimmung des Feldes (1;1):

Wir wissen: I:(1,1) = 4 – (1;2) und II:(2,2) = 3 – (1;1) und III:(1;2) = 5 – (2;2)

IV ist durch einsetzen von II in III: (1;2) = 5 – (3 – (1;1))

Durch IV in I: (1;1) = 4 – (5 – (3 – (1;1))) = 4 – 5 + 3 – (1;1) => 2\*(1;1) = 2

Natürlich sind die Absorptionen von Geweben nicht so eindeutig wie die hier gewählten werte, aber der Aufwand für das herausfinden einer Zelle ist allein bei diesem einfachen Beispiel nicht unbedingt einfach. Daher sind für die Auswertung der CT Messwerte leistungsfähige Rechner nötig, die eine Vielzahl von Messergebnissen speichern und verarbeiten können.

Die Messergebnisse eines Punktes werden später im CT-Bild als Graustufe dargestellt. Die CT-Bilder ähneln also Röntgenbildern von Schichten. Allerdings ist mit der Analyse der Daten auch eine räumliche Darstellung von Geweben mit gleicher Absorbtionsfähigkeit möglich. Die drei Dimensionen gewinnt der Computer aus dem Vergleich der Schichten bzw er setzt die Nummer einer Schicht als 3. Koordinate in ein Koordinatensystem.

## **DSA**

Die DSA(Digitale Subtraktions Angiographie) ist eine Methode zur Darstellung von Gefäßen im Körper. Das Prinzip ist relativ einfach. Es werden zwei Untersuchungen am Patienten vorgenommen(je nach Art der Angiographie können dies klassische Röntgenuntersuchungen oder CT Untersuchungen sein). Allerdings wird bei einer der Untersuchungen ein Kontrastmittel verabreicht. Durch ein Kontrastmittel, intraarteriell verabreicht, entsteht ein unterschied im Absorptionsverhalten. Wird ein positives Kontrastmittel verabreicht wird die Absorption größer. Durch einen Vergleich, also eine Subtraktion, der entstanden Bilder können die Stellen, an denen sich das Kontrastmittel befindet, im Fall der Angiographie in den Gefäßen, als Unterschied dargestellt werden. Wird dies bei konventionellen Untersuchungen angewandt entsteht ein zwei, bei CT-Untersuchungen ein dreidimensionales Bild der Untersuchten Gewebe.

## **Therapie**

Die Therapie mit Röntgenstrahlen beruht auf der Absorbionsfähigkeit des Gewebes. Weiche Röntgenstrahlen werden vom Gewebe relativ gut absorbiert, die Energie der Röntgenstrahlen

vom Gewebe aufgenommen. Diese erwärmen das bestrahlte Gewebe und sorgen bei Makromolekülen wie Proteinen oder der DNA für eine Instabilität. Die Proteine oder die DNS denaturieren und sind somit zerstört. Die Bestrahlung wird hauptsächlich in der Krebstherapie angewandt. Je nach Art und Tiefe der zu bestrahlenden Gewebe werden verschiedene Wellenlängen, also unterschiedliche Härten benutzt.

### ***Strahlenschutz***

Aufgrund der zerstörenden Eigenschaften der weichen Röntgenstrahlen, die große Interaktion mit Geweben eingehen, wird bei Untersuchungen versucht Strahlung einer Wellenlänge, die relativ schlecht absorbiert wird zu benutzen. Ein weiterer Faktor ist die Strahlendosis. Erst ab einer gewissen Dosis über einen gewissen Zeitraum ist Röntgenstrahlung für den Organismus gefährlich. Man versucht deshalb die Dosis, die bei einer Untersuchung verwendet wird möglichst gering und die Anzahl der Untersuchungen im Maß zu halten. Die Röntgendiagnostik ist ein hervorragendes Hilfsmittel zur Diagnostik in vielen Fachrichtungen, sollte aber mit Bedacht eingesetzt werden. Besonders gefährlich ist die Röntgenstrahlung für die Geschlechtsorgane, bzw. die Spermien und die Ovarien. Deshalb sollten diese immer vor der Strahlung geschützt werden.

