

# LED-Nachtlicht

Alfons Reichert



# Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	2
<b>2. Grundlagen</b> .....	3
2.1 Schwingkreis .....	3
2.2 Modulation .....	6
2.3 Transformator.....	6
2.4 Superkondensator .....	7
2.5 LED .....	9
2.6 Wirkungsgrad.....	12
2.7 Gleichrichter .....	13
2.8 Optische Abbildung .....	17
2.9 Beugung .....	18
2.10 Brechung.....	21
2.11 Schatten.....	22
<b>3. Zusatzgeräte</b> .....	26
3.1 Spule .....	26
3.2 Ladungsspeicher .....	27
3.3 LED-Anzeigelampen .....	29
3.4 Motor.....	31
3.5 Schwingkreis .....	34
3.6 Demodulator.....	35
3.7 Blenden.....	37
<b>4. Versuche</b> .....	40
4.1 Elektrik .....	40
4.2 Optik .....	49
<b>5. Literatur</b> .....	56

## 1. Einleitung

Versuche in der Physik werden häufig mit Geräten durchgeführt, die die Schülerinnen und Schüler nicht aus dem Alltag kennen. Sie wurden bewusst so konstruiert, dass man mit ihnen einen speziellen physikalischen Effekt übersichtlich und anschaulich demonstrieren kann. Motivierender für Schülerinnen und Schüler sind aber Versuche mit Geräten aus ihrer Erfahrungswelt oder aus dem Baumarkt, die zudem ein wenig Basteln erfordern, um schöne Ergebnisse zu erzielen. Ein modernes Beispiel sind LED-Nachtlichter, die man in letzter Zeit in vielen Discountern preiswert erwerben kann. Einige kann man auch als Taschenlampe nutzen, die über einen Hochfrequenztrafo wie bei einer elektrischen Zahnbürste übers Stromnetz geladen wird. Besonders geeignet sind die Nachtlichter der Firma Müller-Licht und der Firma Wachsmuth&Krogmann, die beide von Aldi vertrieben werden. Sie besitzen als Leuchtmittel 15 LEDs, die in einer Matrix zu drei Fünferreihen angeordnet sind. Zahlreiche Versuche aus den Themenbereichen Elektrizitätslehre und Optik sind möglich, wenn man sich ein paar kleine Zusatzgeräte selbst bastelt.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen und Experimentieren.

Stolberg, im Juli 2016 und März 2021

## 2. Grundlagen

### 2.1 Schwingkreis

Ein Schwingkreis besteht aus einem Kondensator und einer Spule (s. Abb.1).

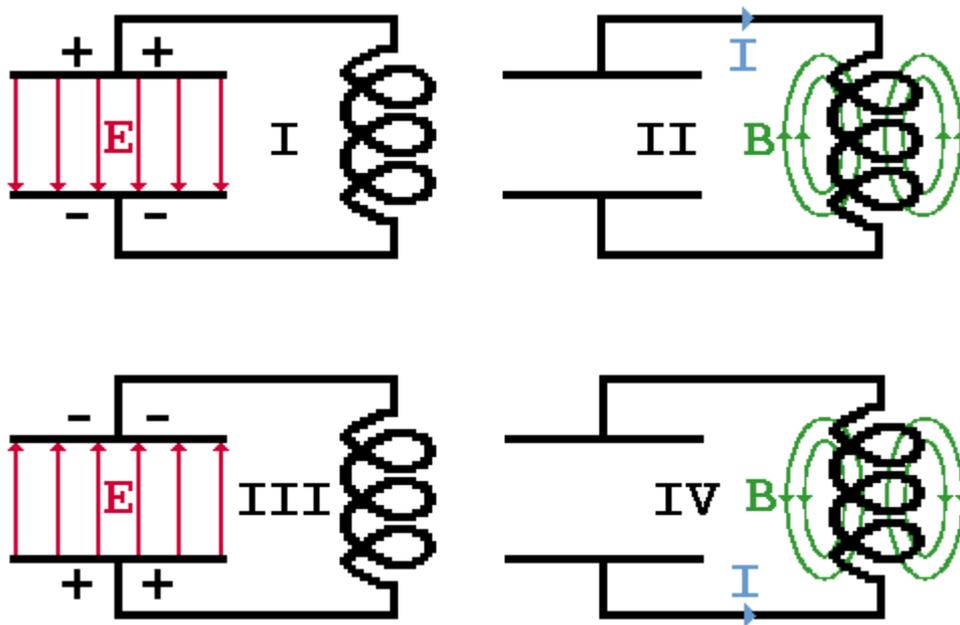


Abb.1: Vorgänge in einem Schwingkreis

Ist der Kondensator geladen, so herrscht zwischen seinen Platten ein elektrisches Feld  $E$  (Phase I). Die Ladungen versuchen sich auszugleichen und fließen durch die Spule. In ihr baut sich ein magnetisches Feld  $B$  auf, während das elektrische immer mehr abnimmt (Phase II). Ist der Kondensator entladen, so bricht das Magnetfeld in der Spule zusammen, da die antreibende Spannung fehlt. Es induziert eine Spannung an den Enden der Spule, die die Ladungen weiter antreibt. Die Kondensatorplatten werden erneut aufgeladen und zwar mit einer der ursprünglichen Spannung entgegen gesetzt gerichteten Polarität (Phase III). Sind die Platten vollgeladen, beginnt das ganze Spiel in umgekehrter Richtung von vorn. Die Ladungen fließen durch die Spule und erzeugen ein Magnetfeld in entgegengesetzter Richtung (Phase IV). Dieses bricht, wenn der Kondensator ganz entladen ist, zusammen und induziert wieder eine Spannung in der ursprünglichen Richtung (Phase I) und so weiter. Die Frequenz  $f$ , mit der sich diese Vorgänge wiederholen, hängt von der Kapazität  $C$  des Kondensators und der Induktivität  $L$  der Spule ab. Beide besitzen einen Wechselstromwiderstand  $R_C$  bzw.  $R_L$ . Für  $R_C$  gilt:

$$R_C = \frac{1}{2\pi f * C}$$

und für  $R_L$ :

$$R_L = 2\pi f * L.$$

Sind beide Widerstände in einem Schwingkreis gleich groß, so schwingt er mit der Frequenz  $f$ , für die gilt:

$$R_C = R_L.$$
$$\frac{1}{2\pi f * C} = 2\pi f * L$$

Stellt man diese Gleichung nach  $f$  um, so folgt

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}}$$

oder für die Periodendauer  $T$  der Schwingung

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{L * C}.$$

Sie spielt in der modernen Kommunikations- und Energietechnik eine große Rolle und wird Thomsonsche Schwingungsformel genannt.

Lädt man in einem Schwingkreis zu Beginn den Kondensator auf und überlässt anschließend den Schwingkreis sich selbst, so nimmt die Amplitude der Schwingung rasch ab, da die Energie nach und nach im Ohmschen Widerstand der Spule in Wärme umgewandelt und außerdem als elektromagnetische Welle in den umgebenden Raum abgestrahlt wird. Die Schwingung ist gedämpft. Um sie zu entdämpfen, muss man von außen ständig Energie zuführen. Geschieht dies mit einer Frequenz, die der Eigenfrequenz  $f$  des Schwingkreises entspricht, so schaukelt sich die Schwingung zu großen Amplituden auf. Sie schwingt mit dem Erreger in Resonanz. Die benötigte Energie kann man induktiv über eine zweite Spule in die Schwingkreisspule oder kapazitativ über eine Kondensatorrückkopplungsschaltung in den Schwingkreis einspeisen. Im Laufe der Geschichte der Nachrichtentechnik wurden zahlreiche Rückkopplungsschaltungen entwickelt, auch Oszillatoren genannt. Die erste war die Meißnersche Rückkopplungsschaltung, weitere sind der Hartley-Oszillator, der Colpits-Oszillator und der heute weit verbreitete Quarzoszillator.

Beim Meißner-Oszillator (s. Abb. 2) wird die zur Rückkopplung benötigte Wechselspannung durch eine Sekundärspule erzeugt, die mit der Schwingkreisspule einen Transformator bildet. Die Sekundärspannung wird an die Basis oder den Emitter eines Transistors gelegt. Es ist kein Kopplungskondensator erforderlich, da beide Spulen galvanisch getrennt sind. Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung wird heute kaum noch verwendet, da sie sehr viel Platz beansprucht wegen der beiden Spulen. Außerdem ist sie sehr störanfällig gegen Fremdeinflüsse, da die Sekundärspule auch Fremdspannungen einfangen kann. Ferner müssen beide Spulen exakt zueinander angeordnet werden. Die Stärke der Rückkopplung lässt sich durch den Abstand der beiden Spulen oder die Windungszahl der Rückkopplungsspule einstellen.

Beim Hartley-Oszillator (s. Abb. 3) besitzt die Schwingkreisspule einen Mittenabgriff. An ihm kann man die zur Rückkopplung benötigte Wechselspannung abgreifen. Sie wird über einen Kopplungskondensator, der die Gleichspannung sperrt, auf die Basis oder den Emitter des Transistors geführt. Das Einschwingverhalten ist gut, die Schaltung ist aber bei Temperatur-

schwankungen nicht sehr frequenzstabil. Verwendet wird die Schaltung nach wie vor in Funkempfängern wie Radios mit einstellbarer Empfangsfrequenz, wobei die Induktivität der Spule über einen verstellbaren Eisenkern variiert wird.

Beim Colpits-Oszillator (s. Abb. 4) besteht die Schwingkreiskapazität aus zwei Kondensatoren, die in Reihe geschaltet sind. Zwischen beiden wird die Rückkopplungsspannung abgegriffen und über einen Kopplungskondensator auf die Basis oder den Emitter des Transistors geführt. Die Schaltung hat die gleichen Vor- und Nachteile wie der Hartley-Oszillator. Sie wird ebenfalls in Funkempfängsgeräten benutzt, wobei ein Kondensator als Drehkondensator oder Kapazitätsdiode ausgeführt ist, deren Kapazität man über eine Regelspannung verändern kann. Hartley- und Colpits-Oszillator heißen auch Dreipunktschaltung wegen der drei Abgriffe am Schwingkreis. Sowohl beim Meißner- als auch beim Hartley- und Colpits-Oszillator kann die Stärke der Rückkopplung über ein Trimpoti eingestellt werden.

Beim Quarzoszillator (s. Abb. 5) besteht der Schwingkreis aus einem Schwingquarz und einem Reihenkondensator. Sie liegen an der Basis eines Transistors und sorgen für die nötige Frequenzstabilität bei Temperaturschwankungen. Sie werden heute fast ausschließlich in Funkgeräten eingesetzt, die nur auf einer Frequenz senden und empfangen. Die Rückkopplungsstärke lässt sich über eine Kondensatorkombination regeln, die zum Schwingquarz und dem Reihenkondensator parallel geschaltet ist.

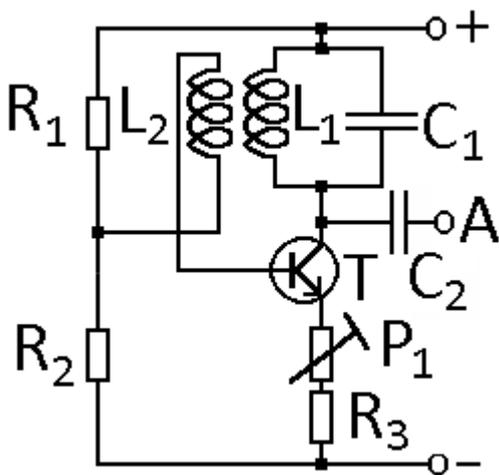


Abb. 2: Meißner-Oszillator

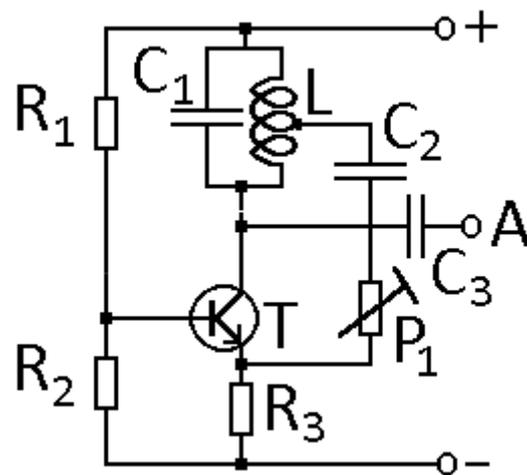


Abb. 3: Hartley-Oszillator

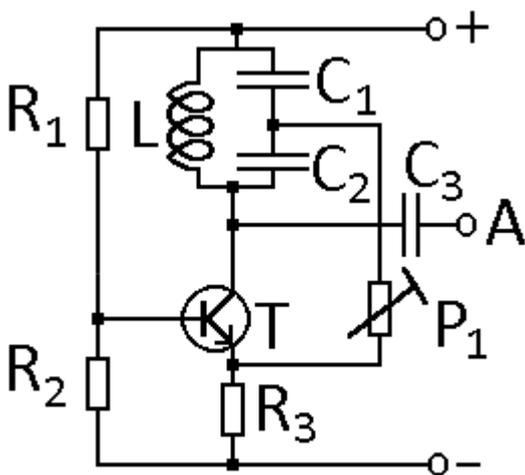


Abb. 4: Colpits-Oszillator

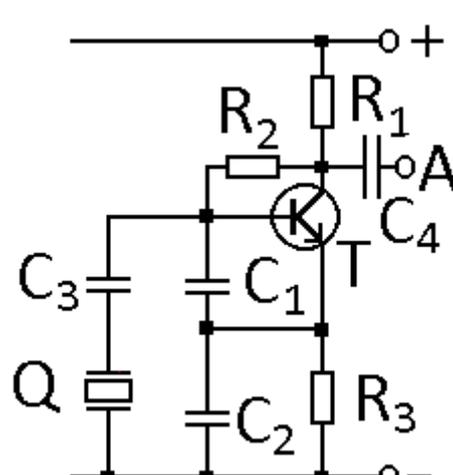


Abb. 5: Quarz-Oszillator

## 2.2 Modulation

Werden mit einer elektromagnetischen Welle, die durch einen Schwingkreis erzeugt wird, Informationen übertragen, so wird der entdämpfte Schwingkreis mit dem Audio- oder Bildsignal, auch NF-Signal genannt, moduliert. Die hochfrequente Trägerschwingung HF des Schwingkreises transportiert so die Information quasi Huckepack durch die Luft oder ein Kabel zum Empfänger. Wie man dazu genau vorgeht, habe ich im Skript „Radiosender/Radioempfänger“ auf dieser Webseite ausführlich beschrieben. Da viele verschiedene Sender gleichzeitig übertragen werden, muss am Empfangsort der gewünschte Sender aus allen anderen EM-Signalen herausgefiltert werden und das Informationssignal vom Trägersignal getrennt werden. Dazu dient im einfachsten Falle ein Diodenempfänger. Heute werden zahlreiche andere Demodulationsschaltungen eingesetzt, die wesentlich empfindlicher sind und eine bessere Trennung der einzelnen Sender ermöglichen, wie ich im oben genannten Skript erläutert habe.

## 2.3 Transformator

Transformatoren dienen dazu, Wechselspannungen zu erhöhen oder zu erniedrigen, ohne dass eine nennenswerte Leistung verbraucht wird. Sie werden in Kraftwerken und Umspannanlagen eingesetzt, um den Haushaltswechselstrom verlustarm über längere Strecken zum Verbraucher transportieren zu können. Dazu wird die Spannung im Kraftwerk hochtransformiert und vor Ort in Umspannanlagen wieder heruntertransformiert. Solche Transformatoranlagen besitzen riesige Ausmaße. In Kleinnetzteilen, die für viele elektronische Geräte benötigt werden, dienen Transformatoren dazu, die Netzspannung von 230 V auf einige wenige Volt zu verringern, da elektronische Geräte meist mit Kleinspannungen betrieben werden müssen. Mit so genannten Überträgern werden in der Kommunikationstechnologie Lautsprecher und Antennen an die elektronische Schaltung angekoppelt. Solche Trafos sind nur wenige Zentimeter groß.

Transformatoren bestehen aus zwei Spulen, die auf einen geschlossenen Eisenkern aufgebracht sind. An eine Spule, die Primärspule, wird die zu transformierende Spannung angelegt. An der zweiten Spule, der Sekundärspule, kann die gewünschte Spannung abgegriffen werden. Dabei ist das Verhältnis der Windungszahlen für das Übersetzungsverhältnis der Spannungen verantwortlich, wie im Folgenden gezeigt wird. Obwohl sich Transformatoren in der Praxis in vielfältiger Weise bewährt haben, ist eine geschlossene theoretische Beschreibung sehr schwierig, weil viele Faktoren berücksichtigt werden müssen. Zum einen besitzen Spulen aufgrund des Drahtes, aus dem sie gewickelt wurden, selbst einen Ohmschen Widerstand, der zu Verlusten führt, auch wenn der Transformator im Leerlauf betrieben wird. Zum zweiten hängt die Permeabilität eines Eisenkern vom Strom ab, was die Berechnungen erheblich erschwert. Zum dritten beeinflussen sich die beiden Spulen im Betrieb über den Eisenkern gegenseitig, was dazu führt, dass bis zu vier verschiedene Induktions- bzw. Selbstinduktionsspannungen in die Rechnung mit eingehen. Zu guter Letzt müsste man auch noch berücksichtigen, dass der magnetische Fluss von der einen auf die andere Spule und umgekehrt nicht verlustfrei übertragen wird. Alle diese Faktoren werden in meinem Skript „Transformatoren“ auf dieser Webseite berücksichtigt. Nimmt man an, dass der Ohmsche Widerstand der Spulen gering ist und der magnetische Fluss  $\Phi$  komplett von der Primär- auf die Sekundärspule übertragen wird, so gilt für die Spannung in der Primärspule  $U_P$  bzw. der Sekundärspule  $U_S$ :

$$U_P = -n_P * \frac{d\Phi}{dt}$$

und

$$U_S = -n_S * \frac{d\Phi}{dt}.$$

Darin ist  $n_P$  die Windungszahl der Primärspule und  $n_S$  die Windungszahl der Sekundärspule. Daraus erhält man für den unbelasteten Trafo:

$$\frac{U_P}{U_S} = \frac{n_P}{n_S}.$$

Die Spannungen an den Klemmen verhalten sich wie die Windungszahlen. Kann man die Verlustleistung in den Spulen vernachlässigen, so gilt außerdem nach dem Energieerhaltungssatz:

$$P_P = P_S$$

$$U_P * I_P = U_S * I_S$$

und damit

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{U_P}{U_S} = \frac{n_P}{n_S}.$$

Darin bedeuten:

$P_P$ : Primärleistung,  
 $I_P$ : Primärstrom,  
 $P_S$ : Sekundärleistung,  
 $I_S$ : Sekundärstrom.

Dieses Stromgesetz gilt nur näherungsweise, aber umso genauer, je kleiner der Ohmsche Widerstand  $R$  der Spulen ist und je kleiner der Strom  $I$  ist, da für die Ohmschen Leistungsverluste  $P_V$  in einem Draht gilt:

$$P_V = R * I^2.$$

## 2.4 Superkondensator

Superkondensatoren, auch Goldcaps genannt, sind in letzter Zeit auf dem Vormarsch. Bei Anwendungen, die mit einem geringen Strom auskommen, kann man sie statt Akkus einsetzen. Sie haben den Vorteil, dass sie beliebig oft geladen werden können. Grundsätzlich besteht ein Kondensator aus zwei Elektroden, meist aus Aluminium, zwischen denen sich eine nichtleitende Plastikfolie befindet. Schließt man die Elektroden an eine Gleichspannung an, so laden sich die Metallelektroden auf. Zwischen ihnen baut sich ein elektrisches Feld auf, das durch die Plastikfolie noch verstärkt wird. Der Kondensator speichert Ladung und Energie. Für die gespeicherte Ladung  $Q$  gilt mit  $C$  als Kapazität und  $U$  als Spannung:

$$Q = C * U.$$

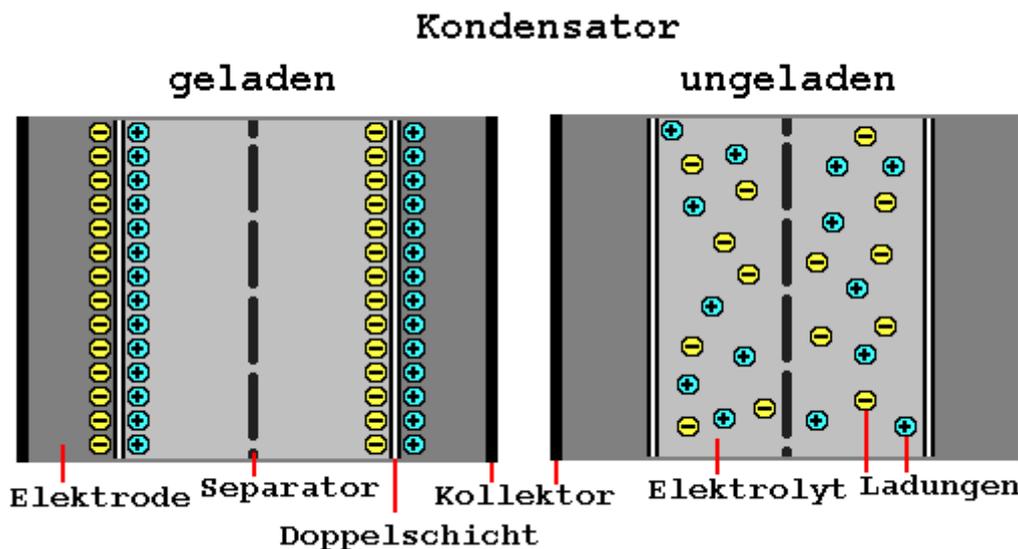
Die Kapazität eines Kondensators kann man mit  $\epsilon_0$  als elektrischer Feldkonstante wie folgt berechnen:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}.$$

Sie ist umso größer, je größer die Fläche A der Elektroden und je kleiner ihr Abstand d ist. Sie hängt außerdem von der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  der Folie ab. Für die gespeicherte Energie  $E_K$  gilt:

$$E_K = \frac{1}{2} C U^2.$$

Die Kapazität der Kondensatoren konnte in den letzten Jahren erheblich gesteigert werden durch eine besondere Beschichtung der Kollektoren mit Aktivkohle, die mit einem Elektrolyten getränkt wird (s. Abb.1). Dadurch sind Kapazitäten im Faradbereich möglich geworden, die bis vor ein paar Jahren undenkbar waren. Farad ist die Einheit der Kapazität. Bei einer Kapazität  $C = 1F$  speichert der Kondensator pro V eine Ladung  $Q = 1C$ .



