

# Optoelektronik

Alfons Reichert



Stolberg, im Juli 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Vorwort .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Physikalische Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Praktische Anwendungen.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Leuchtdioden .....</b>	<b>11</b>
3.1.1 Aufbau des Versuchsbrettes .....	11
3.1.2 Versuche mit dem LED-Brett.....	17
3.1.3 Leuchtmobile.....	24
3.1.4 Leuchtmittel .....	27
<b>3.2 Fotosensoren .....</b>	<b>49</b>
3.2.1 Fotowiderstände .....	49
3.2.2 Fotodioden .....	51
3.2.3 Fototransistoren.....	53
<b>3.3 Solarzellen.....</b>	<b>67</b>
3.3.1 Versuche mit einer Solarbatterie .....	67
3.3.2 Eigenschaften einer Solarzelle .....	68
<b>4. Literatur.....</b>	<b>78</b>

# 1. Vorwort

Glaubt man den Aussagen der Experten, so gehört den LED-Leuchtmitteln die Zukunft. Sie haben eine höhere Lichtausbeute und eine längere Betriebsdauer als Energiesparlampen. Sie können mit ungefährlichen Niedervoltspannungen betrieben werden. LEDs entwickeln viel weniger Hitze und sind unempfindlich gegen Stöße und Vibrationen. Außerdem lassen sie sich in kleinen Abmessungen bauen, so dass man sie flächenhaft verteilen und damit wie eine Tapete an die Wand kleben kann. In Taschenlampen, Fernsehern, als Signallampen und für spezielle Leuchteffekte in Reklamen und Partykellnern haben sie heute schon fast alle herkömmlichen Leuchtmittel verdrängt. In vielen Haushalten sorgen sie bereits für das nötige Licht. Ihr relativ hoher Preis amortisiert sich nach ein oder zwei Jahren Betriebsdauer.

Viele von Ihnen kennen sicherlich den Krimi „Mörder ahoi“ von Agatha Christie, in dem Miss Marple ihrem Mister Stringer per Taschenlampe von einem Schiff aus Informationen und Aufträge zumorst. Aber mit Licht kann man nicht nur morsen, sondern auch komplexe Informationen übertragen. Man denke nur an moderne IR-Kopfhörer, bei denen Musik mit Infrarotlicht zum Kopfhörer gesendet wird, oder an Fernbedienungen, mit denen man elektronische Geräte mit Infrarot steuern kann. Ein anderes Beispiel sind sogenannte Lichtleiter, in denen moduliertes IR-Licht Fernsehprogramme oder andere Informationen überträgt. Dieser Technik wird eine große Zukunft vorausgesagt, da moderne Glasfaserkabel viel mehr Kanäle gleichzeitig weiterleiten können als herkömmliche Kupferkabel. Auch in Lichtschranken werden lichtempfindliche Bauteile eingesetzt, um Türen, Lampen, Alarmanlagen und Zeitnahmen bei Sportveranstaltungen zu steuern oder Besucher zu zählen.

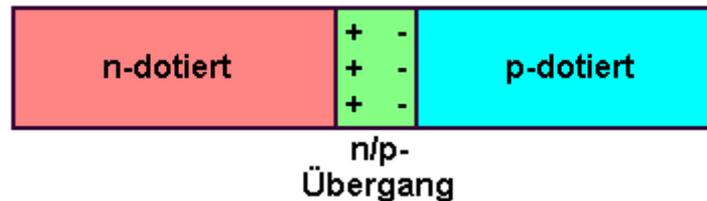
LEDs wandeln elektrische Energie in Lichtenergie um. Dem umgekehrten Prozess, von den Physikern als Fotoeffekt bezeichnet, wird eine glänzende Zukunft prognostiziert. Solarzellen sollen nach dem Willen einiger Politiker die Energieprobleme der Zukunft lösen. Inzwischen produzieren sie auf vielen Dächern und in großen Solarparks preiswert elektrische Energie. Sie sind konkurrenzfähig geworden zu herkömmlichen Kraftwerken.

All das ist Grund genug, sich mit diesem Thema auch in der Schule zu befassen. Man vermittelt so den Schülern das Gefühl, quasi an vorderster Front des technischen Fortschritts zu stehen. Das motiviert nach meinen Erfahrungen die Schüler besonders, zumal den Schulen vielfach der Vorwurf gemacht wird, mit ihren Inhalten im vorletzten Jahrhundert stehen geblieben zu sein und weit ab von der Erfahrungswelt der Schüler zu sein.

Stolberg, im Januar 2009 und Juli 2015

## 2. Physikalische Grundlagen

Der Aufbau einer Solarzelle und einer Leuchtdiode entspricht weitgehend dem einer normalen Diode. Sie weisen drei Schichten auf (s.Abb.1).



**Abb.1: Aufbau einer Diode**

Das Grundmaterial ist Silizium. Die rechte Schicht ist mit einem anderen Element wie Bor, Aluminium, Gallium oder Indium verunreinigt, positiv dotiert. Sie besitzen ein Valenzelektron weniger als Silizium. Die linke Schicht enthält Spuren von Phosphor oder Arsen. Sie ist daher negativ dotiert, da diese Elemente ein Valenzelektron mehr besitzen als Silizium. Beide Schichten sind im isolierten Zustand nach außen elektrisch neutral. Jedoch sind die Gitterstrukturen gestört, da im p-dotierten Teil für ein fehlerfreies Kristallgitter Elektronen fehlen, in der n-dotierten Schicht im Überschuss vorliegen. Berühren sich beide Schichten, so bildet sich zwischen ihnen ein n/p-Übergang aus. Dabei wandern positive Ladungen aus der p-dotierten in die negative Schicht und negative Ladungen aus der n-dotierten in die positive Schicht und füllen die jeweiligen Lücken in der Gitterstruktur auf. Positive Löcher und negative Elektronen neutralisieren sich, man sagt, sie rekombinieren. Dabei wird Energie frei. Das hat jedoch zur Folge, dass die p-dotierte Schicht sich im Grenzbereich negativ auflädt wegen der hinein geflossenen Elektronen, die n-dotierte Schicht positiv wegen der abgewanderten Elektronen. Beide waren zuvor neutral. Es entsteht zwischen den beiden Schichten ein elektrisches Feld, das der Elektronendrift entgegen wirkt. Ist es groß genug, so findet keine weitere Ladungstrennung mehr statt. Bei Silizium tritt dieser Fall bei normaler Dotierung etwa bei  $U = 0,6 \text{ V}$  auf. Durch Verwendung mehrerer verschiedener Dotierungselemente kann man die Sperrspannung jedoch auf einige Volt erhöhen. Baut man dieses elektrische Feld ab, in dem man von außen eine Spannung an die Diode legt, so können ständig Ladungen zwischen den beiden Schichten fließen. Dazu muss man die p-dotierte Schicht mit dem Pluspol der Spannungsquelle, die n-dotierte Schicht mit dem Minuspol verbinden. Die Diode ist in Durchlassrichtung geschaltet. In beiden Schichten rekombinieren immer wieder positive Elektronenlücken und negative Elektronen. Die Elektronen werden ständig durch die Spannungsquelle nachgeliefert. Dabei wird Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung frei. Bei einer Sperrspannung von  $U = 0,6 \text{ V}$  liegt diese Strahlung im Infrarotbereich, da nach quantenphysikalischen Gesetzen gilt:

$$h * f = e * U$$

oder

$$f = \frac{e * U}{h} = \frac{1,6 * 10^{-19} \text{ C} * 0,6 \text{ V}}{6,62 * 10^{-34} \text{ Js}} = 1,45 * 10^{14} \text{ Hz}$$

und damit für die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{1,45 * 10^{14} \text{ Hz}} = 2,07 * 10^6 \text{ m} = 2 \mu\text{m}.$$

Es handelt sich um Wärmestrahlung. Verstärkt man das Feld dagegen durch ein äußeres elektrisches Feld, so sperrt die Diode. Dazu muss die Polung der äußeren Spannungsquelle umgekehrt werden.

Bei **Leuchtdioden** wird durch Dotierung mit verschiedenen Halbleitern die Grenzspannung am p-n-Übergang auf  $U = 1,1\text{V} - 3,5\text{V}$  eingestellt. Wendet man die obige Quantenbedingung an, so ergeben sich für folgende Spannungen

$$U_1 = 1,3 \text{ V}$$

$$U_2 = 1,8 \text{ V}$$

$$U_3 = 3,5 \text{ V}$$

die Wellenlängen:

$$\lambda_1 = 956 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 690 \text{ nm}$$

$$\lambda_3 = 355 \text{ nm}.$$

Die erste Wellenlänge liegt im infraroten, die zweite im roten und die dritte im UV-Bereich. Es bleibt die Frage, warum man die Quantenbedingung in so einfacher Weise auf LEDs anwenden darf.

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<sup>10),11),5)</sup>:

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

Darin bedeuten:

I: Stromstärke,

$I_0$ : Leckstrom (s.u.),

e: Elementarladung,

U: Spannung,

h: Plancksche Konstante,

f: Frequenz des ausgesandten Lichts,

k: Boltzmann-Konstante,

$\Delta T$ : Temperaturunterschied zwischen p- und n-Schicht.

Herleiten kann man diese Gleichung wie folgt. Man stelle sich die LED wie einen Fluss vor, in dem man eine Staumauer errichtet. Danach kann das Wasser auf zwei Arten zu Tale fließen. Durch kleine Risse in der Mauer sickert ein kleiner Teil talwärts. Der größte Teil strömt über die Mauerkrone, wenn sich das Staubecken gefüllt hat. Diesen Teil des Wassers kann man nutzen, um eine Turbine anzutreiben, die die Energie des Wassers in elektrische Energie umwandelt. Die nutzbare Energie ist umso größer, je höher die Staumauer ist. Erhöht sich der Wasserstand in der Talsperre, kann auch mehr Wasser genutzt werden, um Energie zu gewinnen. Gleichzeitig nimmt der Sickerwasserstrom zu. Der Wasserstrom über die Krone steigt umso mehr, je breiter der Fluss ist, je mehr Wasser er normalerweise führt. Auf den Strom übertragen bedeutet das: Die Stromänderung  $dI$  in einer LED bei Erhöhung der Spannung um  $dU_D$  setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, einem Anteil, der dem Ohmschen Gesetz folgt, auch Leckstrom genannt, und einem Anteil, bei dem die Änderung des Stromes proportional zum Strom selbst ist. Es gilt somit:

$$dI = u * I * dU_D + \frac{dU_D}{R}.$$

Darin ist  $u$  eine Proportionalitätskonstante mit der Einheit  $1/V$  und  $R$  der Ohmsche Widerstand der Grenzschicht mit der Einheit  $V/A$ . Umstellen liefert:

$$\frac{dI}{\left(u * I + \frac{1}{R}\right)} = dU_D.$$

Integriert man diese Gleichung, so folgt:

$$\frac{\ln\left(u * I + \frac{1}{R}\right)}{u} = U_D + C.$$

mit  $C$  als Integrationskonstante. Ihren Wert erhält man, wenn man sich überlegt, dass bei einer Spannung  $U_D = 0$   $I = 0$  sein muss. Damit ergibt sich für  $C$

$$C = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{u}$$

und damit:

$$\ln\left(\frac{\left(u * I + \frac{1}{R}\right)}{\frac{1}{R}}\right) = u * U_D.$$

Man multipliziert mit  $u$  und potenziert die Gleichung. Es folgt:

$$\frac{\left(u * I + \frac{1}{R}\right)}{\frac{1}{R}} = \exp(u * U_D)$$

oder

$$u * I + \frac{1}{R} = \frac{1}{R} * \exp(u * U_D)$$

und damit

$$I = \frac{1}{u * R} * (\exp(u * U_D) - 1).$$

Es bleibt die Frage, was bedeutet  $u$ . Aufgrund ihrer Einheit ist sie der Kehrwert einer Spannung und zwar der Spannung  $U_e$ , die man anlegen muss, damit der Strom um den Wert  $e$  ansteigt mit  $e$  als Eulerscher Zahl. Man kann daher für  $u$  auch setzen:

$$u = \frac{1}{U_e}.$$

Damit folgt:

$$I = \frac{U_e}{R} * \left(\exp\left(\frac{U_D}{U_e}\right) - 1\right) = I_0 * \left(\exp\left(\frac{U_D}{U_e}\right) - 1\right).$$

Darin wurde der Quotient aus  $U_e$  und  $R$  definitionsgemäß gleich  $I_0$  gesetzt. Spannungsschwankungen oder Energieschwankungen der Ladungen in der LED treten meist durch Temperaturschwankungen  $\Delta T$  zwischen den beiden Schichten auf. Nach der kinetischen Gastheorie gilt bei solchen Temperaturschwankungen:

$$e * U_e = k * \Delta T$$

und damit:

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

Darin ist  $k$  die Boltzmann-Konstante. Diese Annahme ist zulässig, da sich Elektronen in Leitern wie ein Gas verhalten. Legt man von außen eine Spannungsquelle  $U$  an die LED, so muss zunächst die n-Schicht mit Elektronen überflutet werden. Außerdem muss ihre Energie soweit erhöht werden, dass sie den Energiewall überwinden können. Erst dann können sie in die p-Schicht diffundieren. Analoge Überlegungen gelten für die positiven Löcher. Dabei wird ihre überschüssige Energie als Lichtquant  $h * f$  frei mit  $h$  als Planckschem Wirkungsquantum und  $f$  als Frequenz. Für die Diffusion steht damit noch eine Spannung zur Verfügung, für die gilt:

$$e * U_D = e * U - h * f.$$

Damit folgt letztendlich für den Strom durch eine LED:

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

Wertet man diese Funktion für verschiedene Frequenzen bzw. Wellenlängen bei  $\Delta T = 20\text{K}$  und  $I_0 = 1 * 10^{-10}\text{A}$  mit Excel aus, so erhält man die Kurven in Abb.2.