### **Kernstrahlungen**

Kernstrahlen entstehen durch einen Zerfall radioaktiver Isotope. In der Medizin macht man sich die Kernstrahlen einerseits für die Diagnostik, andererseits für die Therapie zu nutze.

### ***Diagnostik***

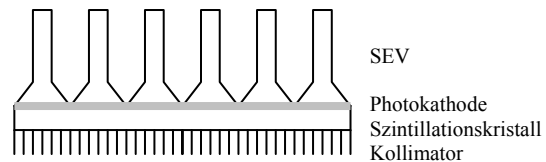
In der Diagnostik werden Kernstrahlen, die bei dem Zerfall radioaktiver Elemente oder Isotope entstehen eingesetzt. Alpha und Beta-Strahlen haben in Geweben nur eine geringe Reichweite, daher greift man hierbei meistens auf Gamma-Strahler zurück. Radioaktive Isotope sind instabil aufgrund ihrer Kernzusammensetzung. Ein Überschuss an Neutronen ist hierfür verantwortlich. Die Protonenanzahl, und somit die chemischen Eigenschaften der Isotope entspricht aber der Anzahl der normalen Elemente. Einige Elemente sind von sich aus instabil und somit radioaktiv. Der Körper kann Stoffe nur anhand ihrer Eigenschaften erkennen. So kann er zum Beispiel nicht unterscheiden ob in einem Wassermolekül Wasserstoff, Deuterium oder Tritium verwendet wurde. Für radioaktive Isotope anderer Elemente gilt das gleiche. Der Körper wird die radioaktiven Isotope der Elemente, die von außen künstlich zugegeben wurden, als normale Elemente erkennen und einbauen. Von einigen Organen wissen wir, dass sie besondere Speicheraufgaben übernehmen. So speichert die Schilddrüse zum Beispiel Iod, auch das künstliche von außen verabreichte Iod, welches innerhalb einer reaktiv kurzen Zeit zerfällt und so Strahlung emittiert.

Als Nachweismethode für radioaktive Strahlen stehen einerseits die Ionisierungskammer, andererseits der Szintillationskristall zur Verfügung. Die Ionisierungskammer ist nur sehr unempfindlich auf Strahlung und wird daher nicht zur Messung in der Medizin eingesetzt. Alle verwendeten Messgeräte sind mit dem Phänomen der Szintillation zu erklären

### ***Gammakamera***

Die Gammakamera ist die Grundlage der medizinischen Geräte zur Auswertung und Diagnostik mit den Kernstrahlen. Die Umwandlung der Strahlungsimpulse erfolgt durch den Szintillationsmesskopf. Allerdings wird die Richtung der einfallenden Strahlen durch einen Kollimator eingeschränkt. Der Kollimator besteht aus einem Geflecht von Lamellen, die verhindern, dass Strahlung anders als orthogonal zum Messkopf einfällt. Die Strahlung die vom Kollimator durchgelassen wurde, löst einen Lichtblitz im Kristall aus, der von den Photokathoden registriert wird. Aus diesen löst sich ein Elektron, das elektrische Signal. Dieses wird mit dem SEV verstärkt und von einem Messgerät, meistens einem Computer

wahrgenommen. Der Messkopf der Gammakamera besteht nicht nur aus einem SEV sondern aus mehreren. Er ermöglicht so die Aufnahme verschiedener Regionen. Durch die digitale Verarbeitung der Signale entsteht nun ein Bild, welches die Verteilung der Aktivitäten im Körper zeigt und somit auf die im Gewebe vorliegenden Teilchen schließen lässt. Meist werden die Bilder bunt dargestellt. Regionen in denen hohe Aktivität zu verzeichnen ist sind von einem Hellere Farbton. Schwarz bedeutet keine Strahlung. Mit Untersuchung können die räumlichen Ausmaße bestimmter Gewebe oder Organe als Abbildung dargestellt werden.