**Abb.1: Aufbau eines Superkondensators**

Beide Elektroden sind durch ein Diaphragma, den Separator, getrennt, das für Ionen durchlässig ist. Es verhindert aber, dass sich die beiden gegensinnig geladenen Aktivkohleblöcke durch direkten Kontakt entladen können. Die Aktivkohle besitzt aufgrund ihrer porösen Struktur eine riesige Oberfläche, die bis zu 100.000mal größer ist als die einer glatten Fläche. So sind heute Kondensatoren mit Kapazitäten bis zu 5000 F möglich. Beim Laden bildet sich zwischen der Aktivkohle und dem Elektrolyten an beiden Polen eine Doppelschicht aus, die sehr dünn ist (s. Abb.1). Beim Entladen werden die Doppelschichten abgebaut und die Ionen des Elektrolyten verteilen sich wieder gleichmäßig über die Mittelschicht zwischen beiden Kohleblöcken. Es liegen zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren hoher Kapazität vor. Diese

Goldcaps oder Superkondensatoren, wie sie auch genannt werden, sind nicht viel größer als ein herkömmlicher Kondensator, dürfen aber nur mit Spannungen von wenigen Volt geladen werden. Ihre Energiedichte übersteigt die der herkömmlichen Kondensatoren um ein Vielfaches, wie ein Beispiel deutlich macht. Ein handelsüblicher Goldcap besitzt folgende Daten:

$$\begin{aligned}
 C &= 22F \\
 U &= 2,3V \\
 l &= 35mm \\
 d &= 18mm \\
 m &= 11,4g.
 \end{aligned}$$

Er speichert eine maximale Ladung Q

$$Q = C * U = 22F * 2,3V = 50,6C$$

und eine maximale Energie

$$E_K = \frac{1}{2} * 22F * (2,3V)^2 = 58,2J.$$

Seine volumetrische Energiedichte S beträgt

$$S = \frac{58,2J}{\pi * (0,009m)^2 * 0,035m} = 6,54MJ/m^3$$

und seine spezifische Energie

$$S = \frac{58,2J}{0,0114kg} = 5105J/kg.$$

Ein herkömmlicher Kondensator hat bei einem Durchmesser d = 16 mm und einer Länge l = 31 mm eine Kapazität C = 4,7 mF bei einer Ladespannung von U = 20 V. Damit ergibt sich für ihn eine volumetrische Energiedichte von

$$S = \frac{1/2 * 4,7 * 10^{-3}F * (20V)^2}{\pi * (0,008m)^2 * 0,031m} = 0,151MJ/m^3$$

Die Energiedichte des Golcaps ist rund 50mal größer als die eines herkömmlichen Kondensators. Gleichzeitig ist seine spezifische Energie aber immer noch um den Faktor 100 kleiner als die eines Lithiumionen-Akkus, die laut Wikipedia rund S = 0,5 MJ/kg beträgt.

## 2.5 LED

LEDs haben die herkömmlichen Leuchtmittel wie Glühbirnen und Energiesparlampen fast vollständig vom Markt verdrängt. Sie besitzen eine rund 10mal höhere Lichtausbeute als Glühbirnen und eine etwa doppelt so hohe als Energiesparlampen. Außerdem ist ihre Lebensdauer deutlich länger und es gibt sie in verschiedenen Farben. Allerdings benötigt man

aufgrund der Kennlinie eine spezielle Elektronik, um sie gefahrlos betreiben zu können. Sind sie leitend, darf die Spannung nur wenig schwanken, da sonst der Strom steil ansteigt und die LED zerstört würde. Sie werden daher mit konstantem Strom und nicht mit konstanter Spannung betrieben wie Glühlampen. Bei schlechter Dimensionierung der Elektronik kann die Lichtausbeute sinken, wie in Kapitel 4.1 gezeigt wird.

Leuchtdioden sind sehr einfach aufgebaut. Sie bestehen aus zwei Halbleiterschichten aus Silizium, die unterschiedlich dotiert sind, die eine mit Elementen der 5. Hauptgruppe des Periodensystems wie Phosphor, Stickstoff oder Arsen, die andere mit Elementen der 3. Hauptgruppe wie Bor, Gallium oder Indium. Die Elemente der 5. Hauptgruppe besitzen auf der höchsten Energiestufe fünf Elektronen, die der 3. drei Elektronen und Silizium als Element der 4. Hauptgruppe vier Elektronen. Es wandern Elektronen von der einen, negativ n-dotierten zur anderen, positiv p-dotierten Schicht. In der ersten Schicht fehlen diese Elektronen. Es bilden sich positive Ladungslöcher. In der zweiten Schicht herrscht ein Elektronenüberschuss. Sie lädt sich negativ auf. In der Grenzfläche baut sich ein elektrisches Feld auf, das den weiteren Elektronenfluss unterbindet. Erst durch Anlegen einer äußeren Spannung wird der p-n-Übergang wieder leitend. Die Elektronen und die Löcher rekombinieren. Ihre von der Spannungsquelle aufgenommene Energie wird in Form von Licht frei. Man kann LEDs vergleichen mit einem Fluss, der gestaut wird. Hinter der Staumauer reichert sich das Wasser mit Energie an, die beim Über- oder Durchströmen der Staumauer frei wird. Durch Dotierung mit einer Mischung aus verschiedenen Elementen der 3. bzw. 5. Hauptgruppe kann die Grenzspannung am p-n-Übergang auf  $U = 1,1V - 3,5V$  eingestellt werden. Wendet man die einfache Quantenbedingung an, so ergeben sich für die Grenzspannungen

$$U_1 = 1,3V$$

$$U_2 = 1,8V$$

$$U_3 = 3,5V$$

folgende Wellenlängen der abgestrahlten Photonen:

$$\lambda_1 = 956nm$$

$$\lambda_2 = 690nm$$

$$\lambda_3 = 355nm.$$

Die erste Wellenlänge liegt im infraroten, die zweite im roten und die dritte im UV-Bereich. Heute kann man LEDs in allen diesen Wellenlängenbereichen herstellen. Die Kennlinie einer idealen monochromatischen LED mit vernachlässigbarem Ohmschen Widerstand in den Zuleitungen lässt sich aufgrund der Diffusion der Ladungsträger durch die Grenzschicht durch folgende Formel beschreiben:

$$I = I_0 * \left( \exp\left(\frac{e * U - h * f}{k * \Delta T}\right) - 1 \right).$$

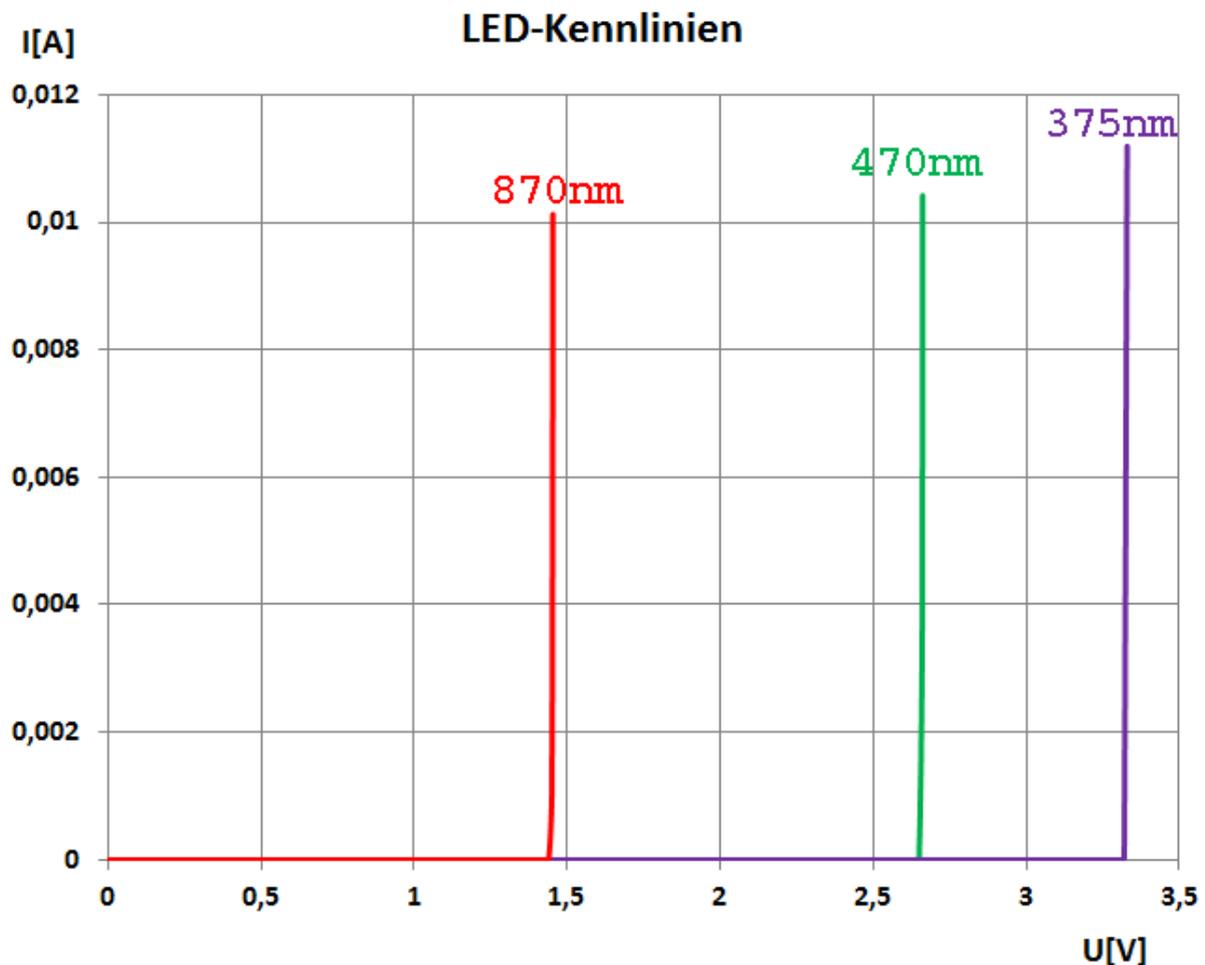
Darin bedeuten:

I: Stromstärke,

$I_0$ : Leckstrom,

e: Elementarladung,

U: Spannung,  
h: Plancksche Konstante,  
f: Frequenz des ausgesandten Lichts,  
k: Boltzmann-Konstante,  
 $\Delta T$ : Temperaturunterschied zwischen p- und n-Schicht.



**Abb.1: LED-Kennlinien für verschiedene Wellenlängen**

Eine genaue Herleitung dieser Formel finden Sie auf dieser Webseite im Skript „LEDs“. Wertet man diese Funktion für verschiedene Frequenzen bzw. Wellenlängen bei  $\Delta T = 20\text{K}$  und  $I_0 = 1 \cdot 10^{-10}\text{A}$  mit Excel aus, so erhält man die Kurven in Abb.1.

Dabei zeigt sich, dass die Formel zunächst einen kleinen negativen Strom ausweist. Es handelt sich um den Leckstrom, der erst aufgebracht werden muss, bevor ein nutzbarer Strom fließen kann. Legt man von außen eine Spannung U an, so steigt der Strom zunächst sehr langsam an, ab einer gewissen Spannung verläuft er sehr steil im positiven Bereich. Die Spannung, bei der der Anstieg beginnt, hängt von der Frequenz bzw. der Wellenlänge des Lichtes ab. Dieser Verlauf entspricht recht genau den experimentell ermittelten Kennlinien verschieden farbiger LEDs, wie die Abb.2 zeigt. Allerdings verlaufen die Kennlinien bei realen LEDs im zweiten Teil weniger steil, weil sie in den Anschlüssen einen Ohmschen Widerstand besitzen, der den Anstieg begrenzt.

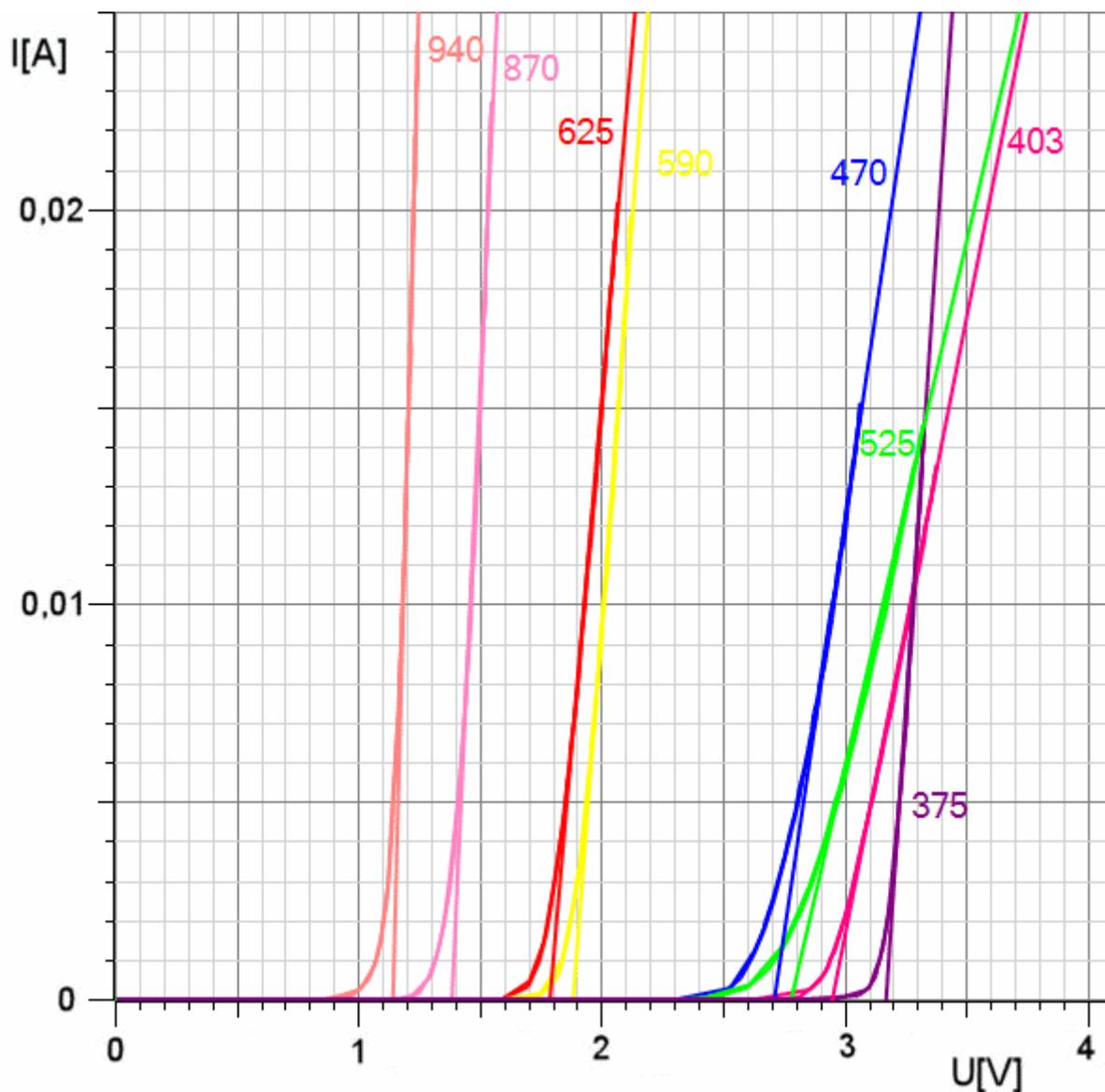


Abb.2: U/I-Kennlinien

## 2.6 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel Prozent der aufgenommenen elektrischen Energie  $W_{el}$  eines Gerätes in nutzbare Energie  $W_{nutz}$  umgewandelt wird. Die restliche Energie wird meist in Form nutzloser Wärme abgegeben. Glühlampen wandeln nur etwa 5% der elektrischen Energie in Licht um, Energiesparlampen ca. 25 % und LED-Lampen bis zu 50%. Sie haben Wirkungsgrade von 5%, 25% bzw. 50%. Die von einem Tauchsieder aufgenommene elektrische Energie wird dagegen zu nahezu 100% in die gewünschte Wärmeenergie überführt. Er hat einen Wirkungsgrad nahe 100%. Elektromotoren schaffen einen Wirkungsgrad von ca. 90%. Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist allgemein definiert als

$$\eta = \frac{W_{nutz}}{W_{el}} * 100\% = \frac{W_{nutz} * t}{W_{el} * t} * 100\% = \frac{P_{nutz}}{P_{el}} * 100\%.$$

Aus der Gleichung geht hervor, dass der Wirkungsgrad auch ermittelt werden kann, indem man die elektrische Leistung  $P_{el}$  und die Nutzleistung  $P_{nutz}$  misst.

## 2.7 Gleichrichter

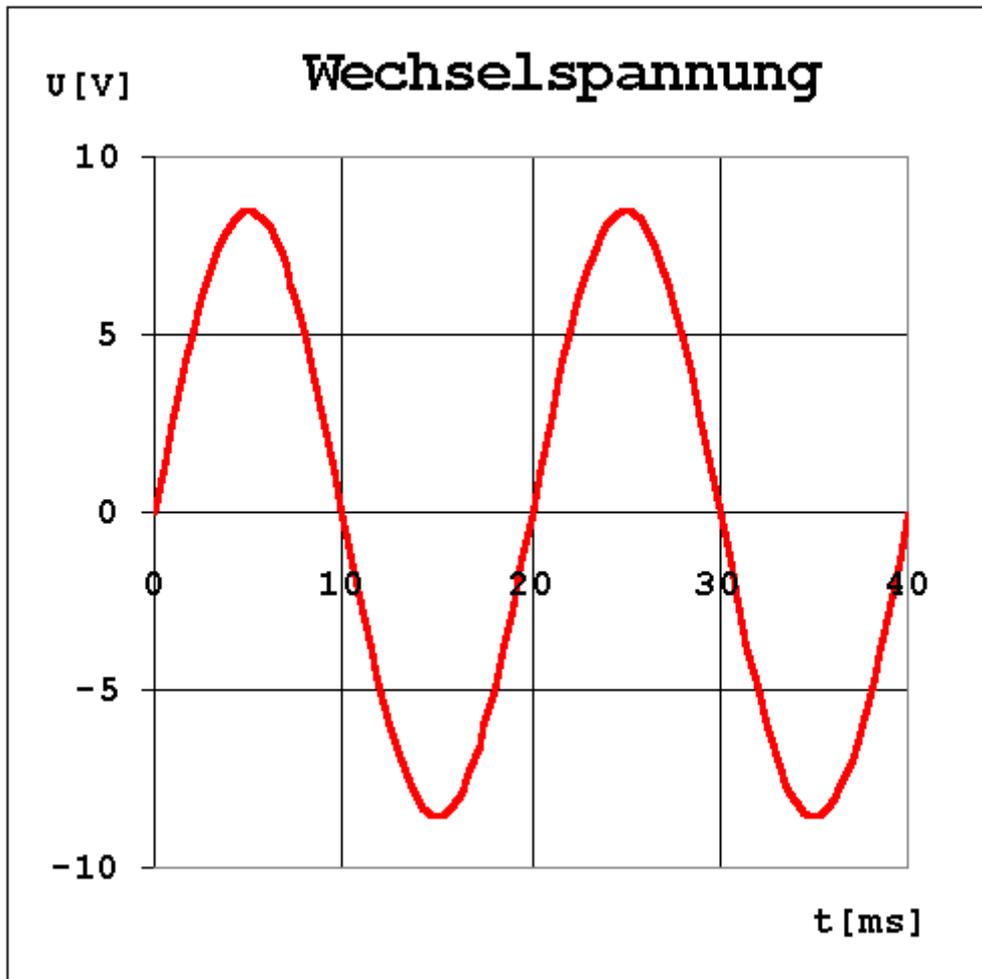


Abb.1: Sinuswechselspannung

Gleichrichter wandeln Wechselspannung (s. Abb.1) in Gleichspannung um. Das Herzstück jedes Gleichrichters ist ein Bauteil, das Strom nur in einer Richtung durchlässt, also eine der beiden Halbwellen der Wechselspannung sperrt. In modernen Gleichrichtern verwendet man fast ausschließlich Halbleiterdioden. Sie haben die Röhrengleichrichter praktisch vollständig verdrängt. Die einfachste denkbare Schaltung für einen solchen Gleichrichter zeigt Abb. 2. Man spricht von einem Einweggleichrichter, da nur eine Halbwelle der Wechselspannung ausgenutzt wird. Liegt am oberen Pol der Wechselspannungsquelle der Pluspol an, in Abb. 2 rot eingezeichnet, so leitet die Diode  $D$ , im anderen Falle sperrt sie, in Abb. 2 grün eingezeichnet.