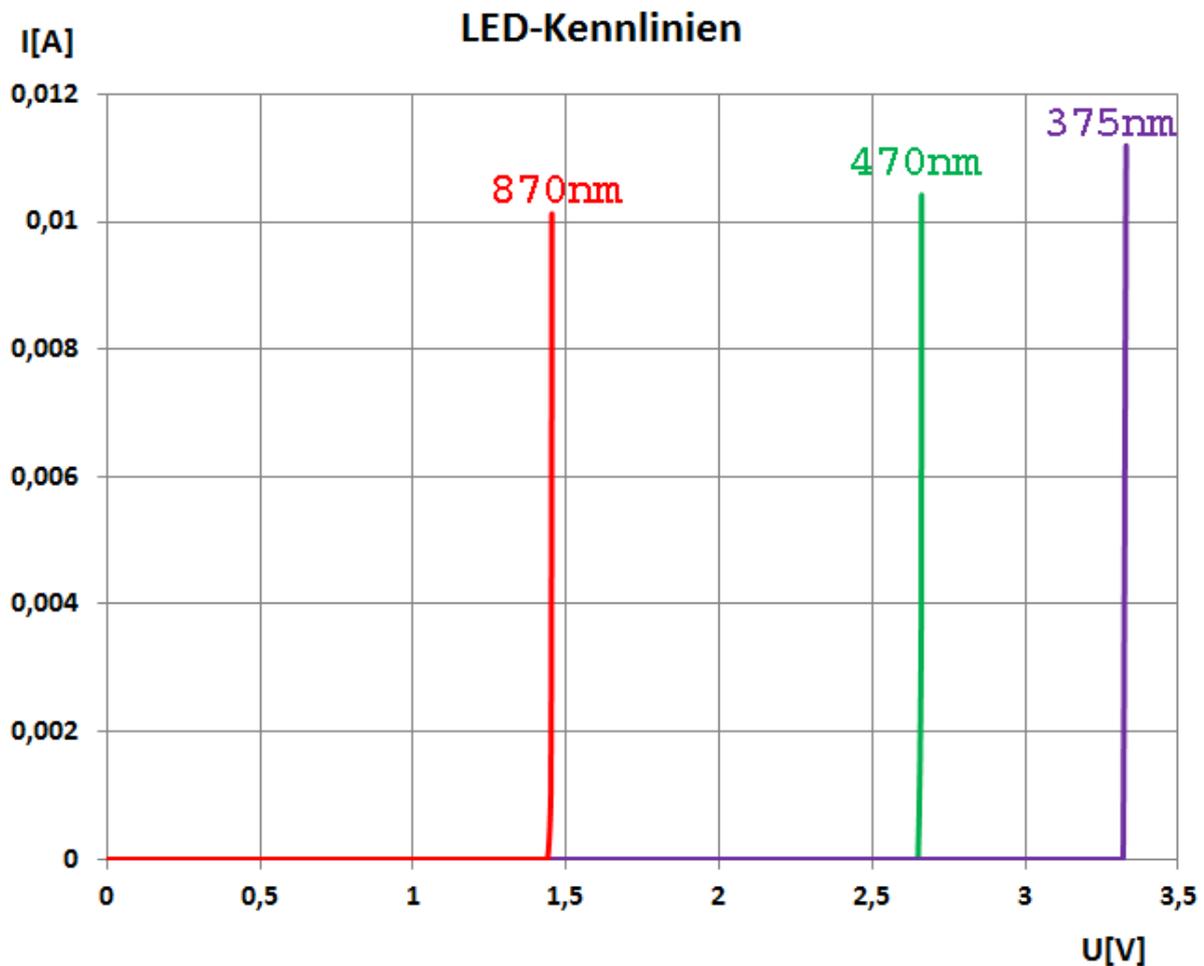


Abb.2: LED-Kennlinien für verschiedene Wellenlängen

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 an, so steigt der Strom zunächst sehr langsam an, ab einer gewissen Spannung schnell er sehr steil nach oben in den 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 (vgl. Kapitel 3.1.2 Versuch 3a/3b). Allerdings verlaufen die Kennlinien bei realen LEDs im zweiten Teil weniger steil, da sie einen Ohmschen Widerstand im Zu- und Ablauf zur Grenzschicht besitzen, der den Anstieg begrenzt. Bei einer ge-

wissen Spannung  $U_0$  ist  $I = 0$ . Sie kann man aus der Gleichung der Kennlinie wie folgt ermitteln. Zunächst logarithmiert man Gleichung (1) und erhält:

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

oder

$$e * U = h * f + k * \Delta T * \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \quad (2).$$

Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen  $U$  und  $f$  bei konstanter Temperaturerhöhung und konstantem Strom. Diese Gleichung kann man energetisch deuten. Die von der Spannungsquelle den Ladungsträgern zugeführte Energie muss einerseits ihre zusätzliche thermische Bewegungsenergie aufbringen, damit sie durch die Grenzschicht diffundieren können. Andererseits muss sie die Energie zur Verfügung stellen, die nötig ist, um das elektrische Gegenfeld in der Grenzschicht zu überwinden. Diese Energie wird bei der Rekombination der positiven und negativen Ladungsträger als Lichtquant abgestrahlt. Für  $I = 0$  folgt:

$$e * U_0 = h * f.$$

Die Spannung  $U_0$  kann man näherungsweise bestimmen, in dem man gemäß Gleichung (2) einen sehr kleinen konstanten positiven Strom durch die LED schickt oder den steil ansteigenden Teil der Kennlinie auf die  $U$ -Achse extrapoliert. Allerdings begeht man bei beiden Verfahren einen kleinen Fehler. Beim ersten sind die gemessenen Spannungen nach Gleichung (2) ein wenig zu hoch, beim zweiten ein wenig zu tief, da die Kennlinie einer realen LED wegen des Ohmschen Widerstandes weniger steil ansteigt als bei einer idealen. Beide Fehler sind jedoch gering.

In jedem Fall gilt bei konstantem Temperaturunterschied  $\Delta T$  und konstanter Stromstärke  $I$  für die Steigung  $m$  der Geraden nach Gleichung (2):

$$m = \frac{U_2 - U_1}{f_2 - f_1} = \frac{h}{e}.$$

Aus ihr kann man daher mit großer Genauigkeit die Plancksche Konstante ermitteln.

Ein **Fotowiderstand** besteht aus reinem Halbleitermaterial, also z.B. aus Silizium. Es leitet relativ schlecht, da sich im Gegensatz zu Metallen nur wenige Elektronen frei bewegen können. Sie sind zum weitaus größten Teil an die Atome gebunden. Man sagt, die meisten Elektronen befinden sich im Valenzband, nur wenige im Leitungsband. Zwischen beiden besteht eine Energielücke, die in Elektronenvolt bzw. Volt angegeben wird. Bestrahlt man den Halbleiter mit Licht, so werden Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben, wenn die Energie der Photonen ausreicht, um die Lücke zwischen beiden Bändern zu überwinden. Die Leitfähigkeit steigt, der Widerstand

sinkt z.B. von  $10\text{M}\Omega$  bei Dunkelheit auf  $200\Omega$  bei hellem Sonnenlicht. Beim Silizium haben das Leitungsband und das Valenzband einen Energieabstand von

$$W = 1,1\text{eV}.$$

Damit genügt Licht der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c * h}{e * U} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s} * 6,62 * 10^{-34} \text{ Js}}{1,6 * 10^{-19} \text{ C} * 1,1 \text{ V}} = 1,128 \mu\text{m},$$

um die Leitfähigkeit zu erhöhen. Es handelt sich um infrarotes Licht.

**Fotodioden** werden in Sperrrichtung betrieben. Dadurch steigt die Grenzspannung. Durch auftreffendes Licht passender Energie können in der Grenzschicht jedoch Elektronen und Löcher getrennt werden, die vom elektrischen Feld in die beiden Schichten abgetrieben werden, die Elektronen in die n-Schicht, die Löcher in die p-Schicht. Es fließt ein Strom, der proportional zur Intensität des eingestrahlteten Lichtes ist. In einem zur Fotodiode in Reihe geschaltetem Widerstand baut sich eine Spannung auf, die weiter verstärkt wird und andere Bauteile steuert, bei einer Lichtschranke z.B. einen nach geschalteten Transistor. Fotodioden werden aber vor allem in CCD-Chips der Digitalkamera, des Camcorders und der Webcam eingesetzt. Das einfallende Licht wird durch Farbfilter in seinen Rot-, Grün- und Blauanteil zerlegt, so dass sie getrennt ausgewertet werden können. Es entsteht ein Bild im RGB-Farbcode.

Bei **Fototransistoren** wird der Basisstrom nicht wie bei einem normalen Transistor durch eine von außen angelegte Spannung gesteuert, sondern durch Photonen. Die Intensität des eingestrahlteten Lichtes regelt den Basisstrom und damit den Kollektor-Emitter-Strom.

Bei **Solarzellen** wird keine Spannung von außen angelegt. Die Grenzspannung beträgt also  $U_0 = 0,6\text{V}$ . Bestrahlt man die Zelle mit sichtbarem Licht, so werden in der Grenzschicht Elektronen und Löcher durch die Photonen getrennt. Ihre Energie ist jedoch größer als die Energie, die eigentlich zur Trennung von Elektronen und Löchern benötigt wird. Die überschüssige Energie liegt als kinetische Energie der Elektronen vor. Das elektrische Feld treibt sie in die n-Schicht und von dort über einen Verbraucher zur p-dotierten Schicht und zurück in die Grenzschicht. Die n-dotierte Schicht wird zum Minuspol, die p-dotierte zum Pluspol. In der Übergangsschicht rekombinieren sie wieder mit den durch die Bestrahlung entstandenen Löchern und das ganze Spiel beginnt von vorn. Die entnehmbare Spannung ist etwas kleiner als die Grenzspannung, da ansonsten das elektrische Feld, das die Elektronen antreibt, komplett abgebaut würde und damit der Elektronenfluss zum Stillstand käme.

Um den Schülerinnen und Schülern die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten moderner optoelektronischer Bauelemente demonstrieren zu können, habe ich eine Reihe von Versuchen entwickelt und geprüft, die ich in den folgenden Kapiteln vorstelle. Beginnen möchte ich mit den Leuchtdioden. Da inzwischen eine ganze Palette verschiedener LEDs angeboten wird, habe ich ein Versuchsbrett mit diversen Leuchtdioden und den für sie benötigten Stromquellen zusammengestellt. Mit ihm lassen sich ihre Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten sehr gut testen.

## 3. Praktische Anwendungen

### 3.1 Leuchtdioden

#### 3.1.1 Versuchsbrett

Zum Aufbau des Brettes benötigt man folgende Teile:

- 1 Sperrholz- oder Pertinaxplatte 30cmx50cm
- 4 Holzlatten der Dicke 2cmx2,5cm passender Länge
- 3 LED-Stromquellen, 2x 2-20mA, 1x0,2-2mA
- 1 Stromquelle 5V mit vier verschiedenen Ausgängen
- 1 LED-Treiber RCD-24-0.35
- 1 LED-Streifen mit 5 LEDs 12V
- 3 Stufenschalter 1x12
- 1 Rocket LED weiß
- 1 Rocket LED rot
- 1 Rocket LED orange
- 1 Rocket LED gelb
- 1 Rocket LED grün
- 1 Rocket LED blau
- 1 Rocket LED pink
- 2 IR-LEDs unterschiedlicher Wellenlänge
- 2 UV-LEDs unterschiedlicher Wellenlänge
- 1 Standard-LED rot
- 1 Standard-LED gelb
- 1 Standard-LED grün
- 1 Low-Current-LED rot
- 1 Low-Current-LED gelb
- 1 Low-Current-LED grün
- 1 Blink-LED rot
- 1 Full-Color-RGB-LED
- 1 Effekt-LED
- 1 RGB-LED
- 1 Dual-LED
- 2 High-Power-LEDs, weiß, 1W
- 20 Chrom-LED-Fassungen
- 2 Kunststoff-LED-Fassungen
- 18 Telefonbuchsen rot
- 19 Telefonbuchsen schwarz
- 4 Telefonbuchsen blau
- 2 Telefonbuchsen grün
- 11 Drehknöpfe für die Wahlschalter und die Stromquellen
- 14 Schrauben 2mm\*20mm mit Mutter
- Schaltlitze
- Lötmaterial.