### **PET / SPECT**

Die PET (Positron Emission Tomographie) ist eine Möglichkeit zur Untersuchung des menschlichen Körpers, bei der Schichtaufnahmen des Körpers errechnet werden. Für diese Art der Untersuchung werden Beta+ Strahler verwendet. Die emittierten beta+-Teilchen treten nach sehr kurzer Strecke (oft nur einige mm) in Interaktion mit den Elektronen der Atome im Gewebe. Dabei entstehen zwei Gamma-Photonen, die sich in entgegengesetzter Richtung ausbreiten. Diese werden von Messköpfen, deren Aufbau dem einer Gammakamera ähnelt, die rings um den Patienten angeordnet sind wahrgenommen und ausgewertet. Aus der Summe vieler solcher Werte kann nun ein Schnittbild errechnet werden.

Die SPECT (single photon emission Computer Tomographie) funktioniert ähnlich der PET. Allerdings emittieren die verwendeten Radionuklide Gammastrahlung, die mit Gammakameras detektiert wird. Eine oder mehrere solcher Kameras rotieren um den Körper. Aus der zeitlichen und räumlichen Verteilung der registrierten Zerfallsereignisse wird auf die Verteilung des Isotops zurückgeschlossen und eine Serie von zweidimensionalen Schnittbildern errechnet.

Im Vergleich zur PET ist SPECT weniger aufwändig und teuer. Hauptsächlich rührt der Unterschied von der Verwendung langlebigerer Radionuklide her. Diese müssen nicht, wie bei der PET, in nächster Nähe zum Scanner hergestellt werden. Der Hauptnachteil ist die im Vergleich zur PET geringere räumliche Auflösung.

### **Therapie**

In der Therapie werden radioaktive Isotope hauptsächlich zur Bestrahlung von Tumoren genutzt. Die hohe Energie, die beim Zerfall der radioaktiven Elemente frei wird zerstört Makromoleküle wie DNS oder Proteine, die dadurch unbrauchbar werden. Gamma Strahlen regen zum Teil auch die Apoptose von Zellen an. Allerdings werden für die Therapie meistens Alpha oder Beta-Strahler eingesetzt. Diese werden eingenommen und vom Körper direkt in die entsprechenden Organe oder Regionen eingebaut. Ist ein Gewebe gut abgegrenzt so bietet sich das Einbringen der Isotope in das Gewebe von außen an. Alpha und Beta-Strahler haben den Vorteil, dass nur in nächster Umgebung ihres Aufenthaltsortes ihre Energie wirkt.

### **Strahlenschutz**

Der Strahlenschutz ist für Kernstrahlen in gleicher Weise wichtig wie für Röntgenstrahlen. Selbst eine geringe Dosis schädigt den Körper. Auch das ist bei nuklearmedizinischen Diagnostikmethoden zu beachten. Als Radiopharmaka der Diagnostik sollten also nur Isotope mit kurzer effektiver Halbwertszeit eingesetzt werden.

Die effektive Halbwertszeit kann aus der physikalischen und der biologischen Halbwertszeit berechnet werden. Die biologische Halbwertszeit ist die Zeit nach der die Hälfte der dem Körper zugeführten Elemente auf natürlichem Wege ausgeschieden wurden. Die effektive

Halbwertszeit kann wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{bio}}$$

## **Optik**

Die Optik dient in der Medizin, neben der ontischen Untersuchung von Patienten verschiedene Möglichkeiten.

### **Diagnostik**

In der Diagnostik werden die Gesetze der Optik neben der mikroskopischen Untersuchung auch zum Teil zur Messung Konzentrationen eingesetzt.

### ***Mikroskopische Untersuchungen***

Die mikroskopische Untersuchung ermöglicht es Veränderungen eines Organismus auf zellulärer Ebene zu untersuchen. So können im Blut zum Beispiel die Bestandteile gezählt, einzelne Zellen oder Zellkulturen betrachtet, aber auch Operationen mit einer höheren Präzision durchgeführt werden.

### ***Brechung***

Die Brechzahl, speziell die Brechzahl von Flüssigkeiten, kann in der Medizin zur Konzentrationsbestimmung verschiedener Moleküle in Lösung benutzt werden, da die Brechzahlveränderung der Lösungen linear zur Konzentration der gelösten Stoffe ist.