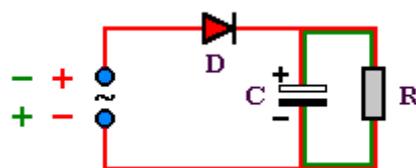
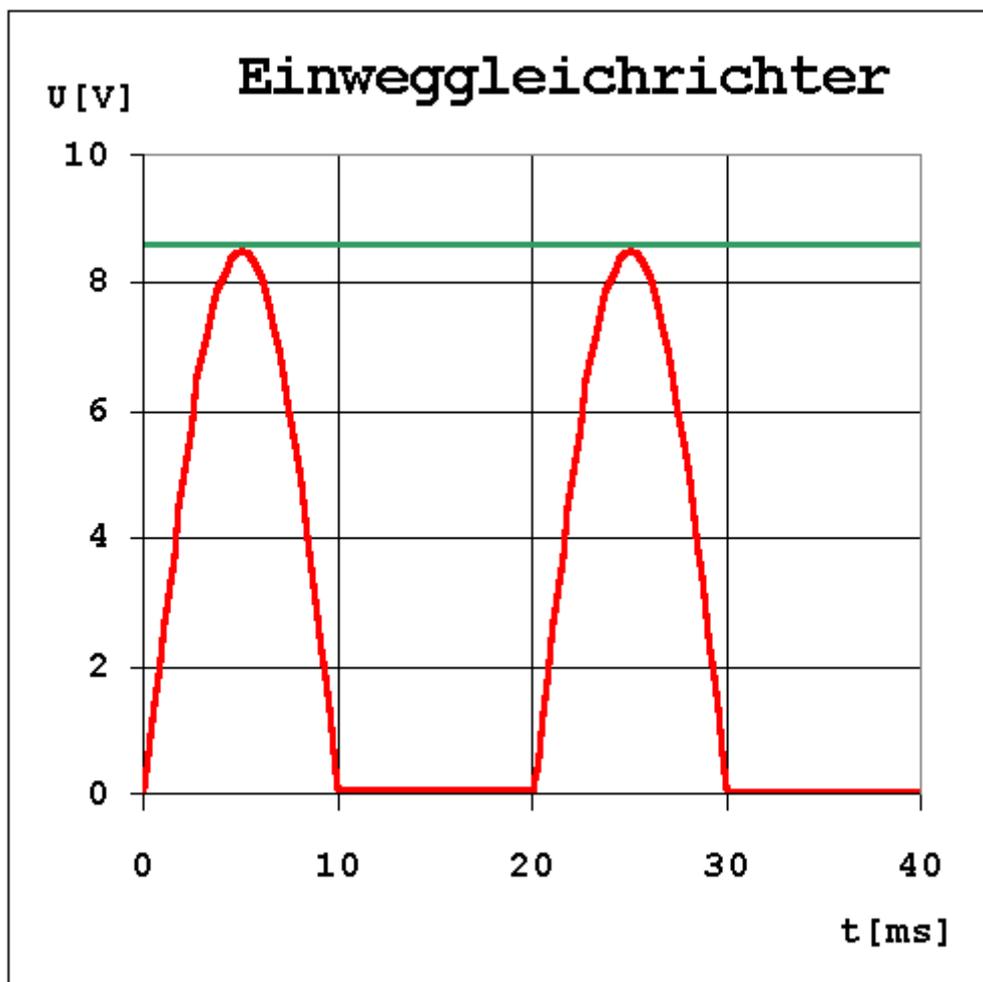


Abb.2: Einweggleichrichter

Am Verbraucherwiderstand R entsteht eine pulsierende Gleichspannung (s. Abb. 3), die durch den Kondensator C mehr oder weniger geglättet wird. Leitet die Diode, so lädt sich der Kondensator auf und durch den Lastwiderstand fließt Strom.



**Abb.3: Ausgangsspannung am Einweggleichrichter**

Sperrt die Diode, so entlädt sich der Kondensator über den Widerstand R und hält so den Strom durch den Widerstand mehr oder weniger aufrecht. Die Gleichspannung ist je nach Größe des Verbraucherwiderstandes R und des Kondensators C mehr oder weniger konstant. Hat der Verbraucher einen sehr hohen Innenwiderstand, fließt also nur wenig Strom, so besitzt die Gleichspannung einen Wert, der der Amplitude der Wechselspannung entspricht, in Abb. 3 als grüne Linie eingezeichnet. In der Praxis ist sie fast immer kleiner. Einweggleichrichter werden häufig als Demodulatoren in Empfangsschaltungen der Kommunikationstechnik eingesetzt. Darin wird die benötigte Leistung durch einen nach geschalteten Verstärker erreicht (vgl. A. Reichert: Radiosender/Radioempfänger).

Moderne Gleichrichter nutzen durch geschickten Einsatz von vier Dioden beide Halbwellen aus. So erhält man einen Zweiweggleichrichter. Abb. 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau. Liegt am oberen Pol der Wechselspannungsquelle der Pluspol an, so leiten die in Abb. 4 rot eingezeichneten Dioden, im anderen Fall die grün gekennzeichneten. Am Ausgang entsteht ohne Kondensator eine pulsierende Gleichspannung gemäß Abb. 5, die mit Hilfe eines Kondensators mehr oder weniger geglättet werden kann. Da die Wechselspannungsquelle in

beiden Halbwellen Strom liefert, kann der Kondensator bei gleicher Belastung kleiner ausgelegt werden als beim Einweggleichrichter. Die maximal abgreifbare Gleichspannung entspricht theoretisch auch in diesem Falle der Amplitude der Wechselspannung, in Abb. 5 als grüne Linie zu erkennen ist. In der Realität ist sie stets kleiner. Zweiweggleichrichter finden Verwendung in vielen Netzteilen für elektronische Kleingeräte.

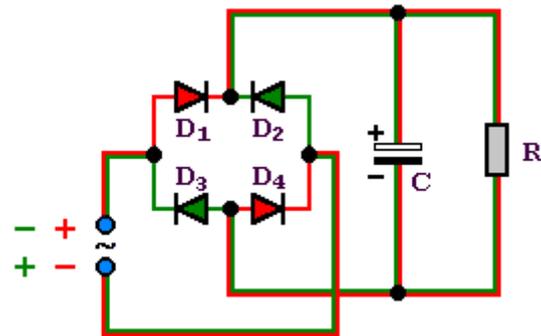


Abb.4: Zweiweggleichrichter

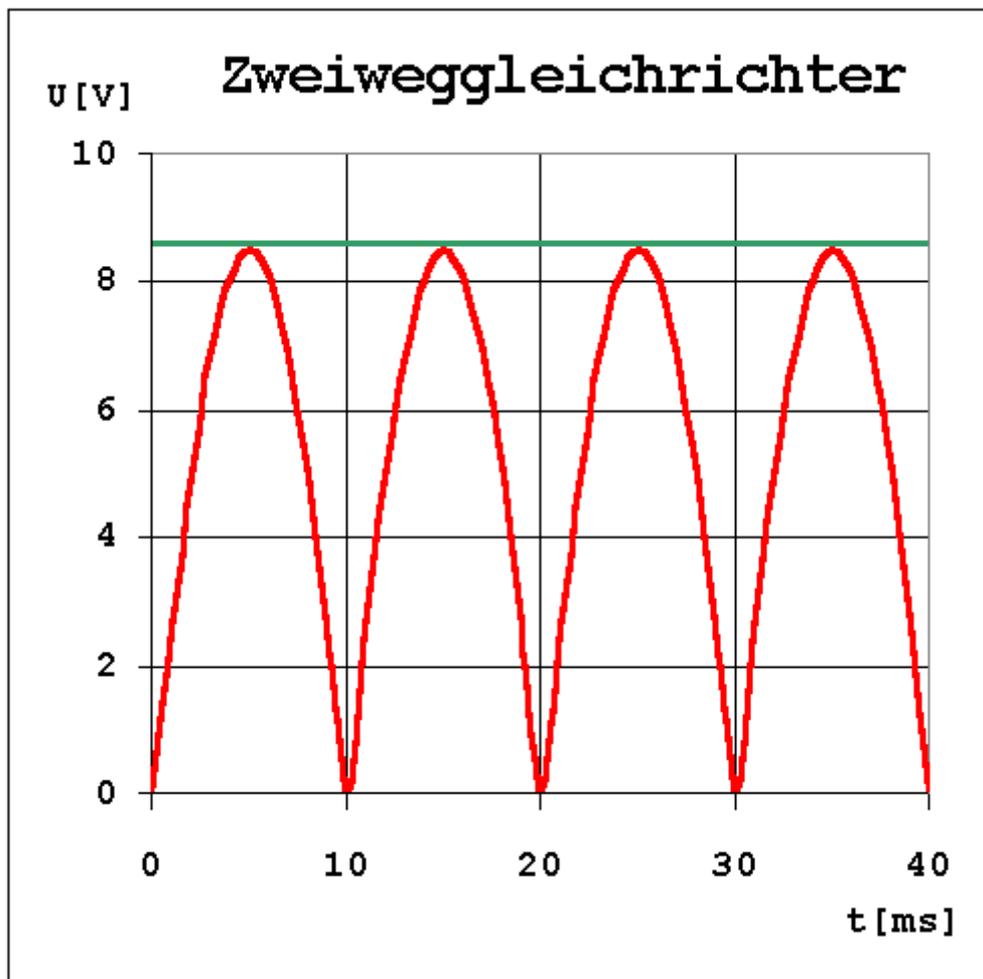


Abb.5: Ausgangsspannung am Zweiweggleichrichter

Kombiniert man zwei Dioden und zwei Kondensatoren in besonderer Weise, so erhält man einen Kaskadengleichrichter. Bei ihm ist die Ausgangsspannung größer als die Amplitude der

eingespeisten Wechselspannung, im Idealfall gleich der doppelten Amplitude. Abb. 6 zeigt den Schaltplan, Abb. 7 die Ausgangsspannung.

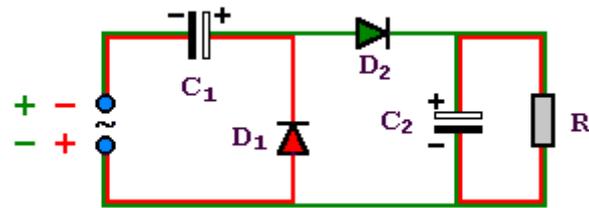


Abb.6: Einstufiger Kaskadengleichrichter

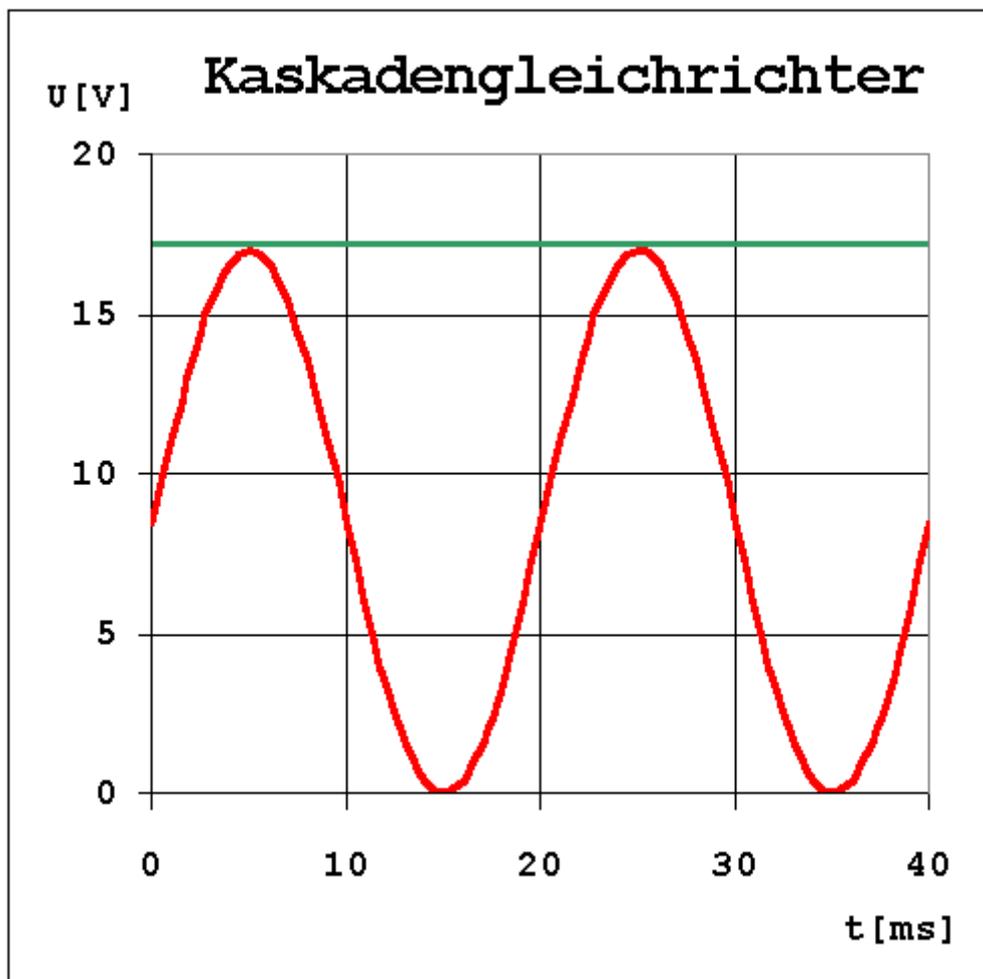
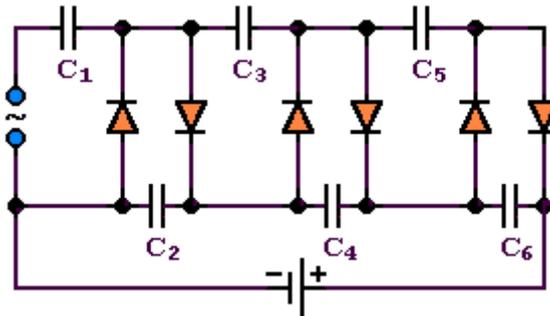


Abb.7: Ausgangsspannung Kaskadengleichrichter

Besitzt die Wechselspannung die in Abb. 6 rot eingezeichnete Polung, so leitet die Diode  $D_1$  und der Kondensator  $C_1$  lädt sich auf die Amplitude der Wechselspannung auf. Diode  $D_2$  sperrt. Kondensator  $C_2$  hält den Strom durch den Widerstand  $R$  aufrecht. In der zweiten Halbwelle ist die Wechselspannung anders herum gepolt. Diode  $D_1$  sperrt, dafür leitet Diode  $D_2$ . Der Kondensator  $C_2$  wird auf die doppelte Amplitude der Wechselspannung aufgeladen, da der Kondensator  $C_1$  als zusätzliche Gleichspannungsquelle wirkt, die mit der Wechselspannungsquelle in Reihe geschaltet ist. Zumindest ist das rein theoretisch so. Denn in Wirklichkeit gibt Kondensator  $C_1$  nicht seine gesamte Ladung an Kondensator  $C_2$  ab, da beide in Reihe geschaltet sind und sich daher die Ladung des Kondensators  $C_1$  je nach Kapazität auf beide aufteilt. Daher ist die pulsierende Ausgangsspannung in der Praxis nicht um die

Amplitude der Wechselspannung nach oben verschoben, sondern nur um einen kleineren Wert. Kombiniert man mehrere Kaskadenstufen, so lässt sich die Ausgangsgleichspannung weiter erhöhen (s. Abb. 8). Gleichzeitig sinkt die Stromstärke, die maximal entnommen werden kann.

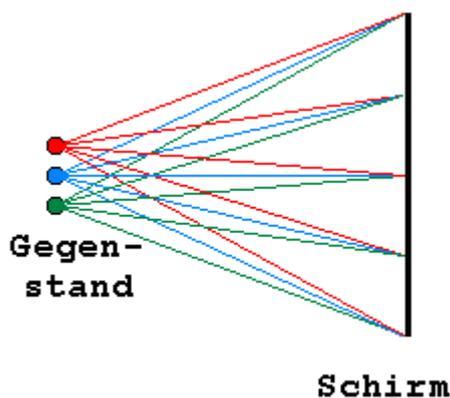


**Abb.8: Mehrstufiger Kaskadengleichrichter**

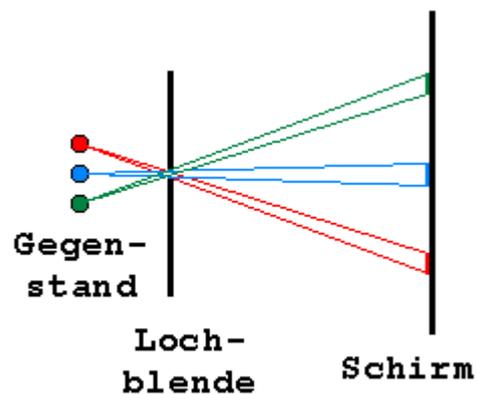
Um herauszufinden, welche Gleichrichter im Ladeteil bzw. in der Lampe des Nachtlichtes eingesetzt werden, müsste man beide öffnen. In einer elektrischen Zahnbürste, die nach dem gleichen Prinzip arbeitet, wird in der Bürste ein Einweggleichrichter und im Ladeteil ein Kaskadengleichrichter verwendet, wie im Beitrag „Aus dem Innenleben einer elektrischen Zahnbürste“ auf dieser Webseite gezeigt wird. In der LED-Anzeigelampe 1, dem Motor 1 und im Ladungsspeicher, die für die Versuche in Kapitel 4 benutzt werden, werden Zweiweggleichrichter eingesetzt. Sie gibt es als fertiges Bauteil zu kaufen. Man kann sie aber auch aus vier Dioden selbst zusammenlöten.

## 2.8 Optische Abbildung

Jeder Punkt eines leuchtenden Gegenstandes sendet ein Lichtbündel aus. Treffen die einzelnen Bündel auf einen Schirm, so überlagern sie sich und ergeben eine einheitlich ausgeleuchtete Fläche (s. Abb. 1). Sorgt man dafür, dass das Licht, das von einem Gegenstandspunkt ausgeht, nur einen Punkt auf dem Schirm anstrahlt, so erhält man ein Abbild des Gegenstandes auf dem Schirm. Das kann man einerseits erreichen, indem man aus jedem Lichtbündel durch eine Lochblende einen einzelnen Strahl ausblendet, der auf dem Schirm einen Lichtfleck hinterlässt (s. Abb. 2). Andererseits kann man die einzelnen divergenten Lichtbündel durch eine Linse in je einem Punkt sammeln (s. Abb. 3).



**Abb.1: Bestrahlung einer Fläche**



**Abb.2: Abbildung mit einer Lochblende**

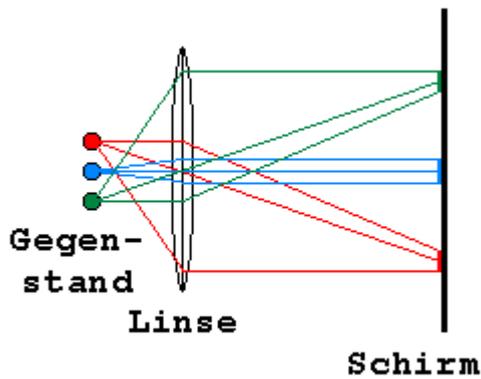


Abb.3: Abbildung mit einer Linse

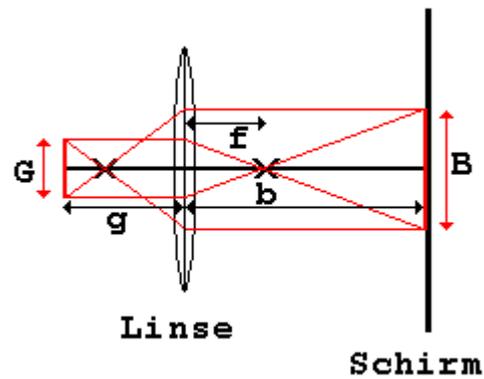


Abb.4: Abbildungsgesetze

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Weil mit einer Lochblende nur ein geringer Teil des vom Gegenstandspunkt ausgehenden Lichtes ausgenutzt wird, ist das Bild lichtschwach. Außerdem können sich die einzelnen Bildpunkte auf dem Schirm überlagern. Das Bild wird unscharf. Dafür ist der apparative Aufwand sehr gering. Die erste Kamera, mit der man Bilder erzeugen konnte, camera obscura genannt, funktionierte nach diesem Prinzip. Verwendet man eine Linse, so ist das Bild lichtstärker und beim richtigen Abstand zwischen Linse und Schirm scharf. In beiden Fällen steht das Bild auf dem Kopf und ist seitenverkehrt, da sich Licht geradlinig ausbreitet. Um auf ein aufrechtes, seitenrichtiges Bild zu erhalten, kann man eine zweite Linse benutzen, oder man hält das Bild auf einer Fotoplatte oder einem Display fest, die man bei der Betrachtung einfach umdrehen kann. Für beide Abbildungen gilt das Abbildungsgesetz:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

Darin G die Gegenstandsgröße, B die Bildgröße, g die Gegenstandsweite und b die Bildweite (s. Abb. 4). Verwendet man eine Linse, so gilt außerdem die Linsengleichung mit f als Brennweite der Linse:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

In vielen Geräten werden Bilder mit Linsen, Objektive genannt, erzeugt, etwa im Beamer, im Diaprojektor, im Auge, in Kameras, in Ferngläsern usw. Moderne Zoomobjektive bestehen meist aus zahlreichen Linsen, um die Brennweite an die räumlichen Verhältnisse anpassen zu können und um Abbildungsfehler wie Verzerrungen und Farbfehler zu vermeiden.

## 2.9 Beugung

Stellt man in eine ebene räumlich begrenzte elektromagnetische Welle mit einheitlicher Frequenz eine schmale Spaltblende, deren Breite im Bereich der Wellenlänge der EM-Welle liegt, so beobachtet man hinter der Blende eine kreisförmige Wellenfront. Auf einem Schirm hinterlässt sie einen kreisförmigen Fleck, der einen größeren Durchmesser hat als das ursprüngliche Wellenbündel. Er ist rechts und links von Stellen umgeben, in denen man keine Teilwelle empfangen kann. Dazwischen liegen Stellen, an denen Empfang möglich ist. Diese

Bereiche heißen Minima und Maxima. Man sagt, die EM-Welle wurde beim Durchgang durch die Blende gebeugt. Nach Huygens ist jeder Punkt des Spaltes Ausgangspunkt einer Elementarwelle, die sich überlagern und ein Interferenzmuster ergeben, das sich durch Maxima und Minima auszeichnet. Enthält die Blende mehrere Spaltöffnungen, so interferieren die Elementarwellen aller Spalte miteinander und ergeben ein Interferenzmuster mit Maxima und Minima. Diese Muster lassen sich berechnen, wenn man die Intensität der einzelnen Elementarwellen unter Berücksichtigung ihrer Phasenverschiebung addiert. Die Herleitung der so erhaltenen Formel findet man in vielen Hochschullehrbüchern<sup>2)</sup>. Das Ergebnis lautet:

$$I = I_0 * \left( \frac{\sin(\pi b \sin \frac{\alpha}{\lambda}) * \sin(n\pi g \sin \frac{\alpha}{\lambda})}{\pi b \sin \frac{\alpha}{\lambda} * \sin(\pi g \sin \frac{\alpha}{\lambda})} \right)^2.$$

Darin bedeuten:

I: Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel  $\alpha$

$I_0$ : Intensität bei  $\alpha = 0^\circ$

b: Breite eines Spaltes in m

g: Abstand zweier Spalte in m

$\lambda$ : Wellenlänge in m

n: Anzahl der Spalte.