Die einzelnen Baugruppen und Bauteile kann man beliebig auf der Platte anordnen, da die Ein- und Ausgänge aller Teile an Telefonbuchsen verlötet werden, über die sie nach Belieben miteinander verschaltet werden können. Eine Möglichkeit zeigen die Abbildungen 1 und 2.

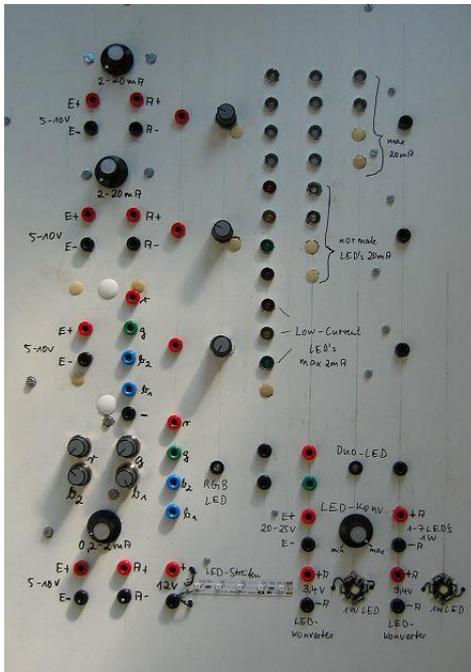


Abb.1: Vorderseite

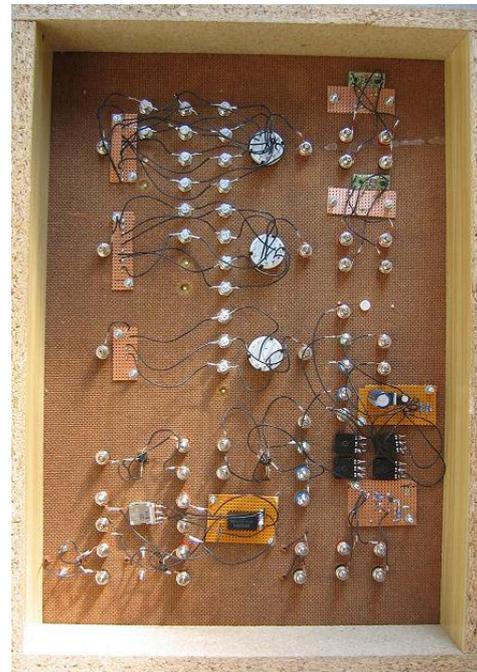


Abb.2: Rückseite

Links befinden sich die Stromquellen, rechts daneben die Stufenschalter, über die die rechts liegenden LED-Gruppen angewählt werden können. Die Full-Color-LED und die Dual-LED müssen getrennt angebracht werden, da sie über mehrere Anoden- bzw. Kathodenanschlüsse verfügen und daher über besondere Stromquellen betrieben werden. Der LED-Streifen benötigt eine externe 12V-Spannungsquelle. Die beiden Hochleistungs-LEDs werden rechts unten auf dem Brett angebracht. In ihrer Nähe wird auch der für sie benötigte LED-Treiber befestigt.

Zunächst stellt man die Stromquellen für die herkömmlichen LEDs her. Sie besitzen den elektronischen Aufbau nach Abb.3. An der Zenerdiode bzw. den beiden auf Durchlass geschalteten Dioden fällt eine Spannung von

$$U_1 = 1,5 V$$

ab. Davon entfallen auf die Basis-Emitter-Strecke ca.

$$U_2 = 0,7 V.$$

Es verbleiben zwischen Emitter und Minuspol

$$U_3 = 1,5 V - 0,7 V = 0,8 V.$$

Um mit ihnen einen Strom von

$$I_1 = 2 mA$$

aufrecht zu erhalten, muss der Emitterwiderstand  $R_1$

$$R_1 = \frac{0,8 V}{0,002 A} = 400 \Omega$$

betragen. Für

$$I_2 = 20 mA$$

gilt:

$$R_2 = 40 \Omega.$$

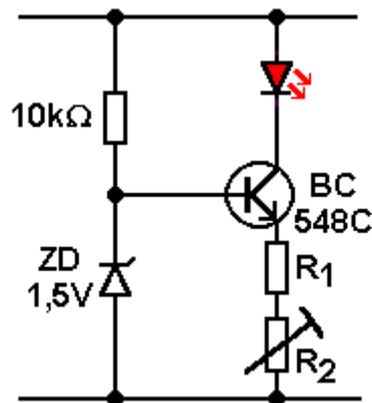


Abb.3: Schaltplan der Stromquellen

Passende gängige Werte sind 390Ω und 39Ω. Mit Hilfe eines in Reihe geschalteten Trimmers kann man den Strom jeweils herunterregeln, mit einem Trimmer

$$R_3 = 5 k\Omega$$

auf

$$I_3 = \frac{0,8 V}{390 \Omega + 5000 \Omega} = 0,15 mA.$$

und mit einem Trimmer

$$R_4 = 500 \Omega$$

auf

$$I_4 = \frac{0,8 V}{39\Omega + 500\Omega} = 1,5 mA.$$

Man benötigt für die Stromquellen pro Stück folgende Bauteile:

- 1 Zehnerdiode 1,5V oder
- 2 Universaldioden 1N4148
- 1 Widerstand 10k $\Omega$
- 1 Widerstand 39 $\Omega$  bzw. 390 $\Omega$
- 1 Trimmer 500 $\Omega$  bzw. 5k $\Omega$
- 1 Transistor BC548C
- 1 Stück Platine 4cmx6cm RM 2,52mm
- Schaltlitze
- Lötmaterial.

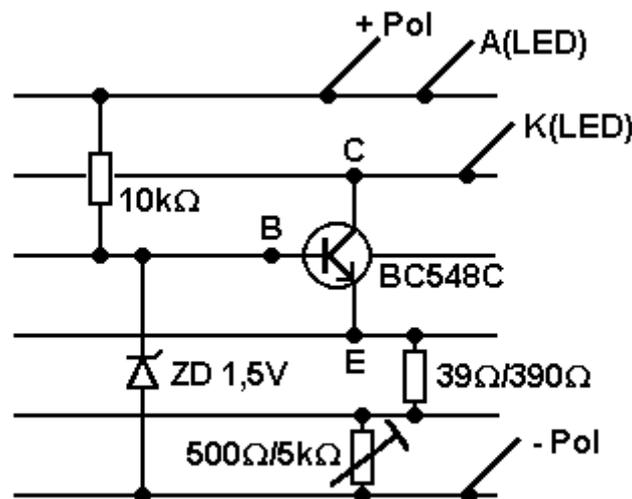


Abb.4: Verschaltung auf einer Platine

Abb.4 zeigt, wie man die Bauteile der Stromquellen auf einer Lochrasterplatine verlötet. Den Schaltplan der 5V-Stromquelle entnehmen Sie Abb.5. Für ein Exemplar sind erforderlich:

- 1 Festspannungsregler 7805
- 1 Elektrolytkondensator 1000 $\mu$ F
- 1 Elektrolytkondensator 100 $\mu$ F
- 2 Widerstände 47 $\Omega$
- 1 Widerstand 150 $\Omega$
- 1 Widerstand 170 $\Omega$
- 4 Potis 10k $\Omega$  linear
- 1 Stück Platine 4cmx6cm RM 2,52mm
- Schaltlitze
- Lötmaterial.

Abb.6 macht deutlich, wie man die Teile auf der Platine verlöten muss.

Man befestigt die fertigen Platinen mit je 2 Schrauben auf der Rückseite der Sperrholzplatte. Dabei werden sie an den Schrauben mit jeweils zwei Scheiben unterlegt, damit die Trimmer der Konstantstromquellen nicht zu weit aus der Platte herausragen. Die Trimmer führt man durch eine Bohrung auf die Vorderseite der Platte. Zum Schluss verlötet man die Anschlüsse der Platine mit den entsprechenden Buchsen.

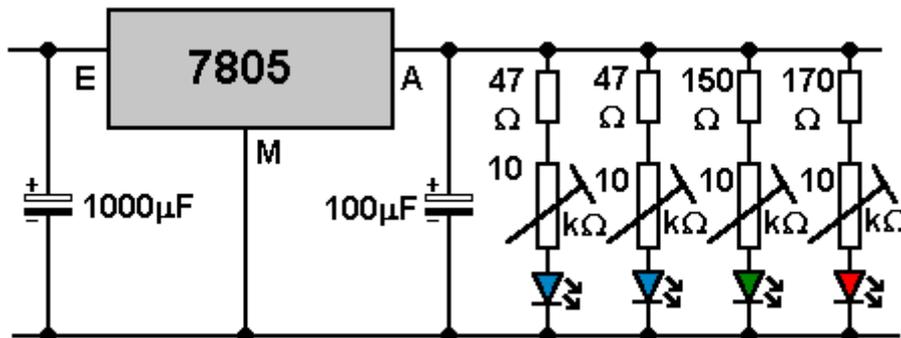


Abb.5: Schaltplan 5V-Stromquelle

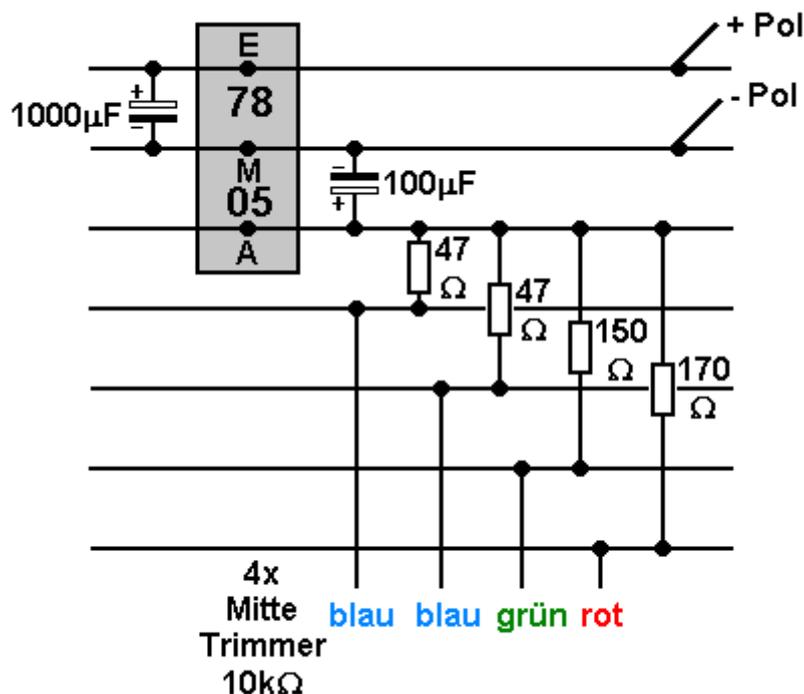
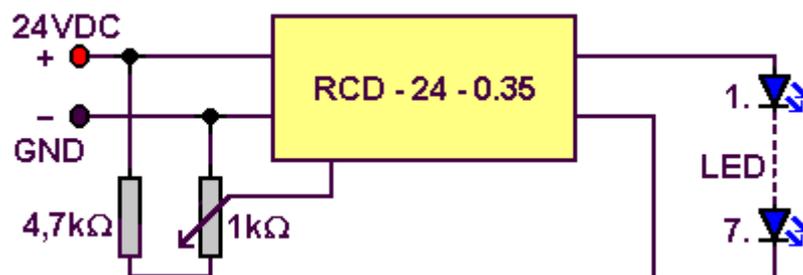


Abb.6: Verschaltung auf einer Platine

Bei der 5V-Stromquelle verschraubt man die Potentiometer an der Platte und verlötet ihren Mittenabgriff mit den Anschlüssen auf der Platine und ihren linken bzw. rechten Abgriff mit den Telefonbuchsen der entsprechenden Farbe. Ob man dabei den linken oder rechten Abgriff benutzen muss, hängt von der gewünschten Drehrichtung der Potis ab.

Für die Hochleistungs-LEDs benötigt man einen speziellen Treiber. Sehr gut geeignet ist das IC RCD-24-0.35 der Firma [recom-international](http://www.recom-international.com), da es alle Bauteile in einem Gehäuse vereinigt

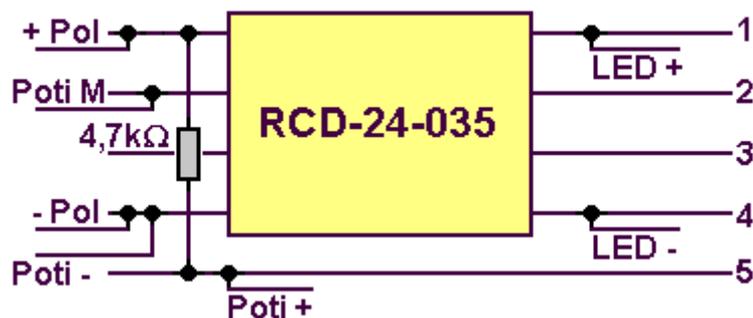
bis auf einen Widerstand und ein Poti. Außerdem lassen sich damit die LEDs dimmen. Den Schaltplan entnehmen Sie Abb. 7.