### **Therapie**

Die Therapiemöglichkeiten Aufgrund der optischen Gesetze hält sich für den ganzen Körper in Grenzen. Lediglich die Augenheilkunde nutzt die Optischen Gesetze um die Wahrnehmung des Menschen zu verbessern. Optische Defekte des Auges können mit Hilfe von Linsen, in form von Brillen oder Kontaktlinsen, ausgeglichen werden.

## **Elektrik**

Der elektrische Strom biete ebenfalls nicht viele Anwendungsmöglichkeiten in de Medizin, da die Zusammenhänge des Körpers noch nicht entschlüsselt sind. Zwar funktioniert die Weiterleitung von Reizen und das Denken durch die Weiterleitung von Potentialen aber diese genau zu entschlüsseln ist noch nicht gelungen.

### **Diagnostik**

Eine sehr bekannte und wichtige medizinische Untersuchung des Körpers berut auf dem Reiz des Körpers der für eine Muskelkontraktion wichtig ist. Mit Elektrogrammen, als Beispiel hier das Elektro-Kardiogramm(EKG), können Funktionen mancher Organe, zum Beispiel dem Herz oder dem Gehirn, diagnostiziert werden. Veränderungen der Elektrogramme lässt auf eine Veränderung, zum Teil eine krankhafte Veränderung, der entsprechenden Organe schließen.

Neben der Elektrogramme findet der elektrische Strom noch bei anderen diagnostischen Methoden Anwendung.

### ***Impedanzmessungen***

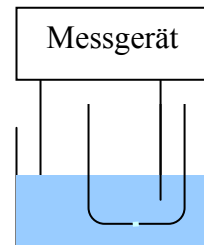
Aufgrund der Impedanz können verschiedene Funktionen, speziell die Funktionen der elektrisch gut leitenden, der Gewebe im Körper untersucht und gemessen werden. Die Impedanz des Brustkorbes erhöht sich beim Einatmen, die Impedanz der Haut lässt bei guter

Durchblutung nach. Aufgrund einer Impedanzberänderung können also Veränderungen in Geweben festgestellt werden.

### ***Pikometrie***

Die Pikometrie ist eine Impedanzmessung von Flüssigkeiten zur Bestimmung der Konzentration von relativ großen Bestandteilen, wie zum Beispiel den Blutbestandteilen. Das Prinzip ist relativ einfach. Flüssigkeit leitet den Elektrischen Strom besser als die darin vorhanden Bestandteile.

Die Flüssigkeit wird in einen Raum gebracht, der mit einem Raum durch eine kleine Kapillare in Verbindung steht. Elektroden sind in beiden der Räume vorhanden. Wird zwischen ihnen ein Potential angelegt, so fließt ein Strom. Die Flüssigkeit hat einen Widerstand. Nun wird ein bestimmter Teil(Volumen) der Flüssigkeit durch die Kapillare gepumpt. Auch die in der Lösung gelösten Teilchen wandern durch die Messkapillare. Befindet sich ein Teilchen in der Kapillare ist eine Erhöhung des Widerstandes zu bemerken. Diese



Widerstandsveränderung wird durch eine geeignete Analyseketten verifiziert und von der Widerstandsveränderung auf die Größe und durch die Anzahl der Widerstandsveränderungen auf die Anzahl der Teilchen in einem bestimmten Volumen, also die Konzentration, geschlossen.

### **Therapie**

Die Therapiemöglichkeiten des elektrischen Stroms sind auf Grunde der komplexen Vorgänge im Körper sehr begrenzt. Am Herz wird allerdings der elektrische Strom zu verschiedenen Therapien eingesetzt. Eine Herzrhythmusstörung kann durch die Anwendung von Strom unterbunden werden(Defibrillation). Zum Teil werden eigenständige Geräte implantiert, die den Rhythmus des Herzens ständig Überwachen und regeln oder immer die Kontrolle behalten(Herzschriltmacher).

Bei manchen Defekten im Gehirn ist es auch schon gelungen mit dem Elektrischen Strom diese Vorkommen zu unterbinden(Hirnschriltmacher).