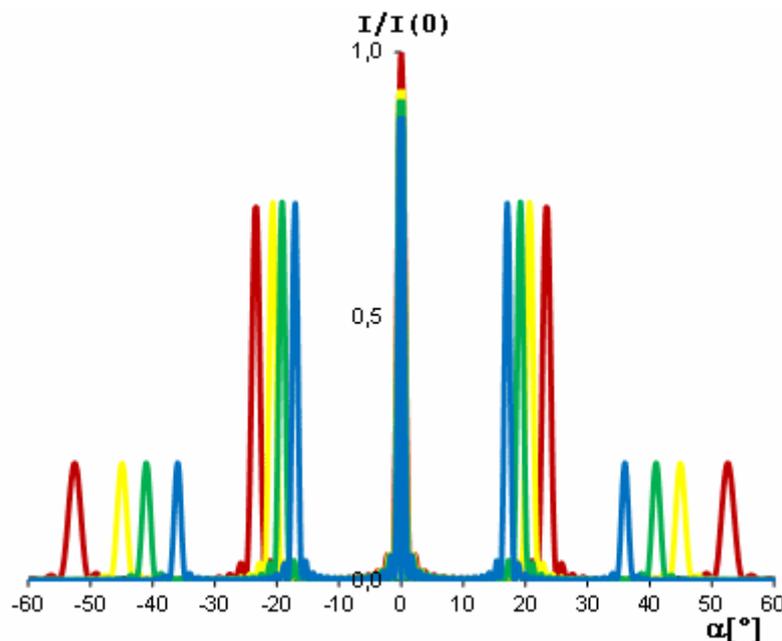


Abb.1: Auswertung mit Excel

Auswerten lässt sich die sehr komplizierte Formel nur mit Computerprogrammen, etwa Excel. Man kann für verschiedene Spaltanzahlen, Spaltbreiten, Spaltabstände und Wellenlängen die Intensitätsverteilung berechnen und graphisch darstellen, bei Bedarf auch für mehrere Wellenlängen gleichzeitig, etwa bei weißen Lichtquellen (s. Abb. 1). Man erkennt, dass die Winkel, unter denen Maxima und Minima auftreten, von der Wellenlänge der EM-Welle abhängen. Blaues Licht wird weniger gebeugt als rotes Licht. Weißes Licht wird bei Beugung und Interferenz in seine Farben aufgespalten. Nur das Hauptmaximum erscheint weiß, da sich dort alle Farben überlagern.

Mit einfachen geometrischen Überlegungen, wie man sie in jedem Physikoberstufenbuch<sup>1)</sup> findet, lassen sich Formeln herleiten für die Winkel, unter denen man Maxima und Minima beim Spalt, Doppelspalt und Gitter beobachtet. Sie werden in der Schule meist benutzt, um die Wellenlänge verschiedener EM-Wellen zu bestimmen. Die Überlegungen lassen sich am einfachsten am Beispiel des Doppelspaltes erläutern. Betrachten Sie dazu Abb. 2. Die Ziffern 1 und 2 bezeichnen die Wellennormalen der Elementarwellen, die von den Mitten der beiden Spalte ausgehen. Man liest ab:

$$\sin \alpha = \frac{s}{g}$$

$$\tan \alpha = \frac{z}{l}$$

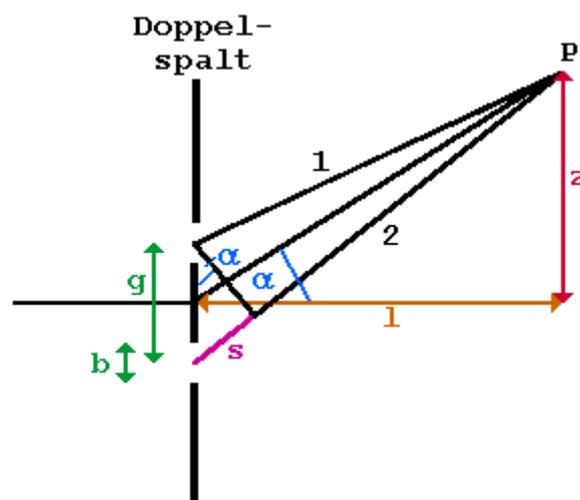


Abb.2: Beugung am Doppelspalt

Damit sich die beiden Elementarwellen im Punkt P verstärken, muss für ihren Gangunterschied  $s$

$$s = k * \lambda$$

gelten mit,

$$k = 0,1,2,3...$$

Damit sie sich auslöschen, muss

$$s = (2k - 1) * \lambda/2$$

sein mit

$$k = 1,2,3...$$

Für die anderen Elementarwellen der beiden Spalten gelten die gleichen Bedingungen, wenn man die jeweils passenden Elementarwellen beider Spalte miteinander kombiniert. Damit beobachtet man Maxima unter Winkeln, für die gilt:

$$\sin \alpha_k = k * \frac{\lambda}{g}$$

$$\tan \alpha_k = \frac{z}{l}$$

und Minima unter Winkeln, für die gilt:

$$\sin \alpha_k = (2k - 1) * \frac{\lambda}{2g}$$

$$\tan \alpha_k = \frac{z}{l}$$

Darin bedeuten:

$\alpha_k$ : Winkel des Nebenmaximums/Nebenminimums k.Ordnung

k: Ordnung des Nebenmaximums/Nebenminimums

$\lambda$ : Wellenlänge

g: Gitterkonstante

z: Abstand des Nebenmaximums/Nebenminimums vom Hauptmaximum

l: Entfernung Gitter-Schirm.

Die gleichen Formeln ergeben sich für die Beugung an einem Gitter aus einer Vielzahl von Spalten.

Beugung tritt auch auf, wenn eine schmale ebene EM-Welle an einem Gegenstand mit schmalen Stegen, die wie bei einer CD nahe beieinanderliegen, reflektiert wird. Es gelten die gleichen mathematischen Gesetze wie bei der Beugung an einem Transparenzgitter. Nach Huygens breiten sich die Elementarwellen in alle Richtungen aus, also auch rückwärts in Richtung des einfallenden Strahles. Daher beobachtet man bei einem durchscheinenden Gitter aus Glas ein Transparenz- und ein Reflexionsspektrum.

## 2.10 Brechung

Geht eine ebene EM-Welle von einem Medium in ein anderes über, so ändert sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit. Das hat zur Folge, dass sie aus ihrer Richtung abgelenkt wird. Sie wird gebrochen. Der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Lot, Einfallswinkel genannt, und zwischen dem gebrochenen Strahl und dem Lot, als Brechungswinkel bezeichnet, sind nicht gleich. Mit Hilfe der Huygenschen Prinzipien lässt sich ein Gesetz herleiten, das den Vorgang quantitativ beschreibt, das Brechungsgesetz. Es lautet:

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

Darin bedeuten:

$\alpha$ : Einfallswinkel

$\beta$ : Brechungswinkel

$c_1$ : Wellengeschwindigkeit im 1. Medium

$c_2$ : Wellengeschwindigkeit im 2. Medium

$n$ : Brechungsindex.

Die Herleitung findet man in jedem Physikoberstufenbuch<sup>1)</sup>. Da die Geschwindigkeit der EM-Wellen in vielen Stoffen auch von der Wellenlänge abhängt, wird z.B. weißes Licht bei der Brechung in seine Farben aufgespalten. Diese Erscheinung nennt man Dispersion. Sie lässt sich experimentell am einfachsten mit einem Prisma zeigen. Ist die Geschwindigkeit im zweiten Medium größer als im Medium, aus dem die EM-Welle auf die Grenzfläche trifft, so übersteigt der Brechungswinkel den Einfallswinkel. Die Wellennormale wird vom Lot weg gebrochen und nicht wie beim umgekehrten Vorgang zum Lot hin. Ab einem bestimmten Einfallswinkel müsste der Brechungswinkel größer als  $90^\circ$  sein, die EM-Welle tritt nicht mehr ins zweite Medium ein, sondern verbleibt im ersten. Sie wird an der Grenzfläche nach dem Reflexionsgesetz reflektiert. Da ein Teil der EM-Welle auch schon bei kleineren Winkeln an der Grenzfläche reflektiert wird, spricht man ab dem Grenzwinkel von Totalreflexion. Sie wird z.B. in Lichtleitern ausgenutzt. Für den Grenzwinkel der Totalreflexion gilt nach dem Brechungsgesetz mit  $\alpha = 90^\circ$

$$\sin \beta_g = \frac{1}{n},$$

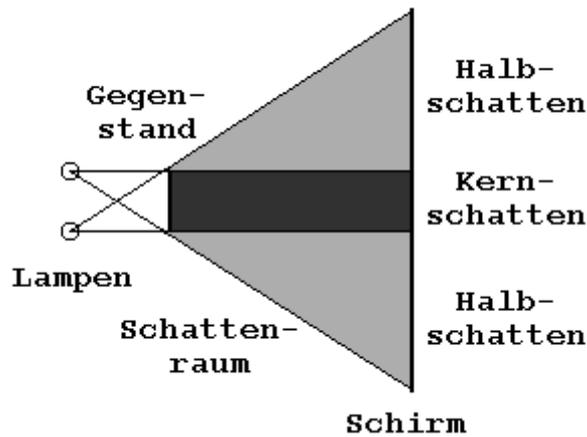
denn der Lichtweg ist umkehrbar. Für den Übergang Glas-Luft gilt das gleiche Gesetz wie für den Übergang Luft-Glas. Es sind nur die Winkel vertauscht.  $\beta$  entspricht im Gesetz dem Einfallswinkel,  $\alpha$  dem Brechungswinkel.

## 2.11 Schatten

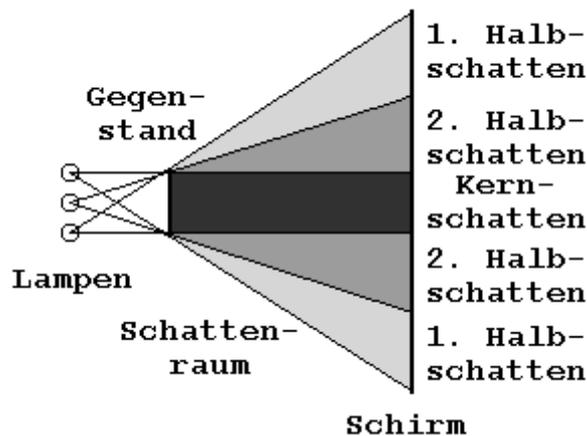
Licht ist eine elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge zwischen 400 nm und 800 nm. Eine ebene schmale Lichtwelle kann man sich wie einen Strahl vorstellen, der sich geradlinig ausbreitet. Lichtstrahlen können nicht alle Stoffe durchdringen. Sie werden von einigen ganz oder teilweise absorbiert. Hinter Gegenständen aus diesen Stoffen kommt kein Licht oder weniger Licht an. Es entsteht ein Schattenraum, der nur durch Streulicht und damit weniger hell ausgeleuchtet ist als die Umgebung. Stellt man in diesen Schattenraum einen Schirm, so beobachtet man auf ihm ein Abbild des Schattenraumes, das Schattenbild. Das Schattenbild ist umso größer, je näher sich der Gegenstand an der Lampe befindet, je größer er ist und je weiter der Schirm vom Gegenstand entfernt ist. Der Schatten ist besonders scharf oder hart, wenn man eine punktförmige Lichtquelle benutzt. Solche Lampen werden bei Schattenspielen eingesetzt.

Benutzt man gleichzeitig zwei Lampen, die nahe beieinander liegen, so tritt ein Kernschatten und rechts und links davon je ein Halbschatten auf (s. Abb. 1). In den Kernschattenbereich fällt kein Licht, da er im Schattenraum beider Lampen liegt. Den oberen Halbschatten erreicht das Licht der oberen Lampe, nicht aber das der unteren Lampe. Beim unteren Halbschatten ist es genau umgekehrt. Liegen die beiden Lampen weit auseinander oder ist der Gegenstand klein gegenüber dem Abstand der beiden Lampen, so beobachtet man keinen Kernschatten. Die beiden Halbschatten überlagern sich nicht. Erhöht man die Zahl der Lampen auf drei, so kommen neue hellere Halbschatten hinzu (s. Abb. 2). Der Kernschatten ist

nach wie vor dunkel, da ihn das Licht keiner Lampe erreicht. Die nahe am Kernschatten liegenden, dunkleren Halbschatten werden nur vom Licht einer Lampe ausgeleuchtet, die nach außen angrenzenden, helleren von jeweils zwei der drei Lampen. Die Umgebung ist hell, da sie vom Licht aller drei Lampen angestrahlt wird.



**Abb.1: Schatten zweier Lampen**



**Abb.2: Schatten dreier Lampen**

Ausgedehnte Lichtquellen werfen unscharfe, weiche Schatten, da man sich die Lichtquelle aus vielen nebeneinander liegenden Lichtpunkten zusammengesetzt denken kann. Es entsteht ein Schatten, der von der Mitte aus nach beiden Seiten allmählich heller wird. Eine scharfe Schattengrenze ist nicht mehr zu erkennen. Solche Schatten sind bei der Deckenbeleuchtung erwünscht, da die scharfen Schatten punktförmiger Lichtquellen das Wohnklima sehr stören. Daher verwendet man gerne Mattglaslampen oder LED-Clusterlampen aus einer Vielzahl von LEDs.

Benutzt man zwei farbige Lampen, so erscheint der Hintergrund in der Mischfarbe, der Kernschatten schwarz. Der obere Halbschatten hat die Farbe der oberen Lampe, der untere die der unteren Lampe. In Abb. 3 sehen Sie die Ergebnisse für die Farbkombinationen rot, grün und blau.

Verwendet man gleichzeitig drei Lampen in den Farben rot, grün und blau, die auf einer Linie angeordnet sind, so beobachtet man je nach Anordnung der Lampen Halbschatten in den Farben rot, grün, blau, magenta, cyan oder gelb (s. Abb. 4). Der rote, grüne bzw. blaue Halbschatten entsteht da, wo nur das Licht der roten, grünen bzw. blauen Lampe hinfällt. Einen cyanfarbenen Halbschatten beobachtet man, wenn sich das Licht der grünen und blauen Lampe überlagert, einen magentafarbenen an der Stelle, wo sich die roten und blauen Strahlen treffen. In einem gelben Halbschatten vermischen sich das rote und das grüne Licht. Der Kernschatten ist schwarz und die Umgebung weiß, da die drei Grundfarben bei gleicher Helligkeit weiß ergeben.

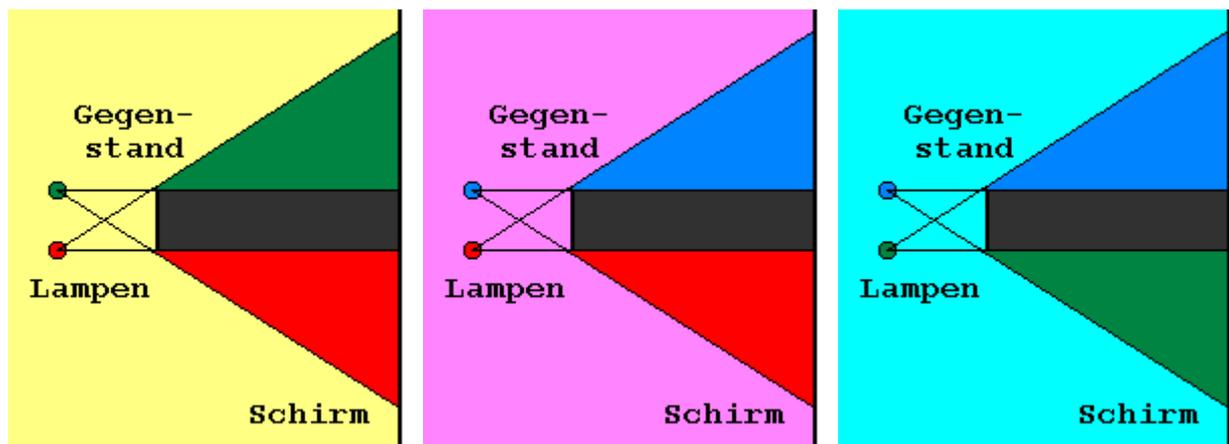


Abb.3: Schatten zweier farbiger Lampen

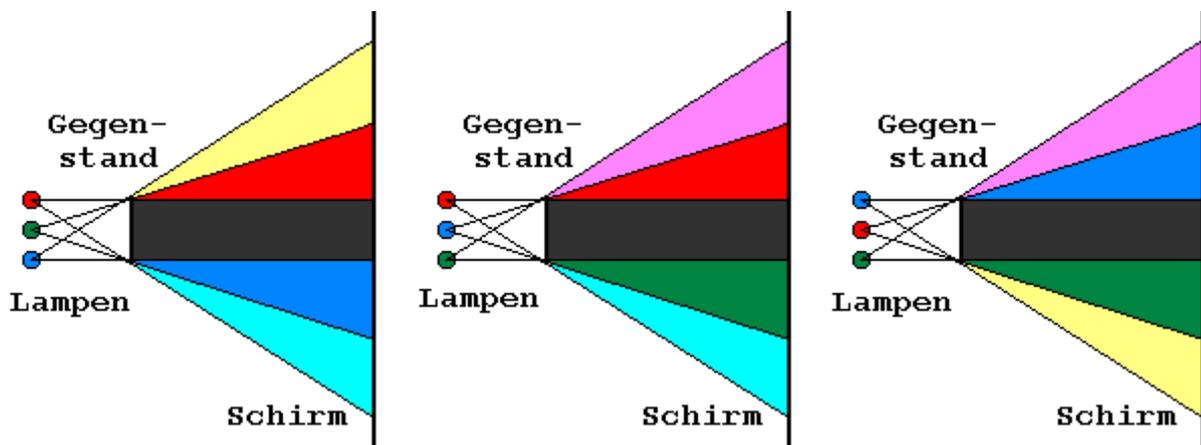


Abb. 4: Schatten dreier farbiger Lampen

Ordnet man die Lampen in der Form eines Dreieckes an, so ist der Kernschatten gleichzeitig von sechs Halbschatten in den genannten Farben umgeben.

Steht die Schatten werfende Fläche parallel zum Schirm und erzeugt man den Schatten mit einer punktförmigen Lichtquelle, so gilt für die Größe  $S$  des Schattenbildes auf dem Schirm folgende einfache geometrische Beziehung (s. Abb. 5):

$$\frac{S}{G} = \frac{s}{g}$$

Darin ist  $G$  die Höhe bzw. Breite des Gegenstandes, der den Schatten erzeugt und  $S$  die Höhe bzw. die Breite des Schattenbildes. Mit  $s$  ist die Entfernung des Schattenbildes von der Lichtquelle und mit  $g$  die Entfernung Lichtquelle Gegenstand gemeint.

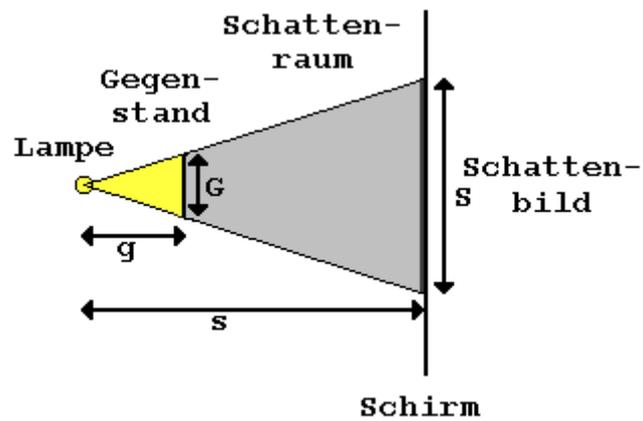
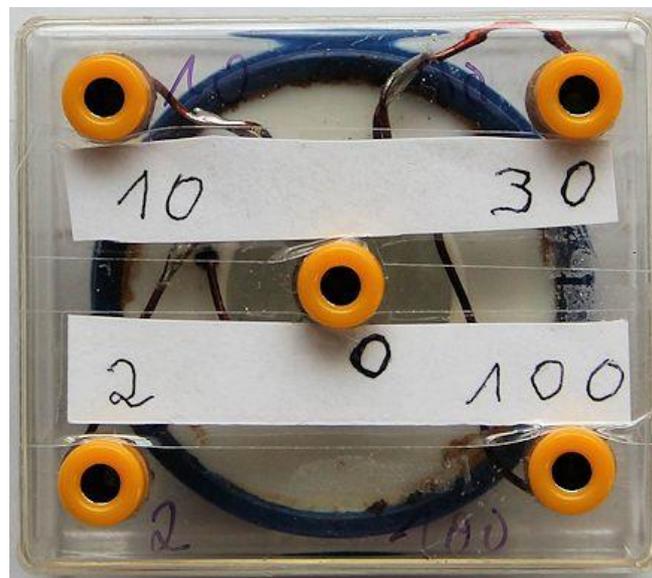


Abb.5: Schattengesetz

### 3. Zusatzgeräte

#### 3.1 Spule

Ein Blick ins Innere des Ladeteils einer Zahnbürste oder LED-Nachttischlampe verrät, dass es eine Oszillatorschaltung enthält. Den Aufbau einer solchen Schaltung habe ich im Skript „Aus dem Innenleben einer elektrischen Zahnbürste“ genauer untersucht. Um die Frequenz messen zu können, könnte man das Ladeteil öffnen. Da solche Messungen nicht ungefährlich sind und auf keinen Fall von Schülern durchgeführt werden dürfen, greift man die Spannung über eine selbst gewickelte Spule induktiv ab. Will man zusätzlich das Spannungsgesetz des Transformators überprüfen, sollte die Spule mehrere Abgriffe mit unterschiedlichen Windungszahlen besitzen. Abb. 1 zeigt, wie eine solche Spule aussehen kann.



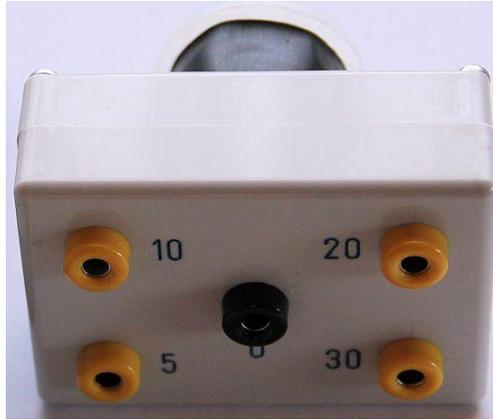
**Abb.1: Spule**

Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Plastikdose der Größe 70x65x30 mm mit Deckel
- 5 gelbe Telefonbuchsen
- 5 Lötösen
- 1 Rolle,  $\varnothing$  5cm
- 1 Cuttermesser
- ca. 12m lackierten Kupferdraht  $\varnothing$  1 mm oder 0,5 mm
- Tesafilm

Zunächst bohrt man sich in den Deckel der Dose fünf Löcher mit einem Durchmesser von 8mm, je eines an den vier Ecken und in der Mitte des Deckels. Dann verschraubt man die Telefonbuchsen am Deckel. Zwischen die beiden Schrauben legt man je eine Lötöse. In die obere Deckplatte der Rolle bohrt man sich fünf Löcher mit einem Durchmesser von 2mm. Durch sie werden die Enden des Drahtes geführt. Man steckt den Anfang des Drahtes durch ein Loch in der Spule und wickelt auf die Spule 2 Windungen. Man führt das Ende durch ein zweites Loch der Spule nach außen. Dann wickelt man weiteren Draht auf die Spule, bis man insgesamt 10 Windungen hat. Man führt das Ende des Drahtes durch ein weiteres Loch nach außen. Man wiederholt den Vorgang für insgesamt 30 bzw. 100 Windungen. Man entfernt

mit dem Cuttermesser die Lackierung an den freien Enden des Drahtes und verlötet sie über die Lötösen mit den Telefonbuchsen. Man verschließt den Deckel und verklebt Boden und den Deckel mit einem Tesastreifen, damit sich die Dose nicht aus Versehen öffnen kann. Hat man einen Spulenkörper, der genau in die Ladetasche des Ladeteils passt, so sieht die Spule wie in Abb. 2 aus.