**Abb.7: LED-Treiber RCD-42-0.35 mit Dimmfunktion**

Man benötigt also:

- 1 LED-Treiber RCD-24-0.35
- 1 Lochrasterplatine 4x6cm RM 2,52mm
- 1 Widerstand 4,7kΩ
- 1 Poti 1kΩ lin
- etwas Schalltitzte
- etwas Lötmaterial.



**Abb.8: Verschaltung des Treibers auf einer Platine**

Abb.8 zeigt die Verschaltung auf der Platine. Dabei müssen die Leiterbahnen unter dem IC mit einem scharfen Teppichmesser unterbrochen werden, da die Anschlüsse zu beiden Seiten des ICs keine Verbindung haben dürfen. Man befestigt die fertige Platine mit je 2 Schrauben auf der Rückseite der Sperrholzplatte. Das Potentiometer und die Ein- und Ausgangsbuchsen, je eine schwarze für die Minuspole und je eine rote für die Pluspole, werden ebenfalls auf der Holzplatte verschraubt. Zum Schluss verlötet man mit Schalltitzte die Anschlüsse der Platine mit den entsprechenden Buchsen und dem Potentiometer.

Als nächstes bestückt man die Platte über die Fassungen mit den Leuchtdioden. Die Anordnung ist im Prinzip beliebig. Ich habe sie in drei Gruppen zusammengefasst, die jeweils über einen 1x12 Stufenschalter angewählt werden können. Die erste Gruppe enthält die zwei IR-LEDs, alle Rocket-LEDs und die zwei UV-LEDs. Man benötigt sie für einen Versuch. Die zweite Gruppe bilden die Standard-LEDs, die Blink-LED, die Effekt-LED und die RGB-LED, weil sie jeweils mit 20mA betrieben werden. Die dritte Gruppe besteht aus den Low-Current-LEDs.

Sie kommen mit 2mA aus. Der mittlere Anschluss der Stufenschalter wird mit einer roten Telefonbuchse verlötet. Sie bildet den gemeinsamen Anodenanschluss der LEDs. Die Kathoden werden auf einer kleinen Platine mit Schaltlitze zusammengefasst und mit einer schwarzen Telefonbuchse verbunden. Über den Stufenschalter kann man so über eine gemeinsame Anoden- und Kathodenbuchse die LEDs einer Gruppe nacheinander anwählen. Die Full-Color- und die Dual-LED müssen getrennt verschaltet werden. Die Full-Color-LED enthält zwei blaue, eine rote und eine grüne LED. Sie besitzt somit vier Anodenanschlüsse, zwei für die Farbe blau, einen für rot und einen für grün. Außerdem hat sie zwei Kathodenanschlüsse, einen für eine blaue und die rote LED, den zweiten für die andere blaue und die grüne LED. Sie werden mit Telefonbuchsen entsprechender Farbe, 2xblau, 1xrot, 1xgrün und 2xschwarz verbunden. Die Dual-LED besitzt für jede der beiden Farben einen Anodenanschluss mit einer gemeinsamen Kathode. Auch sie werden über Schaltlitze mit Telefonbuchsen entsprechender Farbe verlötet. Zum Schluss klebt man den LED-Streifen auf die Vorderseite des Brettes und verbindet seine Anschlüsse mit einer roten Telefonbuchse für den Pluspol und einer schwarzen für den Minuspol. Er muss über eine externe Stromquelle mit 12V versorgt werden.

### 3.1.2 Versuche

#### **Versuch 1:**

##### **Durchführung:**

Man schließt die einzelnen LEDs mit Ausnahme der Full-Color-LED über die Stufenschalter an eine der Konstantstromquellen an und regelt mit Hilfe des Potis ihre Helligkeit auf einen in etwa gleichen Wert. Dann betrachtet man das Licht, das sie abstrahlen, durch ein Taschenspektroskop.

##### **Beobachtung:**

Die LEDs strahlen in allen erdenklichen Farben. Bei einigen LEDs sieht man im Spektroskop nur einzelne Farblinien, bei anderen mehrere. Die Blink-LED blinkt mit einer Periodendauer von 2-3s. Die Effekt-LED nimmt im Rhythmus von einigen Sekunden alle Regenbogenfarben an. Der LED-Streifen enthält 5 LEDs, die gleichzeitig leuchten. Low Current LEDs strahlen bei 2mA fast genau so hell wie Standard LEDs bei 20mA.

##### **Ergebnis:**

Einige LEDs erzeugen näherungsweise monochromatisches Licht einer bestimmten Wellenlänge. Dazu gehören die roten, orangefarbenen und die gelben LEDs. Die Farben der anderen setzen sich aus mehreren Farben zusammen. Die grüne LED sendet neben grünem Licht auch Anteile von gelbem und blauem Licht, die blaue auch Grünanteile aus. Die Farbe pink entsteht durch eine Mischung der Farben rot und blau, die weiße Farbe durch Mischen gleicher Anteile der Farben rot, orange, gelb und grün und einem intensiven Anteil violett. Außerdem bieten LEDs eine Reihe verschiedener Effektmöglichkeiten. In der Effekt-LED werden die Anteile von rot, grün und blau mit verschiedenen Intensitäten gemischt und das in einem bestimmten Zeittakt. So entstehen alle erdenklichen Farben, wie man sie vom Computer- oder Fernsehbildschirm kennt. Das zeigt Versuch 2 noch deutlicher. Der LED-Streifen ist sehr flach und kann auf jedes Material geklebt werden. Er soll in naher Zukunft unsere Räume als Tapete beleuchten. In Ampeln und Werbeflächen werden die verschieden farbigen LEDs schon jetzt vielseitig verwendet. Low-Current-LEDs benötigen für die gleiche Helligkeit viel weniger Strom als Standard-LEDs.

Eine Besonderheit bietet die Full-Color-LED. Sie hat drei Anoden für die Farben rot, grün und blau. Mit ihr lassen sich daher alle Farben gezielt erzeugen, die man von einem Computerbildschirm kennt.

### **Versuch 2:**

#### **Durchführung:**

Man schließt die 3 Anoden der RGB-LED an die drei Konstantstromquellen an und verbindet den Minuspol der drei Quellen untereinander und mit der Kathode der LED. Dann verändert man über die Potis die Stromstärken der einzelnen Anoden und betrachtet das Licht der LED jeweils durch ein Handspektroskop.

#### **Beobachtung:**

Die LED leuchtet in allen möglichen Farben, die man vom Computerbildschirm her kennt. Im Handspektroskop beobachtet man eine rote, grüne und blaue Linie unterschiedlicher Intensität.

#### **Erklärung:**

Durch die Stromstärke der einzelnen Konstantstromquellen variiert man die Intensität der drei Grundfarben rot, grün und blau unabhängig von einander. Durch Mischen der drei Grundfarben in verschiedenen intensiven Anteilen lassen sich bis zu 16 Millionen herstellen. Diese Tatsache wird beim Computerbildschirm und beim Farbfernseher ausgenutzt, unabhängig davon, ob es sich um einen Röhren-, Plasma-, LED- oder LCD-Bildschirm handelt.

Aus der Quantenphysik ist bekannt, dass rote Photonen weniger energiereich sind als grüne und diese weniger als violette. Daher ist bei einer roten LED bei gleicher Stromstärke die benötigte Betriebsspannung geringer als bei einer grünen bzw. blauen. Das kann man mit dem folgenden Versuch demonstrieren.

Für den Versuch benötigt man allerdings die Wellenlängen des hauptsächlich ausgesandten Lichtes. Sie werden bei manchen LEDs vom Hersteller angegeben und zwar mit den Werten in Tabelle 1.

### **Versuch 3a:**

#### **Durchführung:**

Man verbindet über den Wahlschalter eine der LEDs mit bekannter Wellenlänge (s. Tabelle 1) mit der Konstantstromquelle der Stärke  $I = 2\text{mA}$  und misst die Spannung an der LED über die rote und schwarze Telefonbuchse. Dann wählt man nacheinander die anderen LEDs an und trägt die gemessenen Spannungen in eine Tabelle ein, wobei die Stromstärke nicht verändert werden darf. Man bezieht auch die beiden IR-LEDs mit ein. Auch sie strahlen hauptsächlich bei einer Frequenz.

#### **Beobachtung:**

Es ergibt sich Tabelle 1.

### **Versuch 3b:**

#### **Durchführung:**

Man benutzt den gleichen Aufbau wie in Versuch 3a. Man schaltet mit der LED ein Amperemeter in Reihe und parallel zur LED ein Voltmeter. Mit dieser Schaltung nimmt man für jede LED die U/I-kennlinie auf, indem man den Strom durch die LED von 2mA auf 20mA in Schritten von etwa 2mA erhöht und sich die jeweiligen Spannungen notiert. Dabei kann man die

gewünschte Stromstärke über das Ausgangspotentiometer und die Eingangsspannung auf den gewünschten Wert einstellen.

LED	$\lambda$ [nm]	$f$ [* $10^{14}$ Hz]	U[V]
IR <sub>1</sub>	940	3,19	1,12
IR <sub>2</sub>	870	3,45	1,38
rot	625	4,8	1,78
gelb	590	5,08	1,87
grün	525	5,71	2,76
blau	470	6,38	2,71
UV <sub>1</sub>	403	7,44	2,93
UV <sub>2</sub>	375	8,0	3,16

**Tabelle 1: Messwerte**

**Beobachtung:**

Für einzelne ausgewählte LEDs erhält man Tabelle 2.

I[mA]	U(940nm)[V]	U(625nm)[V]	U(470nm)[V]
2	1,10	1,78	2,72
4	1,12	1,83	2,80
6	1,15	1,87	2,86
8	1,17	1,91	2,90
10	1,19	1,94	2,94
12	1,21	1,97	2,98
14	1,22	2,00	3,02
16	1,23	2,03	3,05
18	1,25	2,06	3,08
20	1,26	2,09	3,10

**Tabelle 2: I/U-Messwerte**

**Auswertung:**

Man erstellt aus den Messwerten mit Excel eine Graphik und extrapoliert die Kennlinien auf die U-Achse. Man erhält das Diagramm in Abb. 1. Aus dem I-Achsenabschnitt und der Steigung der Kurve errechnet man die Spannung  $U_0$ , bei der der Strom  $I = 0$  ist. Es ergeben sich für die einzelnen Wellenlängen folgende Werte:

**940nm:**

$$U_0 = \frac{118,85 \text{ mA}}{109,03 \text{ mA/V}} = 1,09 \text{ V}$$

**625nm:**

$$U_0 = \frac{106,55 \text{ mA}}{60,373 \text{ mA/V}} = 1,76 \text{ V}$$

470nm:

$$U_0 = \frac{129,52 \text{ mA}}{47,714 \text{ mA/V}} = 2,71 \text{ V.}$$

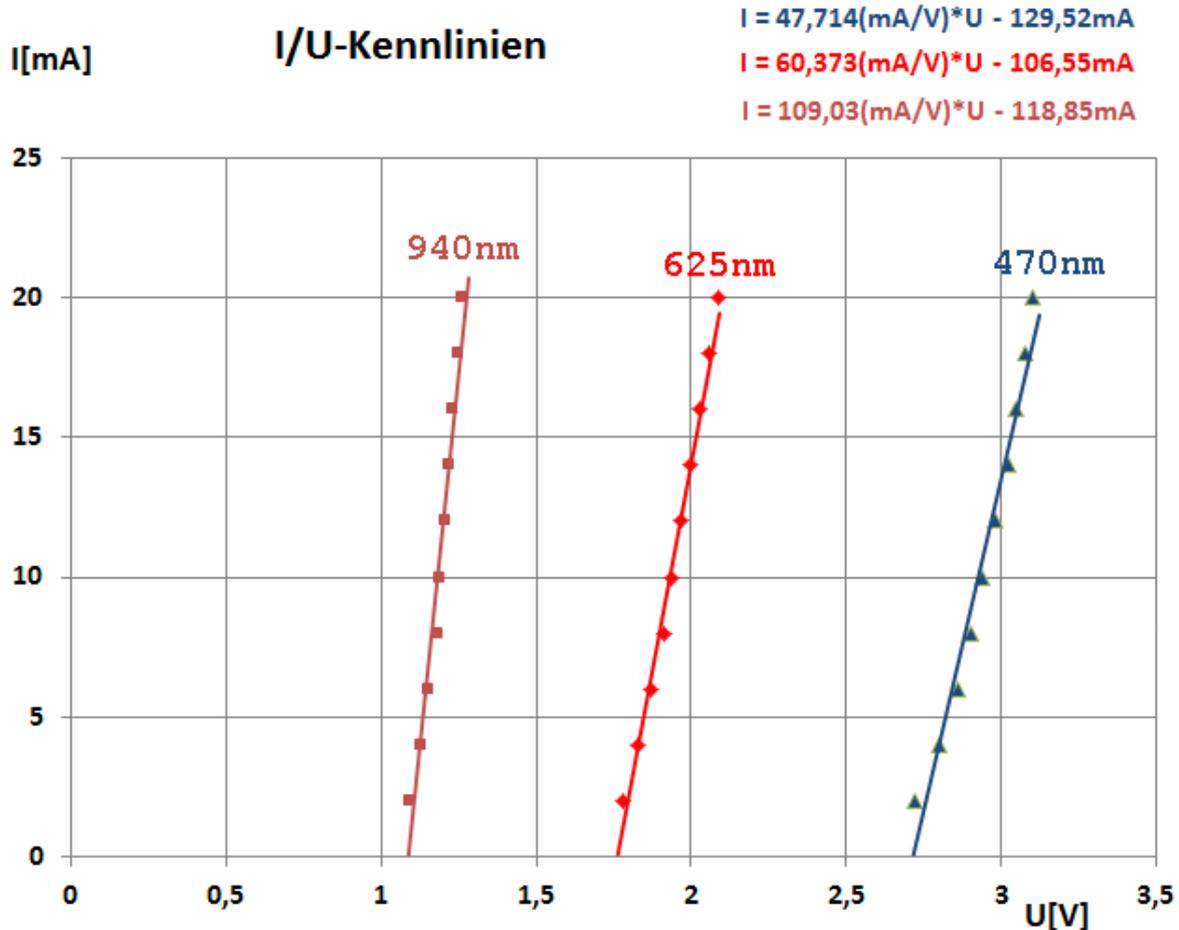


Abb.1: U/I-Kennlinien

Die erhaltenen Werte stimmen fast genau mit den Werten in Tabelle 1 überein. Für die anderen LEDs ergeben sich ebenfalls fast die gleichen Werte wie in Tabelle 1.

### Versuch 3c:

#### Durchführung:

Elegant und wesentlich schneller kann man die LED-Kennlinien mit Hilfe der Schaltung in Abb.2 und einem Messwerterfassungssystem wie etwa Cassy der Firma Leybold aufnehmen. Als Messzeit wählt man eine Periode der Wechselspannung  $t = 0,02 \text{ s}$  und als Messintervall  $\Delta t = 100\mu\text{s}$ .

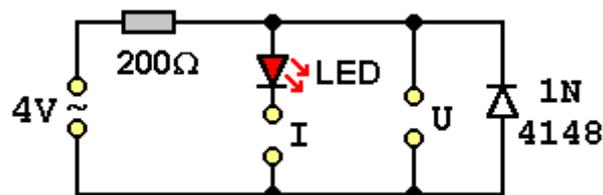


Abb.2: Versuchsaufbau

**Beobachtung:**

Man erhält die Kurven in Abb.3.

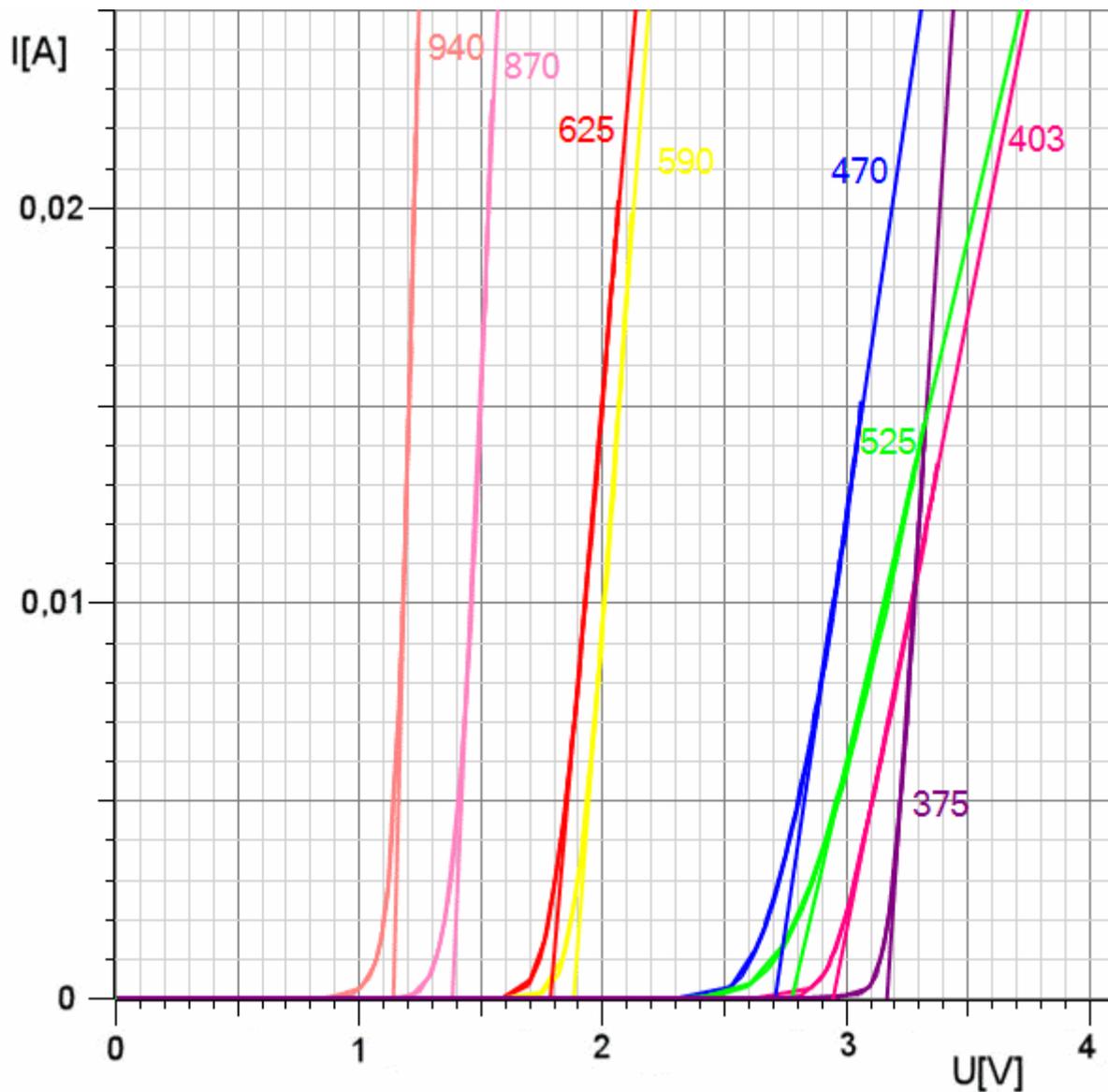


Abb.3: I/U-Kennlinien

**Auswertung:**

Man legt durch die ansteigende Flanke der Kennlinien jeweils eine Ausgleichsgerade und liest die Spannung am Schnittpunkt der Geraden mit der U-Achse ab. Man erhält so bis auf minimale Abweichungen die gleichen Spannungen wie in Tabelle 1. Wertet man die Messwerte in Tabelle 1 mit Excel graphisch aus, so ergibt sich die Kurve in Abb.4. Die Spannung  $U_0$  ist näherungsweise proportional zur Frequenz  $f$  des abgestrahlten Lichtes. Die geringe Abweichung von der Proportionalität ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die LEDs nur näherungsweise monochromatisches Licht aussenden. Die Steigung der Geraden  $m$  beträgt

$$m = 4,201 \cdot 10^{-15} \text{ Vs.}$$

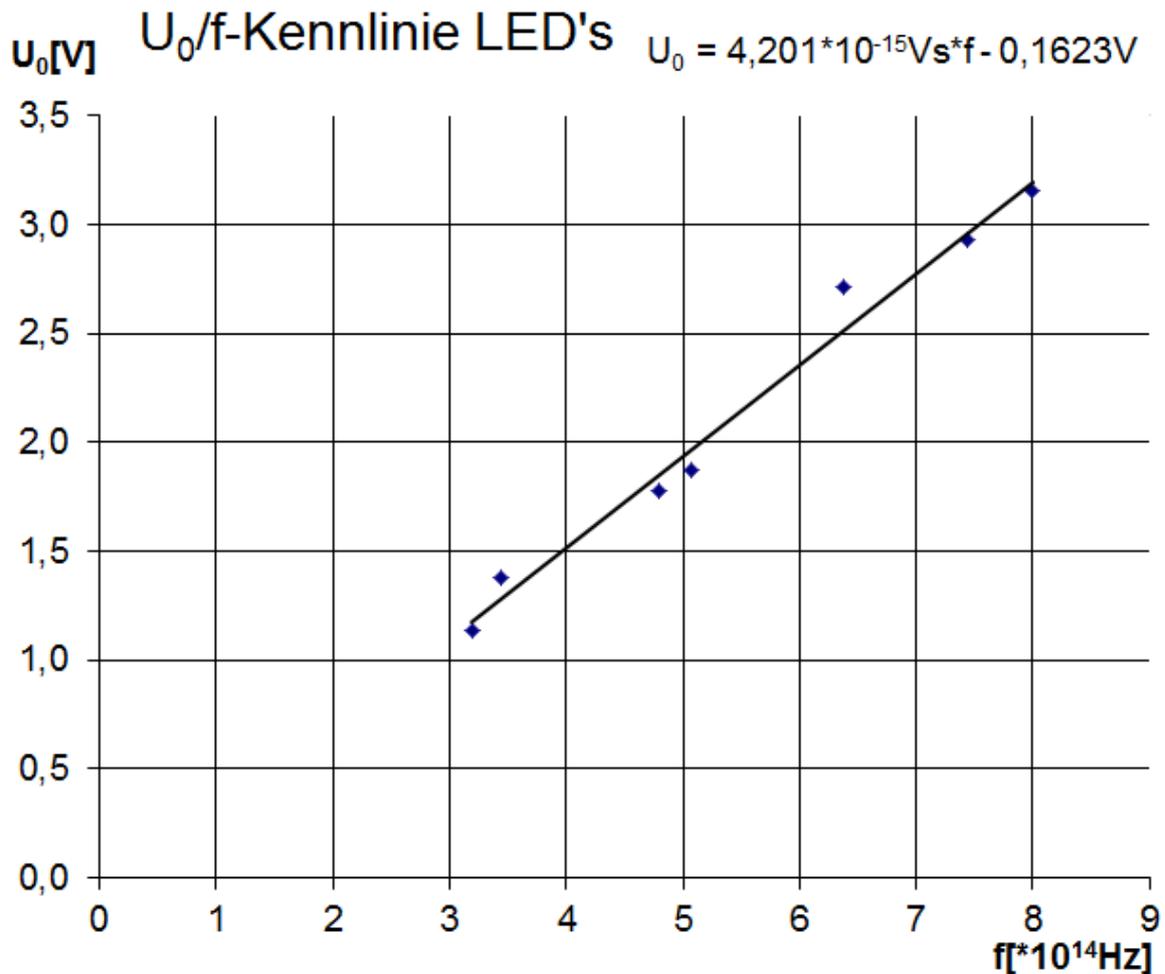


Abb.4: Abhängigkeit der Spannung  $U_0$  von der Frequenz  $f$

Für die Steigung  $m$  der Geraden gilt nach den theoretischen Überlegungen in Kapitel 2:

$$m = \frac{h}{e}$$

und damit

$$\begin{aligned} h &= m \cdot e \\ &= 4,201 \cdot 10^{-15} \text{ V}_s \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ &= 6,72 \cdot 10^{-34} \text{ Js.} \end{aligned}$$

Der Literaturwert beträgt:

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

Die Spannung für die grüne LED weicht stark von den anderen Werten ab. Sie besitzt, wie man mit einem optischen Gitter zeigen kann, einen hohen Gelb- und Blauanteil. Die grüne Farbe der LED ist keine reine Farbe, sondern eine Mischfarbe aus gelb und blau. Der angege-

bene Wert für die Wellenlänge ist ein Mittelwert. Die benötigte Mindestspannung entspricht bei ihr daher in etwa dem Wert der blauen LED. Sie wurde aus diesem Grund bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

#### **Versuch 4:**

##### **Durchführung:**

Man hält in das Licht der UV-LED

- 1) einen Geldschein,
- 2) ein halb mit Wasser gefülltes Schnapsprobiergläschen, in das man
  - a) ein Stück Roskastanienrinde,
  - b) ein Stück Eschenrinde,
  - c) ein paar Tropfen Weichspüler,
  - d) ein paar Tropfen Eosin gibt, bzw.
  - e) einen Textmarker verschiedener Farben kurz eintaucht.