**Abb.2: Spule mit passendem Spulenkörper**

Da man sie ins Ladeteil steckt, kommt man mit etwa 30 Windungen aus. Die Spannung bei der größten Windungszahl sollte  $U = 3,5 - 4V$  nicht übersteigen, damit die LED-Anzeigelämpchen nicht durchbrennen. Herr Utermoehle, der Vater der Kollegin Julia Hoche hat mir diese Spule eigens mit seiner Wickelmaschine hergestellt. Sie bietet Vorteile beim Experimentieren, da sie beim Messen nicht verrutschen kann.

### 3.2 Ladungsspeicher

Da das Nachtlicht auch als Taschenlampe benutzt werden kann, muss es einen Ladungsspeicher enthalten. In Frage kommen ein Lithiumionenakku oder ein Superkondensator. Die Ladekapazität eines Superkondensators ist allerdings zu gering, um 15 LEDs 1,5 Stunden zum Leuchten zu bringen, wie in der Bedienungsanleitung angegeben. Daher enthält die Lampe einen Lithiumionenakku. Wie er aufgebaut ist, können Sie auf dieser Webseite im Skript „Galvanische Elemente“ nachlesen. Er kann im Gegensatz zum Kondensator allerdings nicht beliebig oft geladen werden, so dass die Taschenlampe irgendwann unbrauchbar wird. Um zu zeigen, dass man mit der Ladestation einen Ladungsspeicher aufladen kann, baut man sich eine Speichereinheit mit einem Superkondensator selbst, mit der man drei kleine Elektrogeräte wie eine rote LED, einen Solarmotor oder über einen Schaltregler eine weiße LED einige Zeit betreiben kann. Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Superkondensator 22F/2,3V
- 1 schwarze Telefonbuchse
- 1 rote Telefonbuchse
- 2 gelbe Telefonbuchsen
- 6 Dioden 1N4001
- 1 Widerstand 22 $\Omega$
- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 1 Stück Lochrasterplatine 35x35mm
- 4 Lötösen
- 2 Schrauben 10x2mm
- 2 Muttern 2mm

4 Unterlegscheiben für 2mm Schrauben  
Lötmaterial

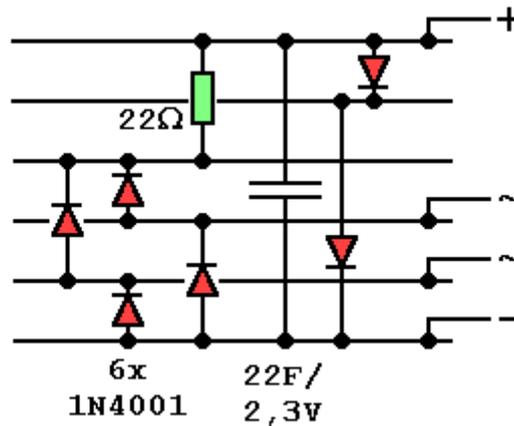


Abb.1: Schaltplan



Abb.2: Ladungsspeicher

Zunächst verlötet man die sechs Dioden und den Kondensator auf der Lochrasterplatine gemäß dem Schaltplan in Abb. 1. Dabei wird der Kondensator von der nicht beschichteten Seite der Platine, die Dioden von der beschichteten Seite verlötet. So kann man die Platine ins Gehäuse einbauen, wobei der Kondensator aus dem Gehäusedeckel herausragt (s. Abb. 2). Dann bohrt man sich in der unteren Hälfte des Gehäusedeckels an den vier Ecken eines Quadrates der Seitenlänge 2x2 cm vier Löcher mit einem Durchmesser von jeweils 8mm. Im oberen Bereich bohrt und feilt man ein Loch von 20 mm Durchmesser, so dass der Kondensator hindurchpasst. In die Platine bohrt man auf zwei diagonal gegenüber liegenden Ecken zwei Löcher mit einem Durchmesser von 3mm. Man steckt den Kondensator durch das 20mm-Loch und überträgt die Löcher in der Platine von innen auf den Gehäusedeckel. Man

bohrt an den markierten Stellen zwei 3mm Löcher in den Deckel. Anschließend verschraubt man die Telefonbuchsen mit je einer Lötöse am Deckel, ebenso die Platine mit den Schrauben, Muttern und den Unterlegscheiben.

Dann verlötet man die Ausgänge der Platine über die Lötösen mit den Buchsen, die beiden Wechselstromanschlüsse mit den gelben, den Pluspol des Kondensators mit der roten und den Minuspol mit der schwarzen Buchse. Man verschließt das Gehäuse mit den beiliegenden Schrauben. Abb. 2 zeigt den fertigen Ladungsspeicher. Er kann mit Hilfe der Spule aus Kapitel 3.1 über die gelben Buchsen am Ladeteil des Nachtlichtes geladen werden. Die beiden Dioden parallel zum Superkondensator verhindern ein Überladen des Kondensators. Zur Sicherheit sollte man die Spannung mit einem Voltmeter an der schwarzen und roten Buchse kontrollieren, damit sie  $U = 2,3V$  nicht übersteigt. Sonst könnte der Kondensator Schaden nehmen.

### 3.3 LED-Anzeigelampen

Mit der ersten selbstgebauten LED-Lampe kann man zeigen, dass Energie induktiv vom Ladegerät auf die LED-Lampe übertragen wird. Dazu wird die hochfrequente Wechselspannung mit einem Gleichrichter gleichgerichtet und mit einem Kondensator geglättet. Für die Lampe benötigt man folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 1 weiße LED
- 1 LED-Fassung verchromt
- 2 Telefonbuchsen gelb
- 2 Lötösen
- 1 Kleingleichrichter
- 1 Kondensator  $100\mu F/35V$
- Lötmaterial

Baut man sich den Gleichrichter selbst zusammen, so braucht man statt des Gleichrichters

- 4 Dioden 1N 4148
- 2 Schrauben 10x2mm
- 4 Muttern 2mm
- 1 Stück Lochrasterplatine 30x20mm
- Schaltlitze

Für den selbstgebauten Gleichrichter sieht die bestückte Platine wie folgt aus.

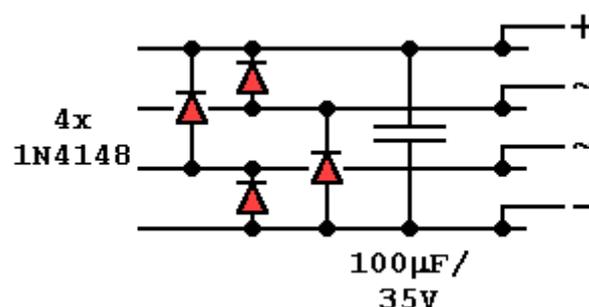


Abb.1: Schaltplan



**Abb.2: LED-Anzeigelampe 1**

Man bohrt ins Gehäuse drei 8mm-Löcher, zwei auf einer Stirnseite und eins auf der Vorderseite 1,5 cm vom oberen Rand entfernt. Man setzt die LED in die Fassung ein und verschraubt sie am Gehäuse. Die beiden Telefonbuchsen werden auf der Stirnseite befestigt. Zwischen die beiden Muttern der Buchsen legt man jeweils eine Lötöse. Verwendet man einen selbstverlöteten Gleichrichter, so befestigt man die Platine mit zwei kleinen Schrauben und 4 Muttern am Gehäuse. Dabei legt man zwischen Gehäuse und Platine je eine Mutter, damit die Lötunkte nicht verbogen werden. In beiden Fällen verlötet man die Schaltlitzen der Wechselstromanschlüsse mit den Lötösen der gelben Telefonbuchsen, die Schaltlitze des Pluspols mit dem langen Beinchen der LED und die Litze des Minuspols mit dem kurzen (s. Abb. 1). Parallel zur LED verlötet man beim fertigen Gleichrichter zusätzlich den Kondensator, wobei man auf die richtige Polung achten muss. Beim selbstgebaute Gleichrichter ist bereits die Platine mit ihm bestückt. Man testet die Lampe wie in Versuch 2 in Kapitel 4.1 beschrieben. Wenn sie leuchtet, verschließt man das Gehäuse. Abb. 1 zeigt die fertige LED-Anzeigelampe 1.

Der in Kapitel 3.2 vorgestellte Ladungsspeicher darf maximal mit  $U = 2,3 \text{ V}$  geladen werden. Diese Spannung reicht nicht aus, um eine weiße LED zum Leuchten zu bringen, deren Betriebsspannung etwa  $U = 3 \text{ V}$  beträgt. Man benötigt einen Schaltregler, der die Spannung von  $U = 0,9 \text{ V} - 1,9 \text{ V}$  auf eine konstante Spannung von etwa  $U = 3 \text{ V}$  erhöht. Man kann ihn sich selbst zusammenbauen, wie ich im Skript „Optoelektronik“ auf dieser Webseite beschrieben habe. Einfacher ist es, sich das fertige Modul zu kaufen. Da es durch eine falsche Polung zerstört werden kann, sollte man es eingangsseitig durch eine Freilaufdiode und einen kleinen Vorwiderstand von  $R = 1 \Omega$  schützen. Für die Lampe benötigt man folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 70x50x25mm
- 1 weiße LED
- 1 Diode 1N4001
- 1 Widerstand  $1\Omega$ , 0,25W
- 1 LED-Fassung verchromt
- 2 Telefonbuchse schwarz
- 2 Telefonbuchse rot
- 2 Telefonbuchse blau
- 2 Lötösen
- 1 Vorschaltmodul „Low Voltage“ für weiße LEDs
- Lötmaterial

Man bohrt ins Gehäuse drei 8mm-Löcher, zwei auf der unteren Stirnseite und eins auf der Vorderseite 1,5 cm vom oberen Rand entfernt. Möchte man mit einem Messwerterfassungssystem die Funktionsweise des Schaltreglers überprüfen, so muss man 3 weitere 8mm-Löcher für die Messbuchsen auf der Vorderseite des Gehäuses bohren, etwa unterhalb der LED. Man setzt die LED in die Fassung ein und verschraubt sie am Gehäuse. Die Telefonbuchsen werden auf der Stirnseite bzw. der Vorderseite befestigt. Zwischen die beiden Muttern der Buchsen legt man jeweils eine Lötöse. Die schwarze Buchse ist für den Minuspol, die rote für den Pluspol der Versorgungsspannung vorgesehen. Die blaue Messbuchse ist für den gemeinsamen Minuspol des Volt- und Amperemeters, die schwarze für den Pluspol des Amperemeters und die rote für den Pluspol des Voltmeters bestimmt. Man verlötet die Anschlusslitzen des Moduleinganges mit den Lötösen der schwarzen und roten Versorgungsbuchse an der Stirnseite des Gehäuses. Dabei muss man auf die richtige Polung achten. Den Pluspol des Modulausganges verlötet man mit der roten Messbuchse und dem langen Beinchen der LED und den Minuspol mit der blauen Messbuchse. Das kurze Beinchen der LED verbindet man mit der schwarzen Messbuchse. Man testet die Lampe mit einer Monozelle von  $U = 1,5 \text{ V}$  am Eingang. Benutzt man kein Amperemeter zwischen der blauen und schwarzen Messbuchse, so muss man sie mit einer Brücke oder einem Kabel kurzschließen verbinden, damit der Ausgangstromkreis des Moduls geschlossen ist. Wenn die LED leuchtet, verschließt man das Gehäuse.



**Abb.3: LED-Anzeigelampe 2 ohne zusätzliche Messbuchsen**

Abb.3 zeigt die zweite fertige LED-Anzeigelampe 2 ohne zusätzliche Messbuchsen.

### 3.4 Motor

Es ist möglich, statt einer LED einen Motor an der Spule aus Kapitel 3.1 zu betreiben. Man braucht einen Solarmotor, der mit einer Stromstärke von  $I = 10 - 30 \text{ mA}$  läuft. Vor den Motor muss man einen Gleichrichter schalten, da die Spule Wechselspannung liefert und der Motor Gleichspannung benötigt. Man verwendet einen fertigen Gleichrichter oder lötet sich einen aus vier Dioden selbst zusammen, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Am besten bringt man den Motor mit der LED-Anzeigelampe 1 aus Kapitel 3.3 in einem Gehäuse unter, da beide im gleichen Versuch eingesetzt werden. Man benötigt für die Kombination folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 1 weiße LED
- 1 LED-Fassung verchromt
- 4 Telefonbuchsen gelb

4 Lötösen  
 2 Kleingleichrichter  
 1 Kondensator 100 $\mu$ F/35V  
 1 Solarmotor, 0,3V – 6V, 30 mA  
 1 Flaschenverschluss einer Wasserflasche  
 1 Stück Gummischlauch, Innendurchmesser: 3mm, Länge:1cm  
 1 Schraube 10x3mm  
 2 Muttern 3mm  
 Tesafilm  
 Schalllitze  
 Lötmaterial

Man bringt den Motor im oberen Teil des Gehäuses und die LED im unteren Teil unter. Die Anordnung der Teile am Gehäusedeckel kann man Abb.1 entnehmen.



**Abb.1: Motor 1 und Anzeigelampe 1**

Man bohrt für die gelben Buchsen und die LED-Fassung 8mm Löcher in den Gehäusedeckel und für den Motor drei 3mm Löcher, zwei für die Befestigungsschrauben des Motors und eins für die Durchführung der Motorachse. Man befestigt die Buchsen samt je einer Lötöse, die LED-Fassung und den Motor am Gehäuse. Man setzt die LED in die Fassung ein. Auf die Motorachse steckt man das Stück Gummischlauch. Man sticht mit einem Nagel in den Flaschenverschluss ein kleines Loch, führt die Schraube hindurch und befestigt den Flaschenverschluss mit den beiden Muttern an der Schraube. Anschließend steckt man das freie Ende der Schraube auf den Gummischlauch, so dass Schraube und Motorachse über den Schlauch miteinander verbunden sind. Man verbindet die Wechselfassungseingänge der beiden Gleichrichter mit den Lötösen der gelben Telefonbuchsen. Den Pluspol des ersten Gleichricht-

ters verlötet man mit einem Stück Schalllitze mit der Anode, dem langen Beinchen der LED, den Pluspol des zweiten mit dem Pluspol des Motors. Die Minuspole der beiden Gleichrichter verbindet man mit einem Stück Schalllitze mit der Kathode der LED bzw. dem Minuspol des Motors. Zwischen Anode und Kathode der LED lötet man den Kondensator, wobei man auf die richtige Polung achten muss. Lampe und Motor kann man testen, in dem man sie an eine Wechselspannungsquelle von  $U = 3\text{ V}$  anschließt. Leuchtet die LED bzw. läuft der Motor, so sind beide funktionstüchtig und man kann das Gehäuse verschließen.



**Abb.2: Motor 2 und LED-Anzeigelampe 2**

Mit dem Ladungsspeicher aus Kapitel 3.2 kann man einen leistungsstärkeren Motor 2 betreiben. Er läuft bei einer Spannung von  $U = 0,3\text{ V}$  an und benötigt eine Stromstärke von  $I = 110\text{ mA}$ . Da man den Motor 2 und die LED-Anzeigelampe 2 aus Kapitel 3.4 bzw. 3.3 in einem Versuch gemeinsam einsetzt, kann man beide in einem größeren Gehäuse zusammenfassen. Dann hat man außerdem mehr Platz, um die Messbuchsen für den Ausgang des Schaltreglers einzubauen. Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 1 weiße LED
- 1 LED-Fassung verchromt
- 3 Telefonbuchsen schwarz
- 3 Telefonbuchsen rot
- 1 Telefonbuchse blau
- 1 Vorschaltmodul „Low Voltage“ für weiße LEDs
- 1 Diode 1N4001
- 1 Widerstand  $1\Omega$ , 0,25W
- 7 Lötösen
- 1 Solarmotor, 0,3V – 6V, 110 mA
- 1 Flaschenverschluss einer Wasserflasche
- 1 Stück Gummischlauch, Innendurchmesser: 3mm, Länge:1cm
- 1 Schraube 10x3mm
- 2 Muttern 3mm

Tesafilm  
Schaltlitze  
Lötmaterial

Das fertige Gerät sieht in diesem Fall wie in Abb.2 aus.

### 3.5 Schwingkreis

Das Ladeteil des LED-Nachtlichtes enthält einen Schwingkreis, der eine hochfrequente Wechselspannung mit der Frequenz  $f = 21,5 \text{ kHz}$  bzw.  $33,6 \text{ kHz}$  abstrahlt. Um die Thomonsche Formel anhand des Schwingkreises überprüfen zu können, benötigt man einen Drehkondensator mit einer Kapazität  $C = 0 - 500 \text{ pF}$  und eine Spule mit einer Induktivität von ca.  $L = 120 - 140 \text{ mH}$ . Sie ist im Elektronikhandel erhältlich. Der Drehkondensator ist in vielen Sammlungen als Schülerübungsbauteil noch aus einer Zeit vorhanden, als man Mittelwellenempfänger aus diskreten Bauteilen zusammengebaut hat. Die damals benutzten MW-Spulen haben allerdings eine zu geringe Induktivität. Man muss sie durch eine passende Induktivität mit  $L = 120 - 140 \text{ mH}$  ersetzen. Notfalls kann man auch mehrere kleinere Induktivitäten in Reihe schalten, etwa 2 zu je  $68 \text{ mH}$ . Am einfachsten baut man Drehkondensator und Induktivität zusammen in ein Gehäuse ein, allerdings mit getrennten Ausgängen, damit man die Induktivität und die Kapazität von außen einzeln messen kann. Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 1 Drehkondensator 0-500pF
- 1 Drehknopf passend zur Achse des Drehkondensators
- 1 Induktivität 120 - 140mH
- 4 Telefonbuchsen gelb
- Doppelklebefolie
- Lötmaterial

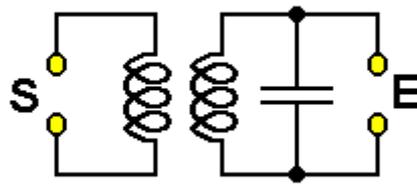


**Abb.1: Drehkondensator und Induktivität**

Man bohrt in die beiden Stirnseiten des Gehäusedeckels je zwei Löcher mit 8mm Durchmesser, ebenso in die Mitte der Oberseite. Man verschraubt die Buchsen in den Stirnseiten und den Drehkondensator an der Oberseite. Bei den Buchsen legt man zwischen die beiden Schrauben je eine Lötöse. Die Induktivität klebt man mit einem Stück Doppelklebefolie auf die Innenseite des Gehäusebodens. Man verlötet die Ausgänge des Drehkondensators mit

den Buchsen in der oberen Stirnseite und die Induktivität mit den Buchsen an der unteren Stirnseite. Man verschließt das Gehäuse mit den beiliegenden Schrauben, steckt den Drehknopf auf die Achse des Drehkondensators und schraubt ihn fest. Abb. 1 zeigt den fertigen Aufbau. Wer nicht basteln möchte, kann auch eine Spule mit passender Induktivität aus der Sammlung verwenden, etwa die kleine Leybold-Spule mit 2x1800 Windungen. Jede dieser beiden Spulen besitzt eine Induktivität von ca. 130 mH. Allerdings sind sie meist nur in einfacher Ausführung vorhanden.

Alternativ kann man auch einen Schwingkreis mit einer festen, auf die Ladeteile abgestimmten Frequenz aufbauen. Mit ihm kann man das in Kapitel 3.3 beschriebene LED-Anzeigelämpchen zum Leuchten bringen. Außerdem kann man ihn über einen Frequenzgenerator betreiben und so die Phasensprünge im Resonanzfall demonstrieren. Abb. 2 zeigt die benötigte Schaltung.



**Abb.2: Resonanzschaltung**

Um die Energieübertragung vom Sender S auf den Empfänger E zu verbessern, kann man im Sendekreis S zur Induktivität einen passenden Kondensator in Reihe schalten. Dann tritt im Sendekreis S Stromresonanz und im Empfängerkreis A Spannungsresonanz auf. Sender und Empfänger sind so optimal aufeinander abgestimmt. In diesem Fall reicht eine kleine Spannung am Frequenzgenerator aus, um die LED im Resonanzfall zum Leuchten zu bringen. Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 2 Induktivitäten 100 $\mu$ H
- 4 Telefonbuchsen gelb
- 1 bzw. 2 Kondensatoren 220nF oder  
je 1 bzw. 2 Kondensatoren 470nF und 100nF
- etwas Klebeband
- Lötmaterial

Die beiden Induktivitäten klebt man an ihren Stirnseiten mit einem Stück Klebeband zusammen. An eine der beiden lötet man den Kondensator 220 nF für einen Schwingkreis mit einer Resonanzfrequenz  $f = 33,6$  kHz bzw. die beiden Kondensatoren 470 nF und 100 nF parallel zueinander für  $f = 21,5$  kHz. Man bohrt in die beiden Stirnseiten des Gehäusedeckels je zwei Löcher mit 8mm Durchmesser und baut die Buchsen in diese Löcher ein. Zwischen die beiden Schrauben der Buchsen legt man je eine Lötöse. Man verlötet die Anschlüsse der ersten Induktivität mit den Buchsen in der oberen Stirnseite und die zweite Induktivität mit den Buchsen an der unteren Stirnseite. Man verschließt das Gehäuse mit den beiliegenden Schrauben.

### 3.6 Demodulator

Im Ladeteil der LED-Lampe wird aus der Netzspannung der Frequenz 50 Hz durch einen Schwingkreis eine Ladespannung mit einer Frequenz von 33,6 kHz bzw. 21,5 kHz erzeugt.

Nach dem Induktionsgesetz ist die in der LED-Lampe induzierte Spannung proportional zur Frequenz der Erregerspannung. Somit wird in der kleinen Empfangsspule der LED-Lampe auch ohne Eisenkern eine genügend hohe Spannung induziert, um den Lithiumionen-Akku laden zu können. Anderenfalls wäre die LED-Lampe weniger handlich und schwerer. Da der Schalttransistor Gleichspannung benötigt, wird die Netzspannung zunächst gleichgerichtet und geglättet. Am Ausgangskondensator des Gleichrichters baut sich eine pulsierende Gleichspannung auf, die ein wenig mit der doppelten Netzfrequenz schwankt. Diese Schwankungen übertragen sich auf den Schwingkreis, der so mit einer Frequenz von 100 Hz moduliert wird.