##### **Beobachtung:**

Beim Geldschein erschienen einzelne leuchtende Striche im Papier, die Textmarker strahlen wesentlich heller in ihrer Farbe als ohne UV-Licht. Der Saft aus der Kastanienrinde leuchtet intensiv hellblau, der Saft aus der Eschenrinde grünblau, die Lösung mit dem Weichspüler hellblau und die Eosinlösung grün, obwohl sie im normalen Licht rot erscheint.

##### **Erklärung:**

Die Materialien enthalten fluoreszierende Substanzen, die das eingestrahlte UV-Licht in sichtbares Licht umwandeln. In der Rinde der Roskastanie und der Gewöhnlichen Esche findet man die beiden Cumarinverbindungen Aesculin und Fraxin, in der Roskastanie vor allem das mit blauer Farbe fluoreszierende Aesculin und in der Esche überwiegend das blaugrün fluoreszierende Fraxin. Sie besitzen wie die übrigen fluoreszierenden Substanzen in ihrem chemischen Aufbau ein ausgeprägtes aromatisches System, dessen Elektronen durch UV-Licht in ein höheres Energieniveau gehoben werden können. Sie kehren über mehrere Energiestufen in ihren Grundzustand zurück. Die dabei ausgesendeten Energiequanten sind energieärmer als die eingestrahlten UV-Photonen. Sie liegen im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums. Da Aesculin und Fraxin energiereiches UV-Licht in energieärmeres sichtbares Licht umwandeln können, werden Pflanzenextrakte aus der Rinde der Roskastanie und der Esche in Bio-Lichtschutzsalben und Bio-Sonnenschutz-cremes verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2).

#### **Versuch 5:**

##### **Durchführung:**

Man verbindet eine bzw. beide 1W-LEDs in Reihe mit dem LED-Treiber. Dann verdunkelt man den Raum.

##### **Beobachtung:**

Die LEDs leuchten erstaunlich hell auf. Sie sind in der Lage, einen kleinen Raum von 10 m<sup>2</sup> so hell auszuleuchten, dass man sich gefahrlos im ganzen Raum bewegen kann.

##### **Erklärung:**

Die Lichtausbeute moderner Hochleistungs-LEDs beläuft sich inzwischen auf 50-60%. Weitere Informationen dazu finden Sie in Kapitel 3.1.4.

### 3.1.3 Leuchtmobile

Eine für Schülerinnen und Schüler besonders interessante Anwendung der LEDs ist ein Mobile, das in allen Farben blinkt. Abb. 1 zeigt den Schaltplan des Leuchtmobiles. Benötigt werden folgende Bauteile:

#### **Kondensatoren:**

2x1000 $\mu$ F/35V

1x100 $\mu$ F/35V

#### **Widerstände:**

6x180 $\Omega$ ; 0,1W

8x100 $\Omega$ ; 0,1W

2x150 $\Omega$ ; 0,1W

1xPoti 5k $\Omega$  linear

#### **Leuchtdioden:**

2xLED rot 5mm

2xLED orange 5mm

2xLED gelb 5mm

2xLED grün 5mm

2xLED blau 5 mm

2xLED pink 5mm

2xLED weiß 5mm

#### **ICs:**

1x74LS13

2x74LS47

1x74LS390

1x7805

#### **sonstiges Zubehör:**

4 IC Fassungen 16polig

15 verchromte LED-Fassungen für 5mm LEDs

1 IC-Platine mit 6 Steckplätzen für 16polige IC's

1 Gehäuse, z.B. Mon-Cherie-Dose

1 Telefonbuchse rot für 4mm Stecker

1 Telefonbuchse blau für 4mm Stecker

1 Bananenstecker rot

1 Bananenstecker blau

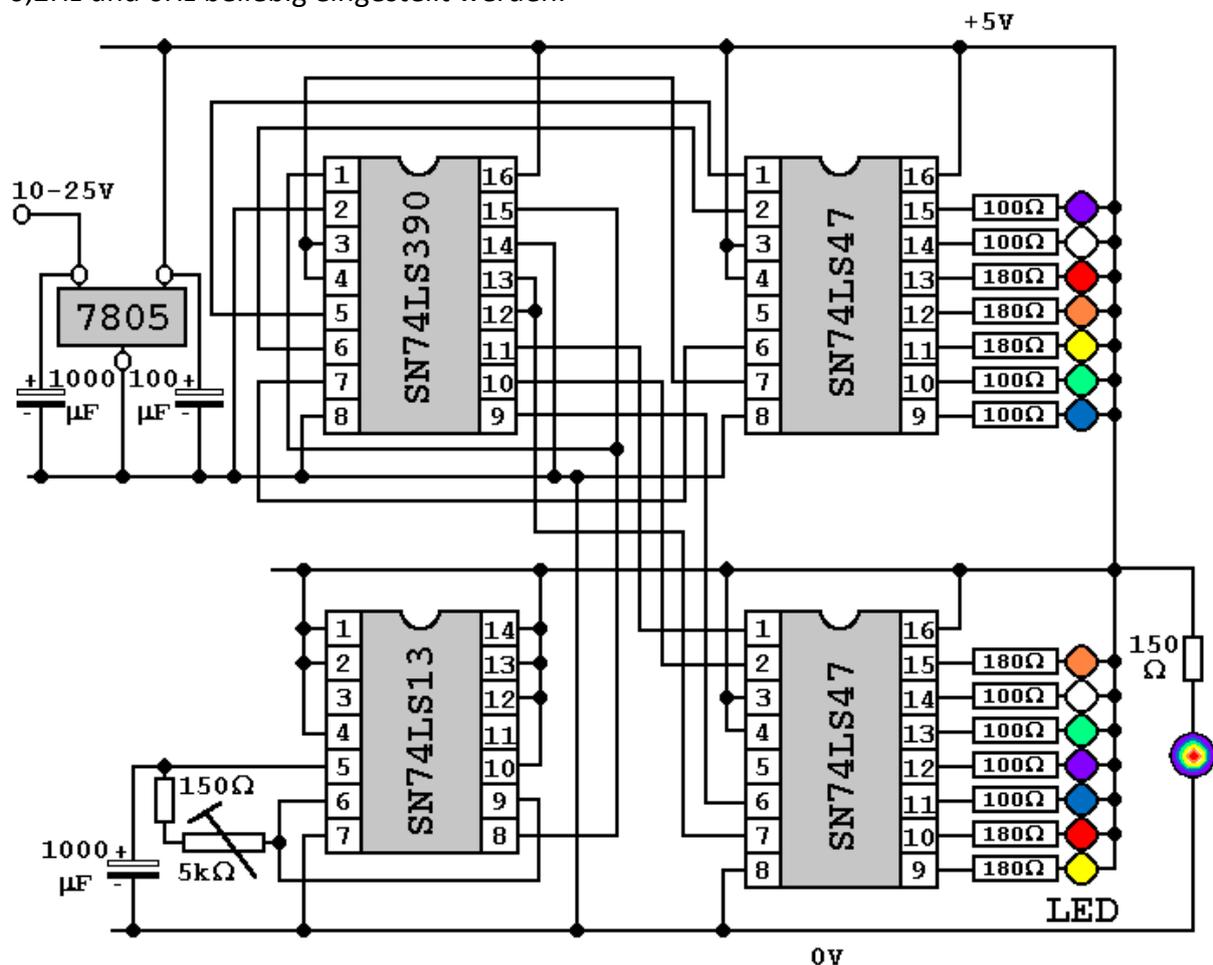
1 Steckernetzteil 12V, 0,5A

Lötmaterial.

Man verlötet die Schaltung am einfachsten auf einer Platine, auf der die Anschlüsse für die benötigten vier ICs vorgegeben sind. Es können darauf noch zusätzliche Bauteile untergebracht werden. Die einzelnen Anschlüsse der ICs verbindet man über Schallitzen miteinander.

Da TTL-LS-Bausteine eingesetzt werden, benötigt man als Betriebsspannung  $U = 5V$ . Sie wird durch den Festspannungsregler 7805 erzeugt. Schaut man auf die schwarze Seite des Reglers, wobei die Pins nach unten zeigen, so ist der linke Anschluss der Eingang, der mittlere die Masse und der rechte der 5V-Ausgang. Damit der Baustein unabhängig von der Güte der Eingangsspannung optimal arbeitet, kann man zwischen Eingang und Masse noch einen Kondensator von  $1000\mu F$  parallel legen mit dem +Pol am Eingang und zwischen Ausgang und Masse einen Kondensator von  $100\mu F$  mit dem +Pol am Ausgang. Die Eingangsspannung kann zwischen 8V und 25V betragen. Sie kann einem Steckernetzteil mit 12V-Ausgang entnommen werden, das man über die beiden Bananenstecker mit den Telefonbuchsen auf dem Gehäusedeckel verbindet.

Das IC 74LS13 ist als Taktgenerator geschaltet. Es enthält zwei NAND-Schmitt-Trigger mit je vier Eingängen. Die Taktfrequenz wird durch den Kondensator und die Reihenschaltung aus dem Widerstand  $150\Omega$  und dem Trimpoti von  $5k\Omega$  bestimmt. Sie kann etwa zwischen  $0,2Hz$  und  $6Hz$  beliebig eingestellt werden.

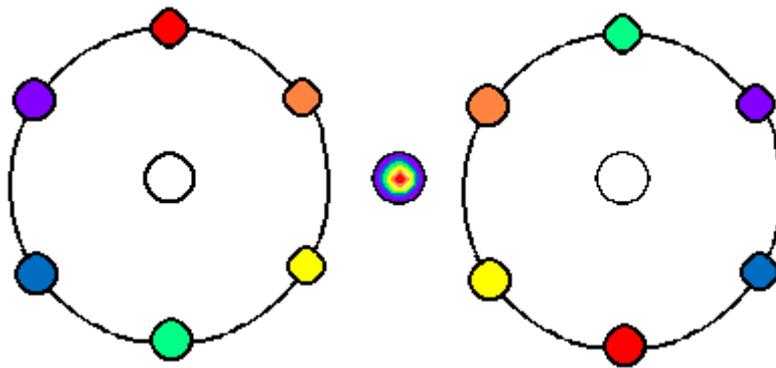


**Abb.1: Schaltplan des Leuchtmobile**

Ist das Poti ganz aufgedreht, so schwingt der Taktgenerator nicht mehr. Die Schaltung zeigt dann das letzte Leuchtbild der Leuchtdioden permanent an. Der Baustein 74LS390 enthält zwei unabhängige Dezimalzähler, die die beiden BCD-zu-7-Segmentdecoder 74LS47 ansteuern. Im Takte des Taktgebers zählen sie von 0 – 9 und beginnen dann von vorn. Die Leuchtdioden in den 6 Regenbogenfarben und weiß sind kreisförmig in Form zweier 7-Segmentanzeigen angeordnet (s. Abb.2).

Sie zeigen die jeweilige Dezimalzahl der beiden Zähler an, wobei die Farben für die einzelnen Balken der 7-Segmentanzeige bei beiden Kreisen vertauscht sind. Die mittlere LED zwischen den beiden 7-Segmentanzeigen ist eine spezielle Effekt-RGB-LED, die eine eigene Steuer-elektronik enthält und in einem bestimmten Zyklus alle Regenbogenfarben durchläuft. Sie wird über einen Widerstand von  $150\Omega$  direkt an die Ausgangsspannung des Spannungsreglers angeschlossen. Abbildung 3 zeigt die komplett verdrahtete Schaltung.

Das Trimpoti wurde neben den beiden Telefonbuchsen für die Stromversorgung am Ge-häusedeckel verschraubt, um die Taktfrequenz von außen variieren zu können. Als Gehäuse habe ich eine leere Mon-Cherie-Dose verwendet. Die Leuchtdioden wurden mit verchromten LED-Fassungen am Deckel verschraubt und über Schaltlitzen einerseits mit der Betriebs-spannung und andererseits mit den Ausgängen der 7-Segment-Decoder verbunden.