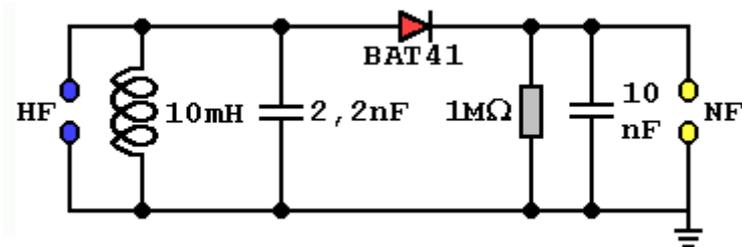


Abb.1: Demodulator

Um dieses Netzbrummen nachweisen zu können, baut man sich aus wenigen Bauteilen eine Demodulatorschaltung nach Abb.1. Durch die Wahl der Spule und des Kondensators schwingt der Empfangskreis in Resonanz mit dem Ladeteil, wie die folgende Rechnung zeigt. Für seine Eigenfrequenz gilt mit  $L = 10 \text{ mH}$  und  $C = 2,2 \text{ nF}$ :

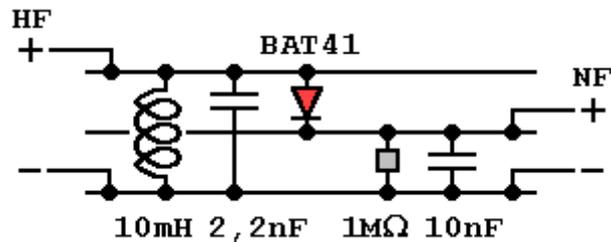
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,01H * 2,2 * 10^{-9}F}} = 33,9kHz.$$

Sie entspricht ziemlich genau der Frequenz des Ladeteils der Firma Wachsmuth&Krogmann. Beim Modell der Firma Müller benötigt man z.B.  $C = 470 \text{ pF}$  und  $L = 120 \text{ mH}$ . Selbst wenn die Werte der verwendeten Bauteile etwas von ihren Nennwerten abweichen, baut sich im Empfangskreis eine genügend hohe amplitudenmodulierte Spannung auf, da die Resonanzkurve im Maximum einen flachen Verlauf zeigt und die Werte von  $C$  und  $L$  mit einer Wurzelfunktion in die Frequenz eingehen. Diese Spannung kann am HF-Ausgang des Demodulators mit einem Oszillographen sichtbar gemacht werden. Durch die Diode BAT 41 wird sie gleichgerichtet. Mit dem RC-Glied wird das Trägersignal herausgefiltert, so dass an ihm nur eine kleine Spannung der Frequenz 100 Hz anliegt, wie man ebenfalls mit einem Oszillographen zeigen kann. Sie kann mit einem NF-Verstärker verstärkt und über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden. Für den Demodulator benötigt man folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse 72x26x50mm
- 2 Telefonbuchsen gelb
- 2 Telefonbuchsen blau
- 4 Lötösen
- 2 Schrauben 10x2mm
- 4 Muttern 2mm
- 1 Diode BAT 41
- 1 Kondensator 2,2nF bzw. 470pF
- 1 Kondensator 10 nF

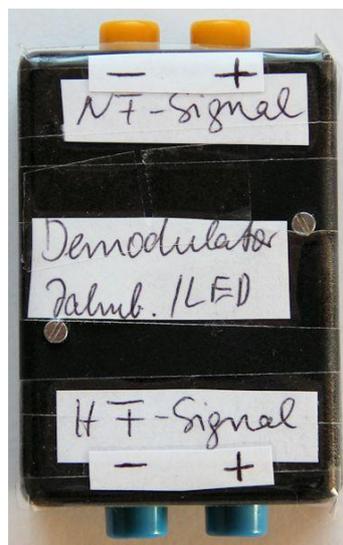
1 Widerstand  $1\text{M}\Omega$   
 1 Induktivität 10 mH bzw. 120 mH  
 1 Stück Lochrasterplatine 30x20mm  
 Schalllitze  
 Lötmaterial.

Zunächst verlötet man die Bauteile auf der Lochrasterplatine nach folgendem Schaltplan.



**Abb.2: Schaltplan**

Dann bohrt man in die beiden Stirnseiten des Gehäusedeckels je zwei Löcher mit einem Durchmesser von je 8mm für die Telefonbuchsen. Man verschraubt die Buchsen in den Löchern, wobei man zwischen die beiden Schrauben je eine Lötöse legt. Die Platine befestigt man an der Oberseite des Gehäusedeckels mit den beiden Schrauben und den vier Muttern. Zwei Muttern dienen als Unterlegscheibe zwischen dem Gehäuse und der Platine, damit die Lötstellen nicht verbogen werden. Zum Schluss verlötet man die Anschlusslitzen mit den entsprechenden Lötösen, die HF-Leitungen mit den blauen und die NF-Leitungen mit den gelben Buchsen. Abb. 3 zeigt den fertigen Demodulator. Er kann auch für die Versuche mit dem Ladeteil der elektrischen Zahnbürste benutzt werden (vgl. Skript Zahnbürste auf dieser Webseite).



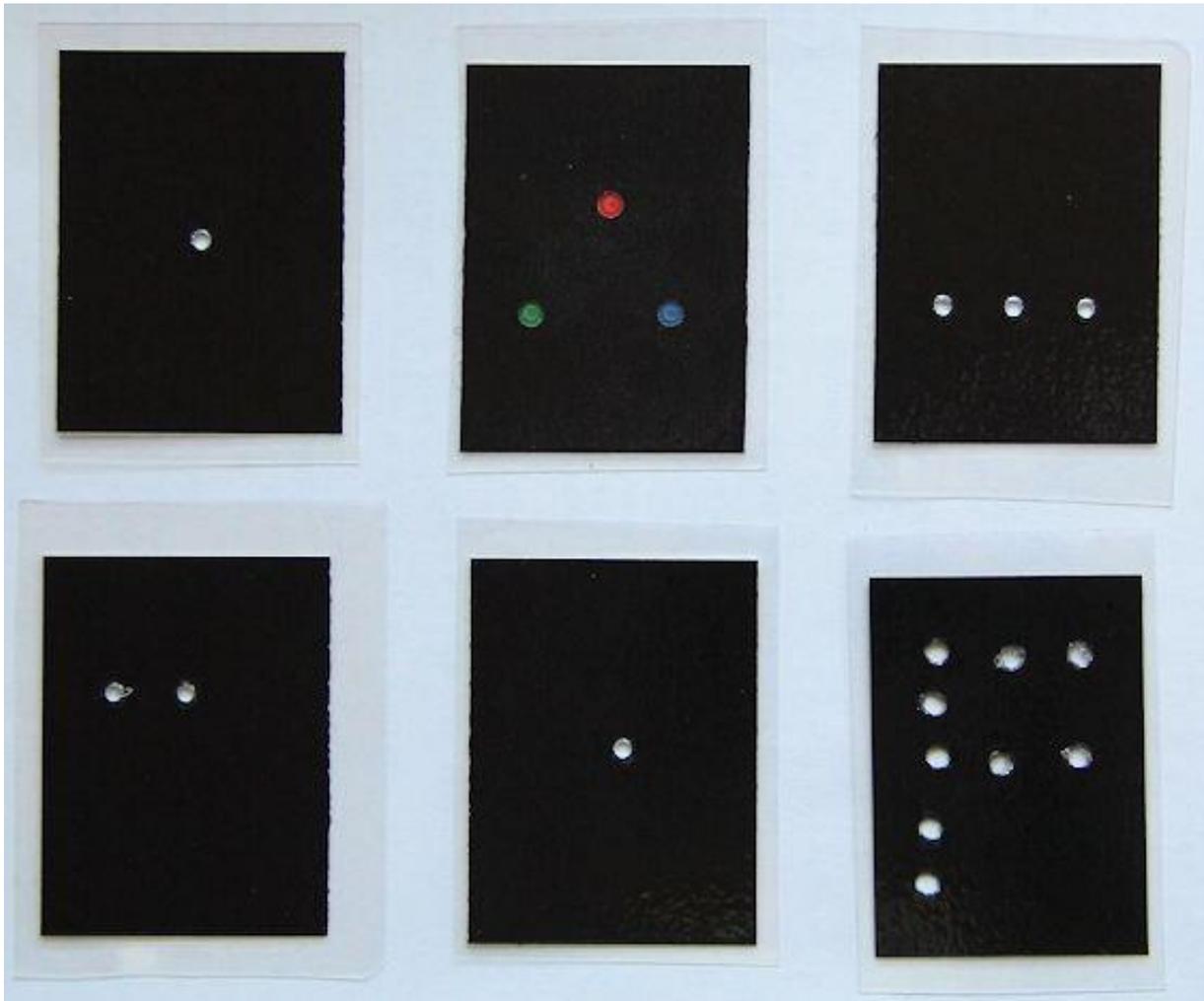
**Abb.3: Demodulator**

### 3.7 Blenden

Für die optischen Versuche benötigt man einige Blenden, die man sich aus Karton herstellen kann. Um zu zeigen, dass bei der optischen Abbildung ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild erzeugt wird, ist am besten eine Blende der Größe 6x6cm geeignet, aus der

man sich mit einem Teppichmesser den Buchstaben F ausschneidet, der etwa 4,5 cm hoch und 3 cm breit ist. Ferner benötigt man eine Lochblende aus Karton der Größe 6x6cm mit einem Loch in der Mitte mit einem Durchmesser von etwa 5mm. Für die Schattenversuche stellt man sich eine Einlochblende, eine Zweilochblende, eine Dreilochblende und eine Dreifarbenblende her. Sie sollten eine Größe von 6x6cm haben. Aus der ersten schneidet man in der Mitte ein Quadrat der Größe 5x5mm aus, aus der zweiten zwei und aus der dritten drei Quadrate mit einem Mittenabstand von 13mm. Bei der Dreifarbenblende ordnet man die 5x5mm großen Quadrate auf den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks der Kantenlänge 2,3 cm an. Die Quadrate der Dreifarbenblende verklebt man mit einem Stück grüner, blauer bzw. roter Transparenzfolie. Wer möchte kann die Löcher in den einzelnen Blenden noch mit Verstärkungsringen bekleben, die man normalerweise benutzt, um die Löcher in Papierbögen vor dem Abheften zu verstärken. Man erhält so runde Löcher, die optisch netter aussehen, ansonsten aber keinen zusätzlichen Nutzen beim Einsatz der Blenden bringen. Als Schattenkörper benutzt man ein Quadrat der Kantenlänge 3x3cm aus Karton, für die farbigen Schatten einen Rahmen der Größe 6x6cm mit einer Rahmenstärke von 1cm. Die Schattenblenden klemmt man beim Experimentieren in eine Krokodilklemme, die man auf der optischen Bank in eine Halteklammer steckt. Um das Spektrum einer LED zu erzeugen, braucht man zusätzlich ein optisches Gitter mit einer Auflösung von 570/mm oder 1000/mm und ein Geradsichtprisma. Die Gitterblende kann man sich aus einer Gitterfolie selbst herstellen. Man schneidet sich dazu aus Karton eine Rahmenblende der Größe 6x6cm mit einer Rahmenstärke von 1cm aus. Man klebt auf die Blende ein Stück Gitterfolie der Größe 6x6cm.

Auf Vorschlag des Physikkollegen Daniel Braun kann man sich alle Blenden außer der Gitterblende auch aus dünnen schwarzen Kartonstücken der Größe 5x6cm herstellen, die man laminiert (s. Abb. 1). Die Löcher stanzt man mit einer Lochzange in den laminierten Karton. Die Löcher sollten so platziert werden, dass sie gerade jeweils über einer LED der Matrix liegen. Der Buchstabe F besteht aus fünf vertikalen Löchern und zwei horizontalen Balken zu je zwei zusätzlichen Löchern. Bei der Dreifarbenblende muss man die Löcher vor dem Laminieren einstanzen und sie anschließend jeweils mit einem Stück Transparentpapier in den Farben grün, blau oder rot zukleben. Diese laminierten Blenden sind stabiler und für Schülerversuche besser geeignet.



**Abb.1: Laminierte Blenden**

## 4. Versuche

### 4.1 Elektrik

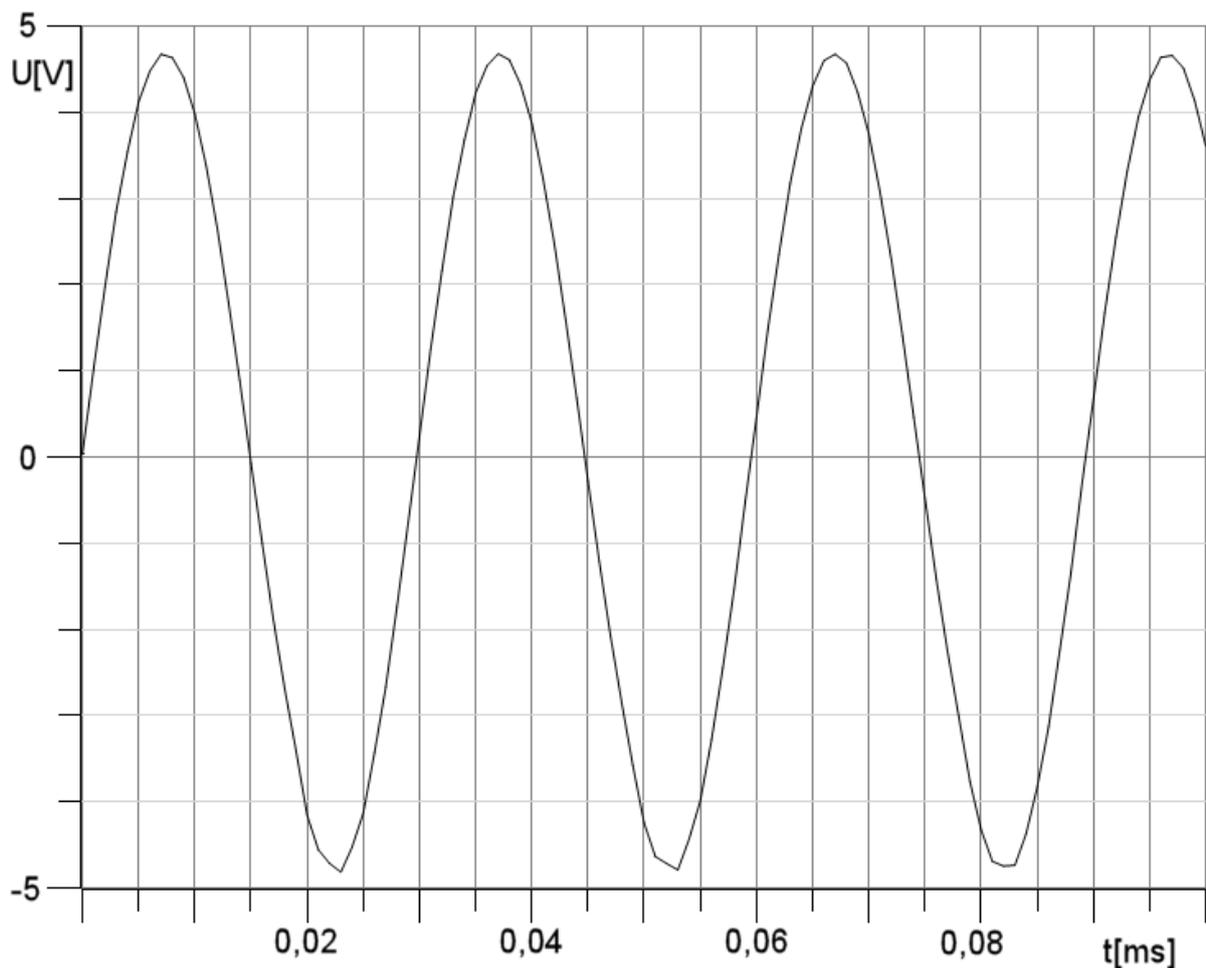
#### Versuch 1: Funktion der Ladestation

##### Geräte:

Man benötigt die Ladestation des Nachtlichtes, ein Verlängerungskabel, zwei Experimentierkabel, die Spulen aus Kapitel 3.1, ein digitales Voltmeter mit Frequenzfunktion, einen Oszillographen oder ein Messwerterfassungssystem.

##### Durchführung:

Man schließt das Ladeteil mit dem Verlängerungskabel an eine Steckdose an, verbindet den Ausgang der Spule mit 100 Windungen mit dem Voltmeter bzw. dem Oszillographen und hält sie über das Ladeteil. Bei der 30er Spule benutzt man 30 Windungen.



**Abb.1: Wechselspannung beim Modell Wachsmuth&Krogmann**

##### Beobachtung:

Beim Modell der Firma Müller zeigt das Voltmeter eine Wechselspannung von  $U = 3,5\text{V}$  mit einer Frequenz  $f = 21,5\text{ kHz}$  an. Auf dem Oszillographen sieht man eine sinusförmige Wechselspannung mit einer Periodendauer  $T = 46,6\text{ }\mu\text{s}$ . Beim Modell der Firma Wachsmuth&Krogmann erhält man folgende Messwerte (s. Abb.1):

$$U \approx 4V; f = 33,6 \text{ kHz}; T = 29,7\mu\text{s}.$$

**Folgerung:**

Das Ladeteil erzeugt eine ungedämpfte elektromagnetische Schwingung mit einer Frequenz  $f = 21,5 \text{ kHz}$  bzw.  $f = 33,6 \text{ kHz}$ . Sie induziert in der Spule des Nachtlichtes bzw. der Experimentierspule eine sinusförmige Wechselspannung dieser Frequenz. Die Ladeteile benutzen eine höhere Frequenz als die Netzspannung mit  $f = 50 \text{ Hz}$ , damit man so bei weniger Windungen eine höhere Induktionsspannung erhält. Ansonsten würden das Ladegerät und die LED-Lampe sehr unhandlich werden.

**Versuch 2: Funktion LED-Lampe/Motor****Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, ein Verlängerungskabel, die LED-Anzeigelampe 1, den Motor 1, die Spulen und zwei Kabel.

**Durchführung:**

Man verbindet den Ausgang der Spule mit 100 Windungen mit den Wechselstromeingängen der LED-Anzeigelampe 1 bzw. des Motors 1 und hält die Spule über das Ladeteil, das man über das Verlängerungskabel an eine Steckdose anschließt. Dann greift man an der Spule 70 Windungen bzw. 30 Windungen ab. Bei der 30er Spule benutzt man 30, 20 bzw. 10 Windungen.

**Beobachtung:**

Benutzt man 100 (30) Windungen, so leuchtet die LED hell auf, bei 70 (20) Windungen schwächer und bei 30 (10) Windungen gar nicht. Der Motor läuft bei 100 (30) schnell, bei 70 (20) Windungen langsam, nicht aber bei 30 (10).

**Folgerung:**

Die in der Spule induzierte Sinusspannung wird in der LED-Anzeigelampe 1 und im Motor 1 gleichgerichtet, da beide Gleichspannung benötigen. Das gleiche geschieht in der Nachttischlampe. Dort wird mit der Gleichspannung ein Akku geladen. Hat die Empfangsspule zu wenig Windungen, so ist die induzierte Spannung zu klein.

**Versuch 3: Abschirmen der EM-Felder****Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, ein Verlängerungskabel, die LED-Anzeigelampe 1, den Motor 1, die Spulen und zwei Kabel.

**Durchführung:**

Man verbindet den Ausgang der Spule mit 100 (30) Windungen mit den Wechselstromeingängen der LED-Anzeigelampe 1 bzw. des Motors 1 und hält die Spule über das Ladeteil, das man über das Verlängerungskabel an eine Steckdose anschließt. Dann legt man zwischen das Ladeteil und die Empfangsspule ein Stück Papier, Alufolie bzw. Plastikfolie.

**Beobachtung:**

Mit dem Papier und der Plastikfolie leuchtet die LED und der Motor läuft, mit der Alufolie nicht.

**Folgerung:**

Die Energie wird vom Ladeteil durch elektromagnetische Felder auf die Empfangsspule übertragen. Sie werden durch Metalle abgeschirmt.

**Versuch 4: Laden/Entladen des Ladungsspeichers****Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, die Spulen, den Ladungsspeicher, die LED-Anzeigelampe 2 und den Motor 2 aus Kapitel 3.3 bzw. 3.4, ein Voltmeter, ein Amperemeter, eine Stoppuhr und ein Verlängerungskabel. Falls vorhanden, kann man statt des Ampere- und Voltmeters auch ein Messwerterfassungssystem, etwa Cassy mobile der Firma Leybold, einsetzen. Dann kann man den Strom und Spannungsverlauf während des Entlade- und Ladevorganges kontinuierlich aufzeichnen.

**Durchführung:**

Man schließt den Ladungsspeicher an die 100 (30) Windungen der Spule an, verbindet das Voltmeter mit seinem Ausgang und anschließend das Ladeteil über das Verlängerungskabel mit einer Steckdose. Man hält die Spule über das Ladeteil und lädt den Kondensator, bis die Spannung etwa  $U = 1,5 \text{ V}$  beträgt. Das kann je nach Vorladung des Kondensators bis zu etwa 10 Minuten dauern. Man unterbricht die Verbindung zwischen der Spule und dem Ladungsspeicher und schließt ihn an die LED-Anzeigelampe 2 an. Sobald sie erlischt, ersetzt man sie durch den Motor 2. Man misst die Stromstärke durch den Motor und stoppt die Zeit bis er stehen bleibt. Alternativ zeichnet man den Spannungs- und Stromverlauf etwa mit cassy mobile auf.

**Beobachtung:**

Zeichnet man den Entladevorgang mit einem Messwerterfassungssystem auf, so erhält man die Kurven in den Abbildungen 1 - 3. Ist die Spannung auf unter  $U = 1 \text{ V}$  gesunken, wird die LED-Lampe dunkler (s. Abb. 1 und 2). Bis dahin leuchtet sie mit fast konstanter Helligkeit etwa  $t = 90 \text{ s}$  lang. Der Motor läuft noch auf vollen Touren. Nach etwa  $t = 130 \text{ s}$  bleibt auch er stehen (s. Abb.3). Die Spannung am Kondensator ist dann auf etwa  $U = 0,3 \text{ V}$  gesunken.