**Abb.2: Anordnung der LEDs**



**Abb.3: komplette Schaltung**

Die Schaltung bietet zahlreiche Variationsmöglichkeiten. Zum einen lässt sie sich beliebig um zusätzliche Leuchtdioden erweitern, wobei für jeweils sieben weitere LEDs ein neuer 7-Segment-Decoder benötigt wird. Die LS-Bausteine der 74er Reihe dürfen an ihren offenen Kollektorausgängen nur mit jeweils  $20\text{mA}$  belastet werden, können also jeweils nur eine LED betreiben. Bei der Standardreihe können jeweils zwei LEDs gleichzeitig angeschlossen werden, allerdings sind die Bausteine dann erheblich teurer. Beachten muss man ferner, dass die rote, die orangefarbene und die gelbe LED über einen Vorwiderstand von  $180\Omega$ , die restlichen über einen Vorwiderstand von  $100\Omega$  mit den offenen Kollektorausgängen verbunden

werden müssen. Dabei kann man den Widerstand von  $180\Omega$  notfalls aus einer Parallelschaltung der gängigeren Widerstände  $220\Omega$  und  $1k\Omega$  erzeugen. Die weiteren 7-Segment-Decoder können über die schon vorhandenen Dezimalzähler mit angesteuert werden oder durch eigene Dezimalzähler unabhängig von den beiden anderen betrieben werden. Zum zweiten sind bei der Anordnung der LEDs am Gehäuse der Fantasie keine Grenzen gesetzt. Man kann sie sogar in kleinen skizzenhaften Bildern anordnen. Zum dritten kann man den zweiten und alle weiteren Dezimalzähler nicht nur mit dem Taktgenerator takten, sondern auch über einen Ausgang des ersten oder eines anderen Dezimalzählers. So könnte man erreichen, dass die LED-Gruppen nicht im gleichen Takt blinken, sondern im Taktverhältnis 1:2, 1:5 oder 1:10. Als viertes könnte man die Dezimalzähler nicht bis 10, sondern nur bis 2 oder 5 zählen lassen. Dann würde sich das Leuchtbild der LED-Gruppen jeden 2., jeden 5. und nicht erst jeden 10. Takt wiederholen. Über Wahlschalter wäre es sogar möglich, diese Wahlmöglichkeiten von Anfang an in die Schaltung zu integrieren, wobei sich immer neue Farbmuster ergeben würden.

### 3.1.4 Leuchtmittel

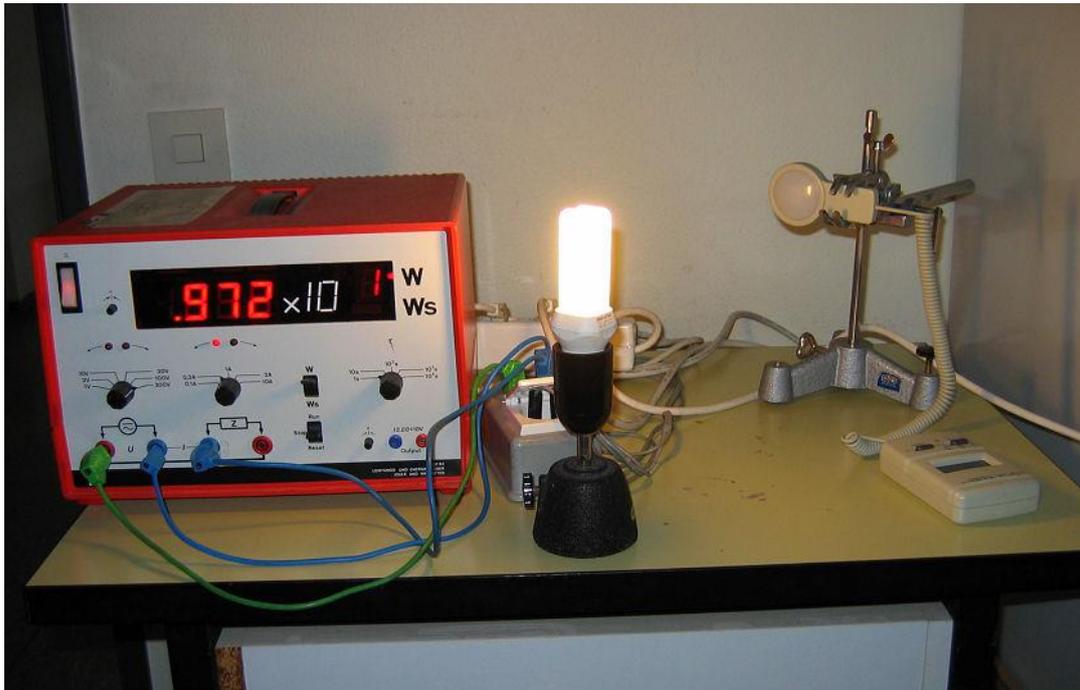
Leuchtdioden werden längst nicht mehr nur als Signalleuchten in elektrischen Geräten verwendet. Sie finden zunehmend Verwendung als Leuchtmittel im Haushalt (s. Abb.1), z.B. in kleinen und großen Taschenlampen, in Lichterketten als einzelne Stränge oder als Netze, als Scheinwerferersatz in Form von LED-Clustern mit 38 LEDs oder als Lampenersatz in Form von LED-Power Tropfenlampen in handelsüblichen Lampenfassungen.



**Abb.1: LED-Cluster, LED-Tropfenlampe, LED-Minitaschenlampe, LED-Notleuchte**

In Kombination mit Infrarotbewegungsmeldern werden sie in Notleuchten eingesetzt und helfen so, Energie zu sparen z.B. in Durchgangsräumen. Sie werden entweder über herkömmliche Trafos oder spezielle LED-Konverter am Stromnetz mit 230 V betrieben. Leuchtdioden verbrauchen meist etwa genau so viel Energie wie Energiesparlampen und damit nur rund ein Fünftel der Energie einer normalen Glühlampe. Außerdem haben sie eine Lebensdauer von bis zu 50000 Stunden und halten damit 50 mal länger als normale Glühlampen und 3-4 mal länger als Energiesparlampen. Allerdings schwanken die Angaben der Hersteller sehr. High-Power-LEDs sind teilweise bereits nach 5000 Stunden unbrauchbar, da sie dann

einen Großteil ihrer Leuchtkraft verloren haben, normale LEDs können dagegen nach Herstellerangaben bis zu 100000 Stunden Licht spenden.



**Abb.2: Bestimmung der Lichtausbeute verschiedener Lampen**

Die Lichtausbeute einer Lampe wird in lm/W oder in % angegeben. Um sie zu bestimmen, benutzt man den Versuchsaufbau nach Abb. 2.

**Versuch:**

**Aufbau:**

Zunächst baut man den Versuch nach Abb.2 auf. Benötigt werden ein Wattmeter, ein Luxmeter, eine Sicherheitssteckdose und eine Lampenfassung. Man verdunkelt den Raum und schaltet alle anderen Lichtquellen ab.

**Durchführung:**

Der Abstand zwischen dem Messfühler des Luxmeters und der Lampe wird auf  $r = 0,3 \text{ m}$  eingestellt. Dann dreht man die Lampe, bis das Luxmeter das Maximum bzw. das Minimum der Beleuchtungsstärke anzeigt. Anschließend stellt man den Messfühler oberhalb der Lampe im gleichen Abstand auf. Man erhält drei Messpunkte  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  für die Beleuchtungsstärke, zwei in horizontaler und einen in vertikaler Richtung.

**Ergebnisse:**

In Tabelle 1 findet man in den Spalten 2 – 5 die Messergebnisse für verschiedene Lampen.

**Auswertung:**

Auffallend ist zunächst die sehr unterschiedliche räumliche Abstrahlcharakteristik der einzelnen Lampen. Aus den drei Werten der Beleuchtungsstärken  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  berechnet man den Mittelwert  $E_m$ . Würde die Lampe rundum strahlen, so würde sie eine Fläche  $A$  ausleuchten, für die gilt:

$$A = 4\pi r^2 = 4 * 3,14 * (0,3 \text{ m})^2 = 1,13 \text{ m}^2.$$

Lampe	E <sub>1</sub> [lx]	E <sub>2</sub> [lx]	E <sub>3</sub> [lx]	P[W]	Φ <sub>m</sub> [lm]	Φ <sub>m</sub> /P[lm/W]
Glühlampe	340	460	650	39,2	483	12,3
Energiesparlampe	440	610	290	9,7	447	46,1
Energiesparlampe	760	1050	370	13,8	727	53,4
LED-Tropfenlampe	110	120	270	3,7	167	45

**Tabelle 1: gemessene Lichtausbeuten in lm/W**

Davon muss man die Fläche abziehen, die die Fassung der Lampe abdeckt. Man kommt so näherungsweise auf eine beleuchtete Fläche

$$A' \approx 1 \text{ m}^2.$$

Damit ergibt sich für den Lichtstrom Φ<sub>m</sub> der Lampe in Lumen lm

$$\Phi_m = E_m * A' = E_m * 1 \text{ m}^2.$$

Die Zahlenwerte für die mittlere Bestrahlungsstärke in lx und den Lichtstrom in lm stimmen somit überein. Die mittleren Lichtströme der einzelnen Lampen finden Sie in Spalte 6 der Tabelle 1.

Lampe	Lichtausbeute in lm/W
Glühlampen	5 – 15
Halogenlampen	10 – 20
Energiesparlampen/ Leuchtstoffröhren	45 – 75
LED-Lampen (je nach Farbe)	5 – 100
Natriumdampfampe	150 - 200

**Tabelle 2: Literaturangaben für die Lichtausbeute verschiedener Lampen**

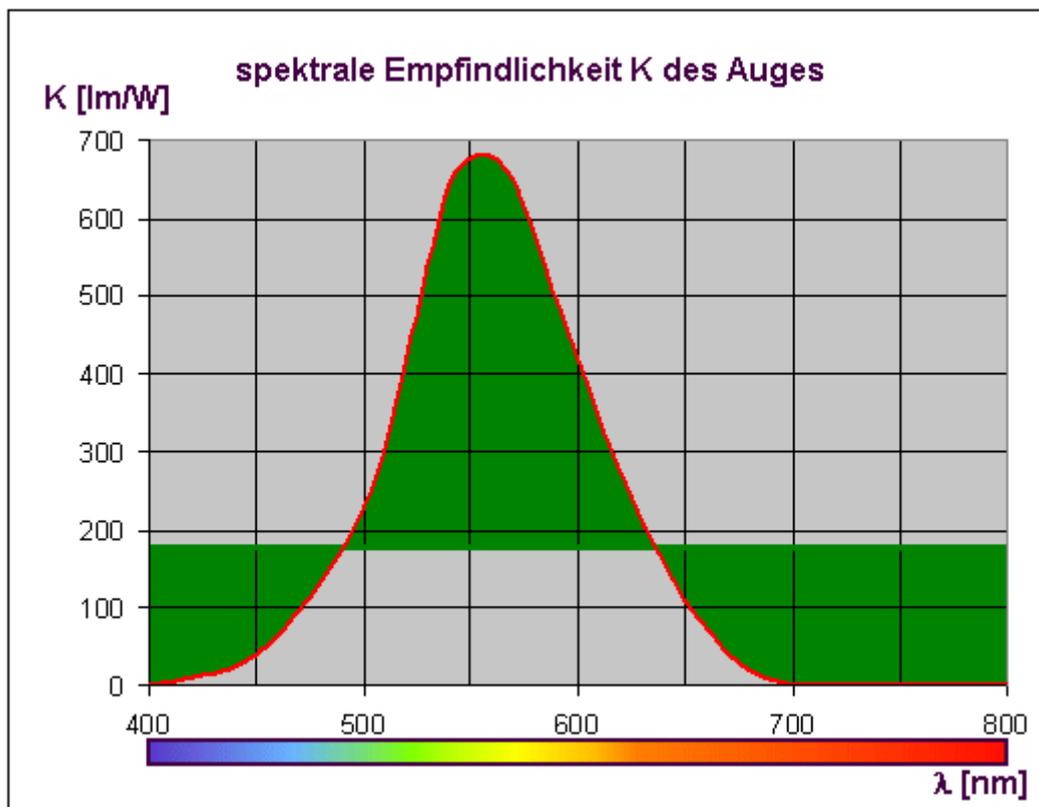
In der Literatur wird der Lichtstrom auf 1 Watt zugeführter elektrischer Leistung bezogen. Die im Versuch ermittelten Werte enthält Spalte 7 der Tabelle 1. Wertet man die Angaben in verschiedenen Literaturquellen<sup>3),4),5),6)</sup> aus, so ergibt sich Tabelle 2. Die Messwerte in Tabelle 1 liegen sehr gut innerhalb der in der Literatur angegebenen Intervalle. Die hohe Lichtausbeute der Natriumdampfampe erklärt sich damit, dass das menschliche Auge im sichtbaren Spektralbereich von 400 – 800 nm eine Empfindlichkeit aufweist, die stark von der Wellenlänge abhängt (s. Abb.3, rote Linie). Am Tage ist das Auge bei einer Wellenlänge von 555 nm besonders lichtempfindlich, in der Nacht bei 500 nm. Für diese Wellenlängen erzeugt eine Lichtquelle mit einer Strahlungsleistung von 1 W einen Lichtstrom von 683 lm. Natrium sendet Licht der Wellenlänge 589 nm aus. Aus der Kurve liest man für diese Wellenlänge eine Empfindlichkeit des Auges von 500 lm/W ab. Damit hat die Lampe eine mittlere prozentuale Lichtausbeute P von

$$P = \frac{175 \text{ lm/W}}{500 \text{ lm/W}} * 100\% = 35 \%$$

Eine grüne LED mit einer Wellenlänge von 527 nm und einer Lichtausbeute von 89 lm/W, für die das Auge ähnlich empfindlich ist, bringt es dagegen nur auf

$$P = \frac{86 \text{ lm/W}}{500 \text{ lm/W}} * 100\% = 17,2 \%$$

Experten erwarten jedoch in naher Zukunft eine weitere Steigerung der Lichtausbeute der LEDs. Das größte Problem dabei ist, dass sich das Halbleitermaterial aufgrund seines Ohmschen Widerstandes erwärmt. Bei einer Dauertemperatur über 100°C wird es schnell unbrauchbar. Die Lebensdauer sinkt drastisch. Bei Temperaturen über 125°C wird die LED sogar zerstört. Daher muss man für eine ausreichende Kühlung sorgen.