**Erklärung:**

Der Schaltregler in der Lampe sorgt dafür, dass an der LED-Lampe eine Ausgangsspannung von fast konstant  $U = 3 \text{ V}$  liegt, unabhängig von der Eingangsspannung (s. Abb.1). Sinkt sie unter etwa  $U = 1 \text{ V}$ , schaltet der Schaltregler runter (s. Abb.1 und 2). Da der Motor schon mit  $U = 0,3 \text{ V}$  anläuft, startet er noch problemlos (s. Abb. 3). Beim Start fließt für einen kurzen Moment ein hoher Anlaufstrom von etwa  $300 \text{ mA}$ , danach nimmt er kontinuierlich von  $I_A = 110 \text{ mA}$  auf  $I_E = 90 \text{ mA}$  ab, bevor der Motor stehen bleibt (s. Abb.1). Durch den Startvorgang sinkt die Spannung von  $U = 1 \text{ V}$  auf  $U = 0,9 \text{ V}$ . Es fließt im Betrieb ein mittlerer Strom von etwa  $I_m = 100 \text{ mA}$ . Der Kondensator gibt die Ladung  $Q$  ab, für die gilt:

$$Q = 22F * 0,6V = 13,2C.$$

Der Motor müsste etwa

$$t = \frac{13,2C}{0,1A} = 132s$$

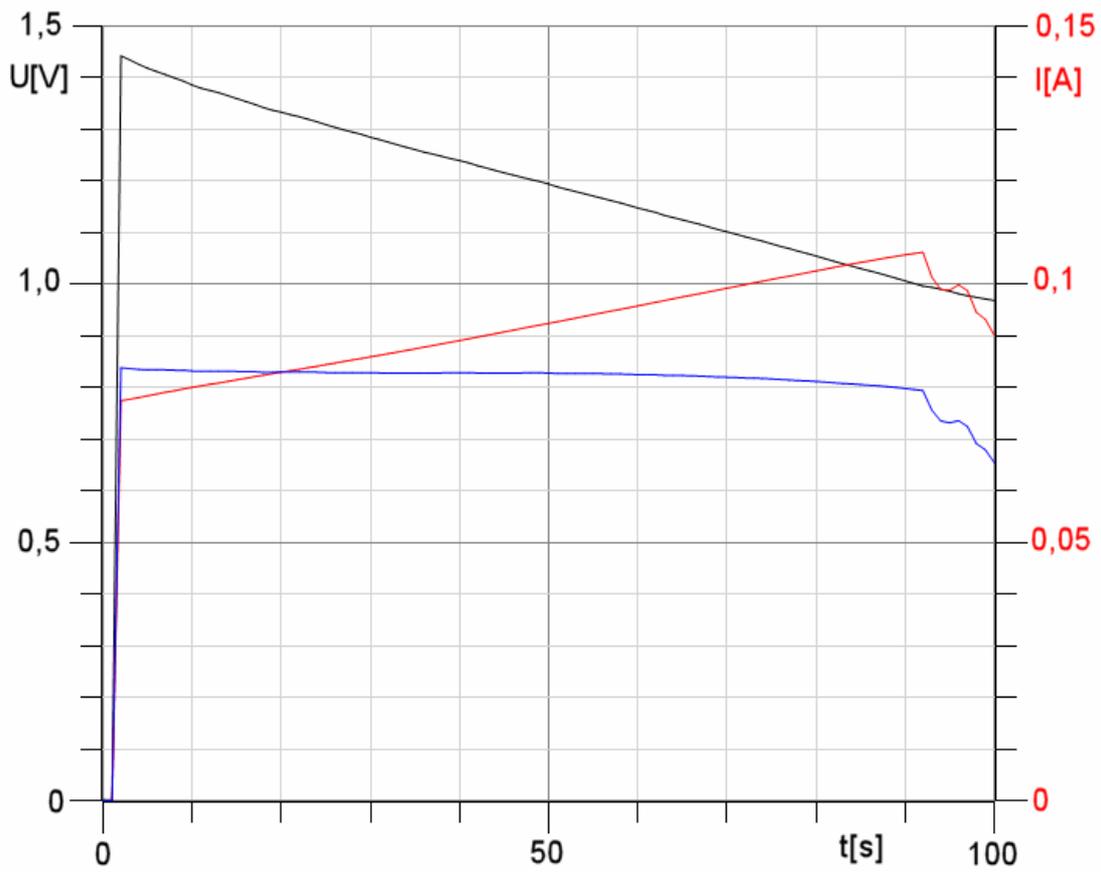


Abb.1: Entladevorgang mit der LED Primärseite

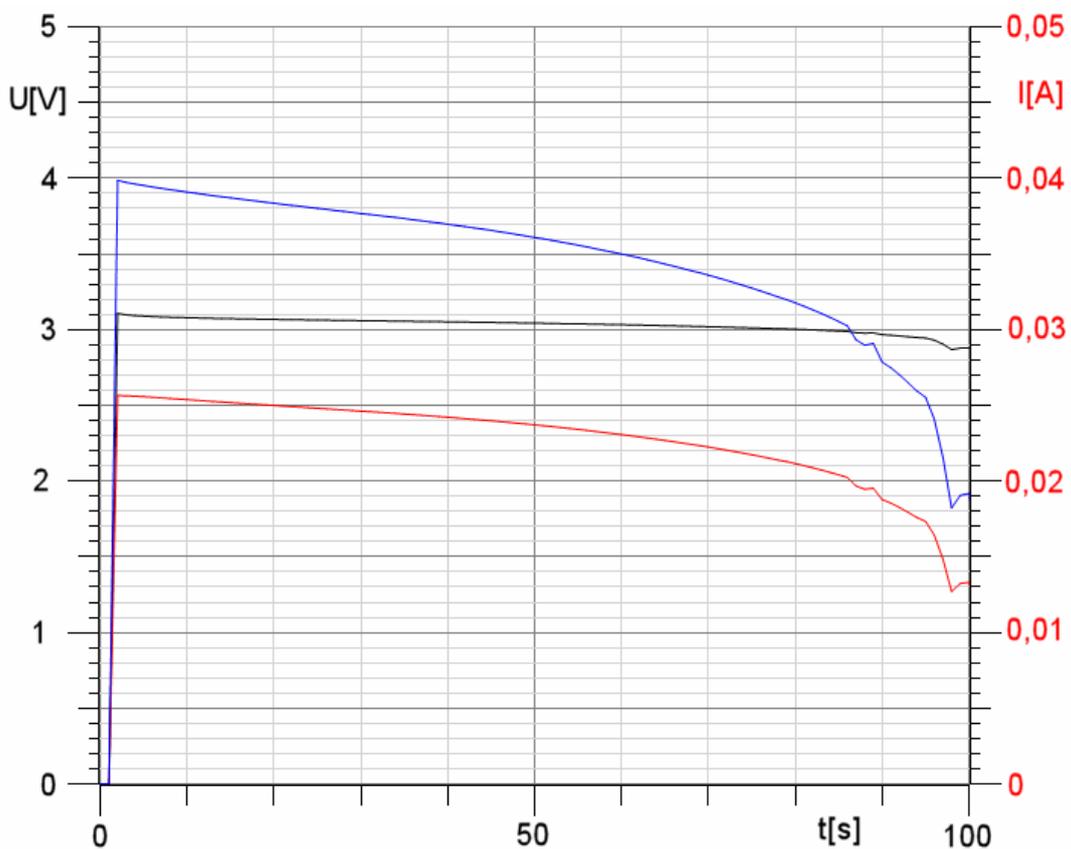
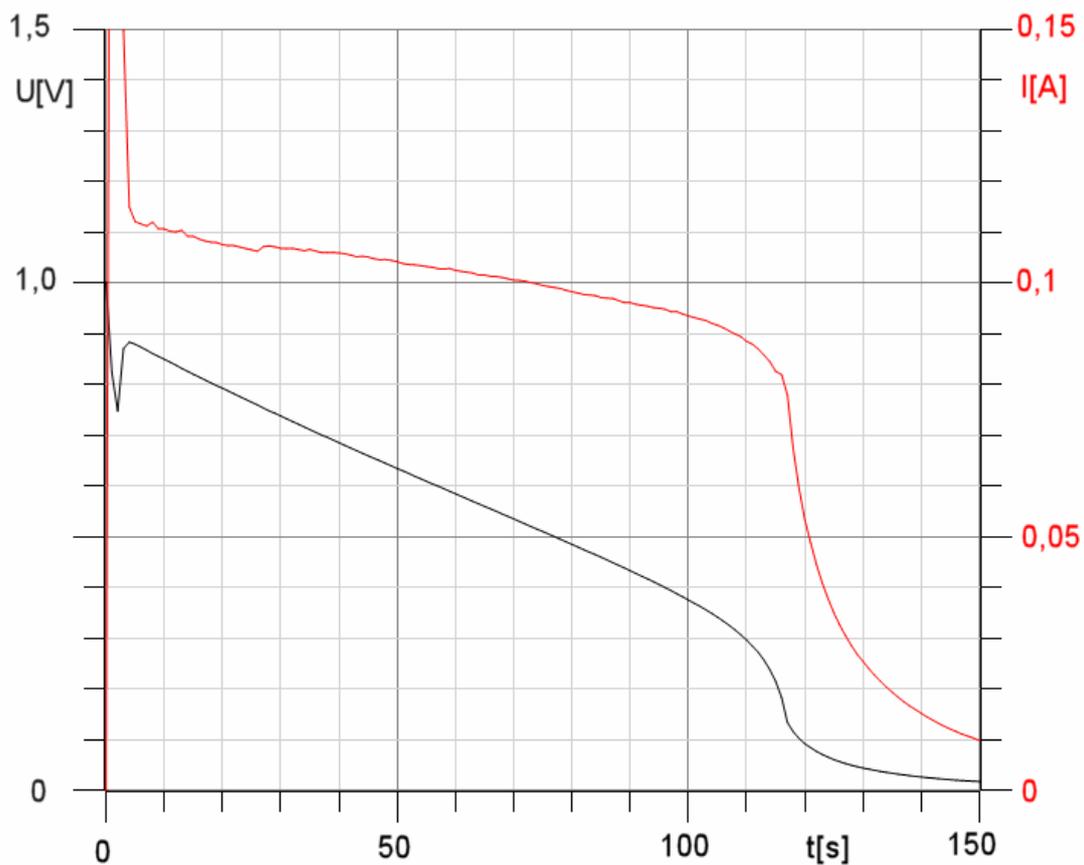


Abb.2: Entladevorgang LED Sekundärseite



**Abb.3: Entladevorgang mit dem Motor**

laufen. Aus Abb.3 liest man ab, dass er nach etwa  $t = 115$  s langsamer wird und zwischen  $t = 120$  s und  $130$ s stehen bleibt. Errechnete und gemessene Zeiten stimmen gut überein. Für die LED gilt (vgl. Abb. 1 und 2):

$$Q = 22F * 0,45V = 9,9C.$$

Bei einer mittleren Stromstärke  $I_m = 0,09A$  auf der Primärseite des Schaltreglers müsste sie etwa

$$t = \frac{9,9C}{0,09A} = 110s$$

leuchten. Aus der Abb. 1 kann man entnehmen, dass der LED-Treiber nach etwa  $t = 90$  s runterschaltet. Bei einer Spannung unter  $U = 0,9$  V schaltet er sich von selbst ab. Die LED-Lampe erlischt schlagartig. Vergleicht man den Spannungs- und Stromverlauf der Primärseite des LED-Treibers (s. Abb. 1) mit dem der Sekundärseite (s. Abb. 2), so fällt auf, dass die Eingangsgleichspannung von  $U = 1$  V auf  $U = 1,5$  V absinkt, während die Ausgangsspannung mit  $U = 3$  V nahezu konstant bleibt. Dieses Verhalten ist bei der steilen UI-Kennlinie einer LED dringend erforderlich, da sonst ihre Helligkeit rasch sehr stark absinken würde. Um trotzdem eine konstante Eingangsleistung (blaue Kurven in den Abb. 1 und 2) zu gewährleisten, erhöht sich während des Entladevorganges des Kondensators die Eingangsstromstärke des LED-Treibers. Man könnte ihn als Gleichspannungstransformator bezeichnen. In ihm wird die Eingangsgleichspannung zerhackt und mit ihr eine Spule ständig ein- und ausgeschaltet.

Beim Ausschalten entsteht an den Enden der Spule durch Selbstinduktion eine Spannung, die höher ist als die angelegte Spannung, wie bei der Zündanlage im Auto. Die Stromstärke wird über die Einschaltzeit der Spule geregelt. Die genaue Funktion eines solchen Schaltreglers, wie er in der Elektronik offiziell heißt, können Sie in meinem Skript Schaltregler auf dieser Webseite nachlesen.

### **Versuch 5: Transformatorgesetz**

#### **Geräte:**

Man benötigt die Ladestation des Nachtlichtes, ein Verlängerungskabel, zwei Experimentierkabel, die Spulen aus Kapitel 3.1 und ein digitales oder analoges Voltmeter.

#### **Durchführung:**

Man schließt das Ladeteil mit dem Verlängerungskabel an eine Steckdose an, verbindet zwei Ausgänge der Experimentierspule mit dem Voltmeter und hält sie über das Ladeteil. Dann greift man nacheinander die anderen Ausgänge der Spule ab und notiert sich jeweils die gemessene Spannung.

n	U[V] (ML)	U/n[V] (ML)	U[V] (WK)	U/n[V] (WK)
2	0,068	0,034	0,062	0,031
8	0,203	0,025	0,266	0,033
10	0,268	0,027	0,335	0,034
20	0,548	0,027	0,651	0,033
30	0,817	0,027	0,974	0,032
70	2,609	0,037	2,994	0,043
90	3,171	0,035	3,608	0,040
100	3,448	0,035	4,003	0,040

**Tabelle 1: Messtabelle 100er Spule**

n	U[V]	U/n[V]
5	0,46	0,092
10	0,95	0,095
15	1,73	0,115
20	2,16	0,108
25	3,15	0,126
30	3,58	0,119

**Tabelle 2: Messtabelle 30er Spule**

#### **Beobachtung:**

Man erhält für die 100er Spule Messtabelle 1. ML steht darin für das Modell der Firma Müller-Licht, WK für das der Firma Wachsmuth&Krogmann. Benutzt man die 30er Spule und das Modell der Firma Wachsmuth&Krogmann, so ergibt sich Messtabelle 2.

#### **Auswertung:**

Man erkennt in den Spalten 3 und 5 in Tabelle 1 und der Spalte 3 in Tabelle 2, dass der Quotient aus der gemessenen Spannung und der Windungszahl nahezu konstant bleibt, auch wenn er ein wenig schwankt. Die gemessene Spannung ist damit proportional zur Windungs-

zahl n. Die Messwerte bestätigen das Spannungsgesetz für einen Transformator aus Kapitel 2.3.

### **Versuch 6a: Thomsonsche Schwingungsformel (Lehrerversuch!!!)**

#### **Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, ein Verlängerungskabel, die Spule, den variablen Schwingkreis aus Kapitel 3.5 sowie ein analoges Voltmeter oder einen Oszillographen und ein LCR-Messgerät.

#### **Durchführung:**

Man verbindet den Drehkondensator mit der Induktivität und dem Voltmeter bzw. dem Oszillographen. Man schließt das Ladeteil über das Verlängerungskabel an eine Steckdose an und hält die Induktivität in seine Nähe. Man dreht am Drehkondensator solange, bis das Voltmeter bzw. der Oszillograph die maximale Spannung anzeigt. Danach darf der Kondensator nicht mehr verstellt werden. Man trennt den Kondensator und die Spule ab und bestimmt mit dem LCR-Messgerät ihre Kapazität bzw. Induktivität. Da bei diesem Versuch Spannungen von mehr als 100 V auftreten können, darf er nur als Lehrerversuch!!! durchgeführt werden.

#### **Beobachtung:**

Man erhält für das Modell der Firma Müller  $C = 426 \text{ pF}$  und  $L = 0,1264 \text{ H}$  und für das Modell der Firma Wachsmuth&Krogmann  $C = 171 \text{ pF}$  und  $L = 0,1264 \text{ H}$ .

#### **Erklärung:**

Die Induktivität und die Kapazität bilden einen Schwingkreis, der durch das Ladeteil zum Schwingen angeregt wird. Stimmt die Frequenz des Schwingkreises mit der Frequenz des Ladeteils überein, so schwingt er in Resonanz. Die Spannung erreicht ihr Maximum. Für die Resonanzfrequenz gilt nach Kapitel 2.1 die Thomsonsche Schwingungsformel. Man erhält für das Modell der Firma Müller:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}} = 21,7 \text{ kHz.}$$

Für das Modell der Firma Wachsmuth & Krogmann ergibt sich  $f = 34,3 \text{ kHz}$ . In beiden Fällen stimmen die Frequenzen sehr gut mit den in Versuch 1 bestimmten Werten überein, womit sich die Thomsonsche Formel bestätigt.

### **Versuch 6b: Thomsonsche Schwingungsformel (Schülerversuch)**

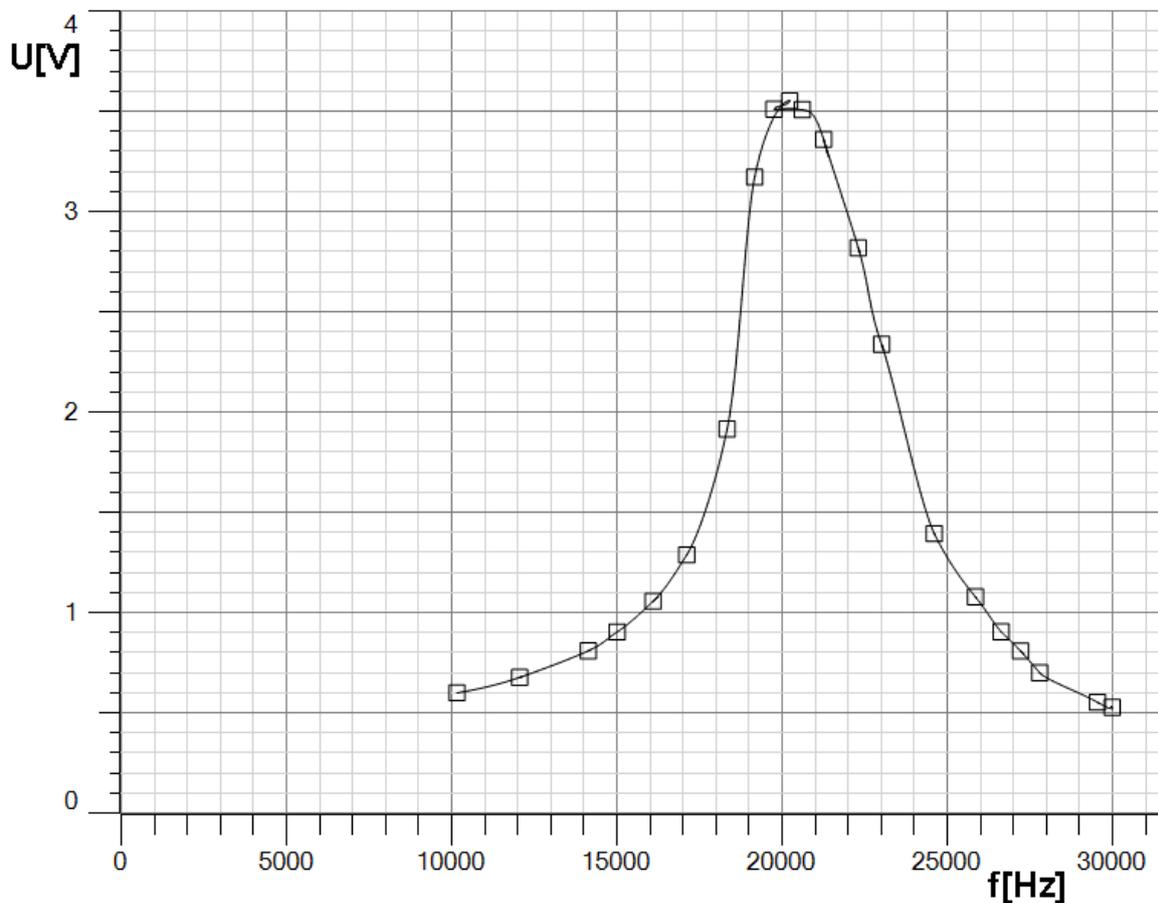
#### **Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, ein Verlängerungskabel, den festeingestellten Schwingkreis aus Kapitel 3.5 sowie die LED-Anzeigelampe 1 und den Motor 1 aus Kapitel 3.3 bzw. 3.4, eventuell noch einen Frequenzgenerator, einen Oszillographen und ein Messwerterfassungssystem, etwa cassy mobile der Firma Leybold mit Timer-Box als Frequenzmesser.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die Induktivität ohne Kondensator (Anschlüsse S) mit der LED-Lampe bzw. dem Motor und hält sie über das Ladeteil. Dann verbindet man den Resonanzkreis (Anschlüsse E) mit der LED bzw. dem Motor und bewegt ihn über das Ladeteil. Man schließt die

einfache Induktivität (Anschlüsse S) an einen Frequenzgenerator an, den Resonanzkreis (Anschlüsse E) an die LED-Lampe bzw. Motor. Man greift die Signale an beiden Induktivitäten an je einem Kanal des Oszillographen ab und erhöht die Frequenz am Generator von 10 kHz auf 50 kHz. Man zeichnet mit cassy mobile die Resonanzkurve auf.



**Abb.4: Resonanzkurve Modell Firma Müller**

**Beobachtung:**

Bewegt man die reine Induktivität über das Ladeteil, so leuchtet die LED nicht, mit dem Resonanzschwingkreis leuchtet sie hell auf. Im ersten Fall läuft der Motor nicht, im zweiten schon, nachdem man ihn kurz angestoßen hat. Fährt man im zweiten Teilversuch die Frequenz am Generator hoch, so beachtet man eine hohe Resonanzspannung von mehreren Volt bei  $f = 21 \text{ kHz}$  bzw.  $f = 34 \text{ kHz}$ . Bei diesen Frequenzen leuchtet die LED und der Motor läuft, bei allen anderen nicht. Außerdem kann man am Oszillographen den Phasensprung zwischen beiden Signalen bei Resonanz beobachten. Mit cassy mobile erhält man für das Modell der Firma Müller die Resonanzkurve in Abb. 4.

**Erklärung:**

Die an der Induktivität induzierte Spannung ist ohne Resonanz zu gering, um die LED zum Leuchten zu bringen, mit Resonanz reicht sie sowohl beim Ladeteil als auch beim Frequenzgenerator aus (s. Abb. 4).

**Versuch 7: Demodulation**

**Geräte:**

Man benötigt das Ladeteil, den Demodulator aus Kapitel 3.6, einen Zweikanaloszillographen, einen NF-Verstärker und einen Lautsprecher.

**Durchführung:**

Man steckt das Ladeteil in die Steckdose und stellt neben ihm den Demodulator auf. Man verbindet den HF-Ausgang des Demodulators mit dem einen und den NF-Ausgang mit dem zweiten Kanal des Oszillographen. Man passt an beiden Kanälen die Spannungsverstärkung an. Die Zeitauflösung sollte im Bereich von 10 ms liegen. Anschließend ersetzt man den Oszillographen durch einen NF-Verstärker, an den ein Lautsprecher angeschlossen ist. Seinen Eingang verbindet man mit dem NF-Ausgang des Demodulators.

**Beobachtung:**

Der erste Kanal zeigt eine mit 100 Hz leicht modulierte Schwingung mit einer Frequenz von ca.  $f = 33 \text{ kHz}$  bzw.  $f = 21 \text{ kHz}$  an, wobei man wegen der geringen Zeitauflösung die einzelnen Schwingungen nicht getrennt sehen kann. Auf dem zweiten Kanal beobachtet man eine Schwingung geringer Spannung mit einer Frequenz von  $f = 100 \text{ Hz}$ , die eventuell noch leichte Spuren der Hochfrequenz enthält. Sie lassen sich unterdrücken, wenn man abgeschirmte Kabel für die Verbindung Modulator-Oszillograph benutzt.

**Erklärung:**

Im Ladeteil wird durch einen Schwingkreis eine ungedämpfte Schwingung der Frequenz  $f = 33 \text{ kHz}$  bzw.  $f = 21 \text{ kHz}$  erzeugt. Sie ist aufgrund der Schaltung des Ladeteils ein wenig mit der doppelten Netzfrequenz moduliert. Der Empfangskreis im Demodulator schwingt mit ihr in Resonanz und empfängt ein amplitudenmoduliertes Signal, das durch eine Diode gleichgerichtet wird. Ein RC-Glied filtert die Trägerfrequenz heraus. An ihm entsteht eine kleine Spannung von  $f = 100 \text{ Hz}$ . Mit dem NF-Verstärker wird sie soweit verstärkt, dass man sie über den Lautsprecher als Brummen hören kann.

**Versuch 8: Wirkungsgrad (Lehrerversuch!!!)**

**Geräte:**

Man benötigt die Nachtlampe und ein Wattmeter, gegebenenfalls eine Sicherheitssteckdose. Den genauen Aufbau entnehmen Sie Abb.1.

**Durchführung:**

Man schließt das Ladeteil ohne Lampe an das Wattmeter an und liest die Leistung ab. Dann steckt man die LED-Lampe ins Ladeteil und misst erneut. Da man mit 230V arbeiten muss, darf der Versuch nur als Lehrerversuch!!! durchgeführt werden.

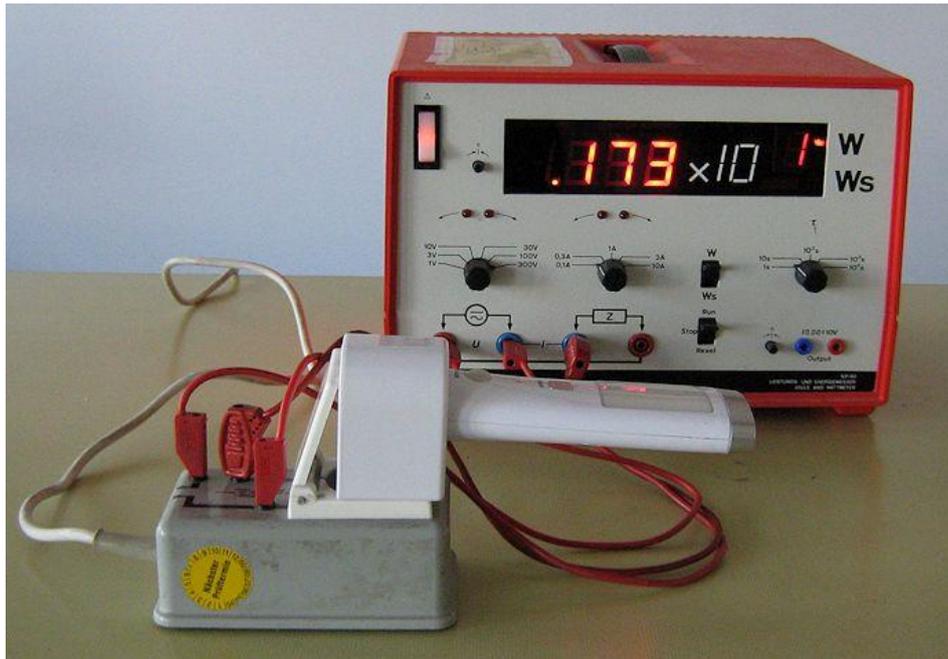
**Beobachtung:**

Ohne Lampe misst man für das Modell der Firma Müller eine Leistung  $P_o = 1,49 \text{ W}$ , mit  $P_m = 1,73 \text{ W}$ , für das Modell der Firma Wachsmuth&Krogmann  $P_o = 1,17 \text{ W}$  und  $P_m = 1,32 \text{ W}$ .

**Folgerung:**

Der Wirkungsgrad  $\eta$  beträgt für das Modell der Firma Müller:

$$\eta = \frac{P_m - P_o}{P_m} * 100\% = 13,9\%.$$



**Abb.1: Versuchsaufbau**

Für das Modell der Firma Wachsmuth und Krogmann erhält man  $\eta = 11,4\%$ . Beide sind damit deutlich geringer als bei LED-Lampen für die Deckenbeleuchtung. Sie erreichen inzwischen  $\eta = 40 - 50\%$ . Der Grund sind Verluste durch die induktive Übertragung der Energie vom Ladeteil auf die Lampe und im Ladeteil selbst durch die Erhöhung der Frequenz von  $f = 50\text{Hz}$  auf  $f = 21,5\text{kHz}$  bzw.  $f = 33,6\text{kHz}$  mit Hilfe eines Schwingkreises. Eine LED-Lampe ist nur so effektiv wie die Elektronik, mit der sie betrieben wird. Das gleiche gilt auch für ihre Lebensdauer. Enthält die Elektronik z.B. Kondensatoren, die nur eine begrenzte Anzahl von Schaltvorgängen aushalten, so kann die tatsächliche Lebensdauer der Lampe deutlich unter der liegen, die die LED selbst besitzt. Andererseits folgt aus dem Ergebnis, dass man das Ladeteil nur dann an die Steckdose anschließen sollte, wenn man die LEDs auch wirklich lädt.

## 4.2 Optik

### Versuch 1: Lochkamera

#### **Geräte:**

Man benötigt das Nachtlicht, die F-Blende und die Lochblende aus Kapitel 3.7, einen kleinen Gummi, eine optische Bank, zwei Halteklammern für die Bank, einen Blendenhalter und einen Schirm.

#### **Durchführung:**

Man spannt die Lochblende in den Blendenhalter und verankert ihn und den Schirm mit den Klammern an der optischen Bank. Man befestigt die F-Blende mit dem Gummi an der Lampe und platziert sie vor der Lochblende.

#### **Beobachtung:**

Auf dem Schirm beobachtet man ein auf dem Kopf stehendes, seitenverkehrtes F aus einzelnen Punkten, das relativ lichtschwach ist.

#### **Erklärung:**

Die Lochblende lässt von jeder LED nur wenige Strahlen hindurch, die restlichen werden abgeschirmt. Zu jeder LED entsteht so auf dem Schirm ein kleiner Lichtfleck. Es ergibt sich insgesamt ein Bild der F-Blende. Das Bild steht auf dem Kopf und ist seitenverkehrt, da sich die Strahlen geradlinig ausbreiten. Strahlen von oben liegenden LEDs gelangen auf dem Schirm in den unteren Bereich und umgekehrt. Von links ausgehende Strahlen treffen rechts auf den Schirm und umgekehrt.

## **Versuch 2: Optische Abbildung mit Linse**

### **Geräte:**

Man benötigt das Nachtlicht, die F-Blende aus Kapitel 3.7, einen Gummi, eine optische Bank, zwei Halteklammern, eine Linse mit einer Brennweite von  $f = 10 - 15 \text{ cm}$  und einen Schirm.

### **Durchführung:**

Man steckt die Linse und den Schirm auf je eine Klammer und verankert beide an der optischen Bank. Man befestigt die F-Blende mit dem Gummi an der Lampe und platziert sie vor der Linse. Man verschiebt die Teile solange gegeneinander, bis ein scharfes Bild auf dem Schirm zu sehen ist.

### **Beobachtung:**

Auf dem Schirm entsteht ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild des Buchstaben F, das wesentlich lichtstärker ist als in Versuch 1. Man erhält z.B. folgende Messwerte:

$$B_H = 11\text{cm}; B_B = 7,5\text{cm}$$

$$G_H = 4,4\text{cm}; G_B = 3\text{cm}$$

$$g = 19\text{cm}; b = 47\text{cm}.$$

### **Auswertung:**

Die von einer LED ausgehenden Strahlen werden durch die Linse auf dem Schirm wieder in einem Punkt vereinigt, dem Bildpunkt. Von oben ausgehende Strahlen gelangen nach unten und umgekehrt. Auf die gleiche Weise werden rechts und links vertauscht. Anhand der Messwerte kann man die beiden Abbildungsgesetze aus Kapitel 2.8 überprüfen. Es gilt:

$$\frac{B_H}{G_H} = \frac{11\text{cm}}{4,4\text{cm}} = 2,5$$

$$\frac{B_B}{G_B} = \frac{7,5\text{cm}}{3\text{cm}} = 2,5$$

$$\frac{b}{g} = \frac{47\text{cm}}{19\text{cm}} = 2,47$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{47\text{cm}} + \frac{1}{19\text{cm}} = 0,0739$$

und damit

$$f = 13,53\text{cm}.$$

Man kann die Brennweite der Linse überprüfen, indem man mit ihr auf einem Schirm ein scharfes Bild eines weit entfernten Gebäudes erzeugt und den Abstand zwischen Linse und Schirm misst. Es ergibt sich eine Brennweite von  $f = 13 - 14\text{cm}$ . Die Ergebnisse bestätigen die Abbildungsgesetze aus Kapitel 2.8.

### **Versuch 3: Beugung am Gitter**

#### **Geräte:**

Man benötigt das LED-Licht, die Einlochblende, die Blende mit dem optischen Gitter mit einer Gitterkonstanten  $g = 1 \cdot 10^{-6}\text{ mm}$ , einen kleinen Gummi, eine optische Bank, drei Halteklammern, einen Blendenhalter, eine Linse mit einer Brennweite von  $f = 10 - 15\text{ cm}$ , ein Lineal und einen Schirm. Man kann auch die selbstgebaute LED-Lampe verwenden (vgl. Versuch 2, Kapitel 4.1). Sie ist wesentlich lichtstärker und liefert auch bei hellerem Umgebungslicht ein gut sichtbares Spektrum.

#### **Durchführung:**

Man steckt die Linse, den Blendenhalter und den Schirm auf je eine Klammer und verankert sie an der optischen Bank. Man befestigt die Lochblende mit dem Gummi am Nachtlicht und platziert sie vor der Linse. Man verschiebt die Linse solange, bis auf dem Schirm ein punktförmiges Bild der Lochblende bzw. der LED zu sehen ist. Dann steckt man die Gitterblende auf den Blendenhalter.

#### **Beobachtung:**

Rechts und links vom weißen Punkt der LED sieht man auf dem Schirm jeweils ein Spektrum in den Farben blau, grün und rot. Man misst die Entfernung  $l$  Gitter-Schirm und die Abstände  $z$  der einzelnen Farben rechts und links vom Hauptmaximum:

$$l = 6\text{cm}$$

$$z_{\text{rot}} = 10\text{cm}$$

$$z_{\text{grün}} = 7,5\text{cm}$$

$$z_{\text{blau}} = 6\text{cm}.$$

#### **Auswertung:**

Nach Kapitel 2.9 gilt für die Winkel, unter denen das 1.Neben-maximum für die einzelnen Farben auftritt:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z}{2l}\right).$$

Für die einzelnen Farben ergeben sich folgende Werte:

$$\alpha_{\text{rot}} = 39,8^\circ$$

$$\alpha_{\text{grün}} = 32^\circ$$

$$\alpha_{\text{blau}} = 26,6^\circ.$$

Für die Wellenlängen erhält man mit Kapitel 2.9:

$$\lambda = \frac{g * \sin \alpha}{k}$$

und damit für die einzelnen Farben mit  $k = 1$  und  $g = 1\text{mm}/1000$ :

$$\lambda_{\text{rot}} = 640\text{nm}$$

$$\lambda_{\text{grün}} = 530\text{nm}$$

$$\lambda_{\text{blau}} = 448\text{nm}.$$

Diese Werte stimmen sehr gut überein mit den Werten in einer Spektraltafel.<sup>1)</sup>

#### **Versuch 4: Brechung am Prisma**

##### **Geräte:**

Man benötigt die LED-Matrixlampe, eine Einlochblende, einen kleinen Gummi, Stativmaterial, eine Linse mit  $f = 15\text{ cm}$ , ein Geradsichtprisma und einen Schirm.

##### **Durchführung:**

Man befestigt mit dem Gummi die Einlochblende an der LED-Matrix der Lampe, so dass nur eine LED den Schirm anstrahlt. Dann bildet man diese LED mit der Linse auf dem Schirm scharf ab. Zwischen Linse und Schirm schiebt man das Geradsichtprisma.

##### **Beobachtung:**

Man sieht auf dem Schirm ein Spektrum in den Farben violett, grün, gelb orange und rot. Blau fehlt.

##### **Erklärung:**

Beim Durchgang des Lichtes durch das Prisma wird es zweimal gebrochen, beim Eintritt ins Prisma zum Lot hin und beim Austritt vom Lot weg. Da die Stärke der Brechung von der Wellenlänge des Lichtes abhängt, wird das weiße Licht der LED in seine Farben aufgespalten. In weißen LEDs wird nur blauviolett Licht erzeugt, dass zum Teil durch Fluoreszenzstoffe in die Farben grün, gelb, orange und rot umgewandelt wird. So ergibt sich insgesamt die Farbe Weiß. Hellblau fehlt dabei.

#### **Versuch 5: Halb- und Kernschatten**

##### **Geräte:**

Man benötigt die LED-Matrixlampe, die Blenden aus Kapitel 3.7, eine optische Bank, zwei Halteklammern, eine Krokodilklemme, um die Schattenkörper aufstellen zu können, einen Schirm und ein Lineal.

**Durchführung:**

Man steckt die Krokodilklemme und den Schirm auf je eine Halteklammer und verankert sie an der optischen Bank. Man richtet die LED-Matrix auf den Schirm. Man spannt den Schattenkörper aus Karton in die Krokodilklemme. Man blendet mit der Ein-, Zweilochblende bzw. Dreilochblende eine, zwei bzw. drei LEDs aus, indem man sie mit dem Gummi an der LED-Lampe befestigt. Beim Versuch mit der Einlochblende misst man die Größe  $S$  des Schattens, die Größe  $G$  des Schattenkörpers, die Entfernung  $s$  zwischen der LED-Matrix und dem Schirm und die Entfernung  $g$  des Schattenkörpers von der LED-Matrix.

**Beobachtung:**

Verwendet man die gesamte LED-Matrix mit 5x3 LEDs, so erhält man auf dem Schirm einen Kernschatten, der oben und unten von je vier Halbschatten und rechts und links von je zwei Halbschatten umgeben ist. Die Halbschatten werden nach außen immer heller. Mit der Zweilochblende besitzt der Kernschatten rechts und links je einen Halbschatten, mit der Dreilochblende rechts und links jeweils einen dunkleren und einen helleren Halbschatten. Oben und unten fehlen die Halbschatten. Mit der Einlochblende beobachtet man nur einen scharfen Kernschatten und keine Halbschatten. In diesem Fall misst man z.B. folgende Werte:

$$S = 12\text{cm}$$

$$G = 3\text{cm}$$

$$s = 60\text{cm}$$

$$g = 15\text{cm}.$$

Mit Hilfe der Messwerte überprüft man das Schattengesetz aus Kapitel 2.11. Es gilt:

$$\frac{S}{G} = \frac{12\text{cm}}{3\text{cm}} = 4$$

$$\frac{s}{g} = \frac{60\text{cm}}{15\text{cm}} = 4.$$

Damit bestätigt sich das Schattengesetz.

**Versuch 6: Farbige Schatten****Geräte:**

Man benötigt die LED-Matrixlampe, die Dreifarbenblende und den Schattenkörper aus Kapitel 3.7, eine optische Bank, zwei Halteklammern, eine Krokodilklemme, um die Schattenkörper aufstellen zu können, einen Schirm.

**Durchführung:**

Man steckt die Krokodilklemme und den Schirm auf je eine Halteklammer und verankert sie an der optischen Bank. Man richtet die LED-Matrix auf den Schirm. Man spannt den Schattenkörper aus Karton in die Krokodilklemme. Man blendet mit der Dreifarbenblende drei LEDs aus, indem man sie mit dem Gummi an der LED-Lampe befestigt. Man entfernt den

Schattenkörper und hält zwischen Schirm und Lampe die Finger einer Hand. Mit ihnen bildet man einen Ring.

**Beobachtung:**

Man beobachtet einen schwarzen Kernschatten, der von insgesamt sechs Halbschatten in den drei Grundfarben rot, blau und grün und in den drei Mischfarben cyan, gelb und magenta umgeben ist.

**Erklärung:**

In den Bereich des Kernschattens gelangt das Licht keiner LED. Er ist dunkel. Die roten, grünen und blauen Halbschatten entstehen dort, wo nur das Licht der entsprechenden LED auf den Schirm trifft. Die Mischfarben treten an den Stellen auf, die von zwei der drei LEDs beschienen werden, der cyanfarbige Bereich von der grünen und blauen, der gelbe von der roten und grünen und der magentafarbige von der roten und blauen LED.

**Versuch 7: Optische Hebung**

**Geräte:**

Man benötigt die LED-Matrixlampe, die Einlochblende aus Kapitel 3.7, einen kleinen Gummi, zwei Bechergläser mit  $V = 500\text{ml}$ , Wasser und einige Holzklötze oder Bücher. Für den zweiten Teilversuch benötigt man eine Tasse, ein Becherglas mit Wasser, eine Münze und etwas Tesafilm.

**Durchführung:**

Man legt die LED-Lampe mit der LED-Matrix nach oben auf den Tisch und anschließend die Einlochblende so auf die Matrix, dass man nur noch eine LED leuchten sieht. Man baut vor und hinter der Lampe einen Bücherstapel auf, der etwa 2 cm höher als die Lampe ist. Man peilt über den vorderen Bücherstapel die LED an und senkt dann den Kopf so weit ab, dass man die LED gerade nicht mehr sieht. Man stellt auf die Lücke zwischen den Bücherstapeln über die LED ein Becherglas und füllt es mit dem anderen vorsichtig mit Wasser. Man nimmt das Glas weg und stellt es wieder auf die Bücher. Für den zweiten Teilversuch klebt man die Münze auf den Boden der Tasse. Man peilt die Münze in der Tasse über den Tassenrand an und senkt dann den Kopf so tief, dass man die Münze gerade nicht mehr sieht. Dann gießt man Wasser in die Tasse.

**Beobachtung:**

Füllt man ins Becherglas Wasser, so kann man ab einer bestimmten Füllhöhe die leuchtende LED sehen. Nimmt man das Glas weg, so verschwindet die LED wieder, stellt man es wieder auf die Bücher, erscheint die LED wieder. Beim zweiten Teilversuch kann man die Münze in der Tasse sehen, wenn man Wasser in die Tasse gießt.

**Erklärung:**

Dieses Phänomen ist als optische Hebung bekannt. Beim Übergang der Lichtstrahlen aus dem Wasser in Luft werden sie vom Lot weggebrochen. Strahlen, in der Zeichnung gelb dargestellt, die ohne Wasser am Auge vorbeigingen bzw. wegen des Tassen- bzw. Bücherrandes nicht in unser Auge gelangen können, erreichen nun unser Auge, da sie vom geradlinigen Weg abgelenkt wurden (s. Abb. 1). Die von einem Punkt P der Münze bzw. der LED ausgehenden Strahlen treffen als divergentes Bündel ins Auge. Das Auge meint, sie kämen von einem Punkt P' her, der höher im Wasser liegt als der ursprüngliche Gegenstandspunkt. So

ergibt sich insgesamt ein virtuelles Bild des Gegenstandes. Beim Versuch mit der LED werden die Lichtstrahlen insgesamt mehrfach gebrochen, beim Eintritt ins Glas zum Lot hin, beim Übergang ins Wasser ein wenig vom Lot weg und beim Austritt aus dem Wasser stark vom Lot weg. Insgesamt ergibt sich aber die gleiche Erscheinung wie beim Münzversuch, da die entscheidende Brechung in beiden Fällen beim Übergang vom Wasser in die Luft an der Wasseroberfläche geschieht.

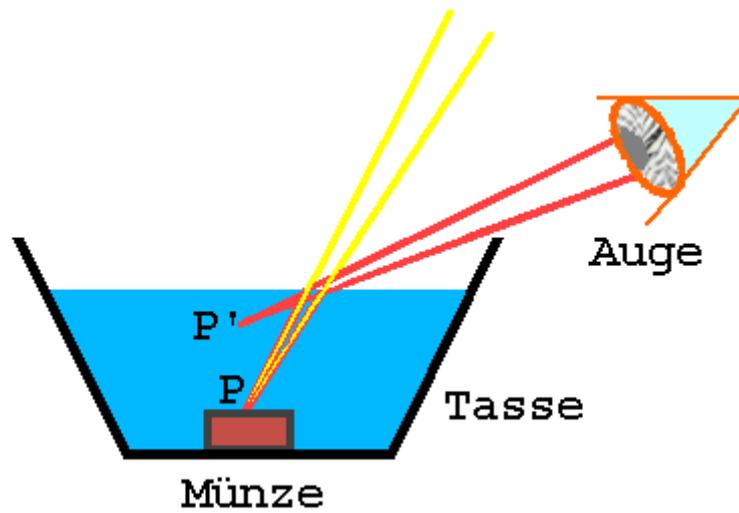


Abb.1: optische Hebung

## 5. Literatur

- 1) Dorn-Bader, Physik Gymnasium SII, Braunschweig 2010, Bildungshaus Schulbuchverlage
- 2) Alonso-Finn, Fundamental University Physics, Fields and Waves II, Addison-Wesley Publishing Company, 7. Ausgabe, Reading Massachusetts 1975