**Abb.3: spektrale Empfindlichkeit des Auges in lm/W**

Will man die prozentuale Lichtausbeute einer weißen Lampe errechnen, so muss man zwei Punkte beachten. Zum einen ist weiß nicht gleich weiß. Betrachtet man z.B. das Licht einer Glühlampe mit einem Spektroskop, so stellt man fest, dass sie das ganze sichtbare Spektrum aussendet mit einer besonders hohen Intensität im roten Bereich. Bei einer weißen LED ist vor allem der violette Bereich besonders intensiv ausgeprägt. Dafür fehlt der Blauanteil fast vollständig. Und das weiße Licht einer Energiesparlampe zeichnet sich durch ein Linienspektrum mit einzelnen Linien im ganzen Spektralbereich von rot bis violett aus. Da das Auge aber im violetten und roten Bereich ähnlich empfindlich ist (s. Abb.3), fallen die Unterschiede zwischen einer LED-Lampe und einer Glühlampe kaum ins Gewicht.

Und das Licht der Leuchtstoffröhren ist bereits auf die Kurve in Abb.3 abgestimmt. Zum zweiten benötigt man als Bezugspunkt eine mittlere Empfindlichkeit des menschlichen Auges im gesamten Spektralbereich. Die grüne Linie in Abb.3 entspricht näherungsweise dem

gesuchten Mittelwert. Er beträgt 180 lm/W. Die grüne Fläche oberhalb der Linie ist nahezu identisch mit der grünen Fläche unterhalb der Mittelwertlinie. Mit diesem Wert kann man für die Lampen in Tabelle die prozentuale Lichtausbeute P berechnen. Für die Glühlampe erhält man:

$$P = \frac{12,3 \text{ lm/W}}{180 \text{ lm/W}} * 100\% = 6,8 \%$$

Die Werte für die anderen Lampen entnehmen Sie der Spalte 2 in Tabelle 3. In Spalte drei sind die Angaben in der Literatur<sup>3),4),5),6)</sup> aufgeführt. Beide stimmen sehr gut überein.

Lampe	Lichtausbeute in % (gemessen)	Lichtausbeute in % (Literatur)
Glühlampen	6,4	3 – 7
Halogenlampen	-	5- 10
Energiesparlampen/ Leuchtstoffröhren	25,6 - 29,7	25 - 40
LED-Lampen (weiß)	25	20 – 55,6
Natriumdampfampe	-	30 - 40

**Tabelle 3: Lichtausbeute verschiedener Leuchtmittel**

LED-Lampen sind meiner Meinung nach die wahren Leuchtmittel der Zukunft, da sie wegen der ungefährlichen Betriebsspannung und der verschiedenen Farben sehr vielseitig eingesetzt werden können und die Energiesparlampen in der Lichtausbeute bereits überholt haben. Die neueste Generation weißer Hochleistungs-LEDs bringt es auf 100 lm/W und damit auf 55,6% Lichtausbeute. Außerdem sind die Energiesparlampen wegen ihres geringen Gehaltes an Quecksilber, Antimon, Blei und Strontium alles andere als umweltfreundlich und müssen sogar als Sondermüll entsorgt werden. Da die LEDs sehr klein sind und mit Spannungen von ein paar Volt auskommen, eignen sie sich hervorragend als Dekobeleuchtung, z.B. für die heimische Weihnachtsgrippe.

Sogar Fliesenfugen lassen sich mit ihnen inzwischen zum Leuchten bringen, oder das Wasser aus dem Duschkopf erstrahlt in allen Farben. In ihn sind 12 verschieden farbige LEDs integriert, die über eine kleine Wasserturbine mit Strom versorgt werden (s. Abb.4). Erhältlich ist dieses kleine Wunderwerk der Technik unter [www.wissenschaft-shop.de](http://www.wissenschaft-shop.de).



**Abb.4: Lichtspiele im Bad mit LEDs**

Mit dem elektronischen Trafo in Abb.5 kann man eine einzelne

LED mit  $I = 20\text{mA}$  z.B. als Signalleuchte direkt an  $U = 230\text{V}$  Wechselspannung betreiben. Berücksichtigt man den Aufbau des Gleichrichters DB105, so erhält man das Ersatzschaltbild nach Abb.6. Dabei wurde der Widerstand  $R_3 = 200\text{k}\Omega$  außer Acht gelassen, da er für die folgenden Berechnungen nicht von Bedeutung ist. Er sorgt dafür, dass sich der Kondensator nach Ziehen des Netzsteckers rasch entlädt, damit an den beiden Stiften des Steckers keine lebensgefährliche Spannung anliegt. Er stört durch seinen hohen Wert den Betrieb des Trafos ansonsten nicht. Der rote Strompfad gilt für die eine, der grüne für die andere Halbwelle der Wechselspannung. Es liegt jeweils eine Reihenschaltung aus dem Widerstand  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ , dem Kondensator  $C = 0,22\mu\text{F}$ , dem Widerstand  $R_2 = 100\Omega$ , der Leuchtdiode und zwei Dioden vor.

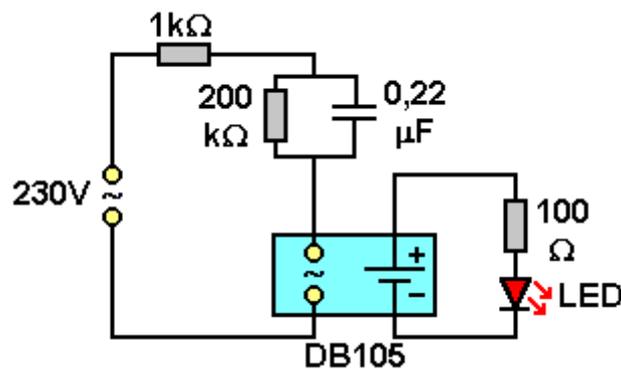


Abb.5: elektronischer Trafo für LEDs

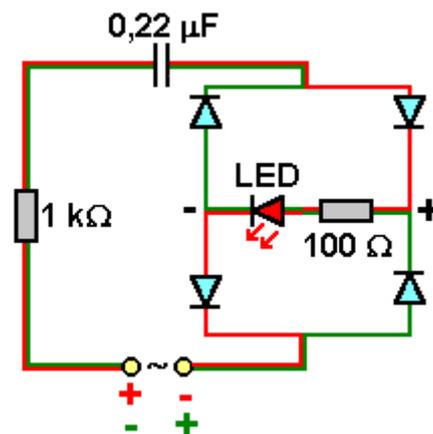


Abb.6: Ersatzschaltbild

Nach den Gesetzen im Wechselstromkreis gilt für die Impedanz  $Z$  daher

$$Z = \sqrt{R^2 + R_C^2}.$$

Darin ist  $R$  der gesamte Ohmsche Widerstand und  $R_C$  der kapazitative Widerstand des Kondensators. Mit

$$R_C = \frac{1}{2\pi * 50 \text{ Hz} * 0,22 * 10^{-6} \text{ F}} = 14476 \Omega$$

und

$$R = 1000 \Omega + 100 \Omega + 100 \Omega = 1200 \Omega$$

ergibt sich:

$$Z = 14526 \Omega,$$

wobei der Widerstand der LED mit  $100\Omega$  angenommen wurde, da LEDs etwa folgende Betriebswerte haben:

$$U_{LED} = 2 \text{ V}$$

$$I_{LED} = 20 \text{ mA}.$$

Außerdem wurden die Durchlasswiderstände der Dioden vernachlässigt. Mit der Netzspannung

$$U_{eff} = 230 \text{ V}$$

erhält man für die effektive Stromstärke  $I_{eff}$

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{Z} = \frac{230 \text{ V}}{14526 \Omega} = 15,8 \text{ mA}$$

und für die Scheitelstromstärke  $I_0$

$$I_0 = I_{eff} * \sqrt{2} = 22,3 \text{ mA}.$$

Die LED wird optimal mit Strom versorgt. Für die Spannungen an den einzelnen Bauteilen errechnen sich folgende Effektivwerte:

$$U_{eff}(C) = 14476 \Omega * 0,0158 \text{ A} = 229 \text{ V}$$

$$U_{eff}(R_1) = 1000 \Omega * 0,0158 \text{ A} = 15,8 \text{ V}$$

$$U_{eff}(R_2) = 100 \Omega * 0,0158 \text{ A} = 1,58 \text{ V}$$

$$U_{eff}(LED) = 100 \Omega * 0,0158 \text{ A} = 1,58 \text{ V}.$$

Dabei sind die ersten beiden Spannungen Wechselfspannungen, die zwei letzten pulsierende Gleichspannungen. An der Leuchtdiode liegt eine Spitzenspannung  $U_0$  an, für die gilt:

$$U_0 = 1,58V * \sqrt{2} = 2,23 V.$$

Sie wird auch optimal mit Spannung versorgt. Berücksichtigt man die Durchlassspannung der beiden Dioden mit etwa 0,7 V, so müssen an der Wechselstromseite des Gleichrichters

$$U_{\sim} = 2 * (1,58 V + 0,7 V) = 4,56 V.$$

anliegen. Die Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen U und I errechnet sich zu

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-R_C}{R}\right) = -85,26^\circ$$

und die aufgenommene Wirkleistung  $P_{\text{eff}}$  zu

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} * I_{\text{eff}} * \cos\varphi = 0,3 W.$$

An der LED wird eine Wirkleistung  $P_{\text{LED}}$

$$P_{\text{LED}} = 1,58 V * 0,0158 A = 0,025 W$$

umgesetzt. Die Schaltung hat einen Wirkungsgrad  $\eta_1$  von

$$\eta_1 = \frac{0,025 W}{0,3 W} * 100 \% = 8,3 \%$$

Berücksichtigt man noch, dass eine LED eine Lichtausbeute von ca. 25% hat, so erhält man letztendlich einen Wirkungsgrad  $\eta_2$

$$\eta_2 = 8,3 \% * 0,25 = 2,1 \%$$

Würde man die LED durch ein kleines etwa gleichhelles Glühlämpchen z.B. mit den Kenndaten 4V/0,1A ersetzen, so wäre der Wirkungsgrad noch sehr viel geringer, weil der benötigte Strom in etwa auf den sechsfachen Wert steigt und die Verlustleistung am Ohmschen Widerstand  $1k\Omega$  quadratisch mit der Stromstärke zunimmt. Außerdem ist ihre Lichtausbeute viel kleiner als die einer LED. Der Grund für den geringen Wirkungsgrad der Schaltung ist in der sehr ungünstigen Betriebsspannung von 230V zu sehen. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, müsste man als Vorwiderstand der LED einen rein kapazitiven Widerstand einsetzen, da an ihm nur eine Blindleistung auftritt. Der benötigte Kondensator müsste dazu eine Kapazität C von

$$C = 0,291 \mu F$$

haben. Der in der Schaltung eingesetzte Kondensator wäre also ausreichend. Aber bei rein kapazitivem Vorwiderstand könnten beim Einschalten je nach Phasenlage der Wechselspannung kurzzeitig hohe Stromspitzen auftreten, die die LED zerstören könnten, da der Ladestrom eines Kondensators am Anfang sehr hoch ist. Der Ohmsche Zusatzwiderstand ver-

hindert zwar diese Spitzen nicht ganz, reduziert sie aber auf ein ungefährliches Maß. Leider ist die Schaltung aus energetischer Sicht daher wenig effektiv. Ähnlich ungünstig sind auch die Bedingungen in den LED-Notleuchten, in denen 3 LEDs bei einer Leistungsaufnahme von 0,9 W betrieben werden. Trotzdem lohnt sich ihr Einsatz auf jeden Fall. Ansonsten müsste man die Räume mit einer 25W-Glühlampe oder einer 5W-Energiesparlampe beleuchten, ganz abgesehen davon, dass die Lebensdauer von Energiesparlampen drastisch sinkt, wenn sie ständig nur kurz ein- und ausgeschaltet werden. Zum Schluss sei noch erwähnt, dass  $R_1$  mindestens für eine Leistung

$$P = R * I_{eff}^2 = 1000 \Omega * (0,0158 A)^2 = 0,25 W,$$

der Kondensator C für eine Wechselspannung

$$U_0(C) = 2 * \sqrt{2} * U_{eff}(C) = 650 V$$

ausgelegt sein muss. Der Trafo ist als fertig verlöteter Baustein bei [Conrad-Electronic](#) erhältlich, muss allerdings vor dem Anschluss ans Stromnetz berührungssicher in ein Plastikgehäuse eingebaut werden. Misst man den Bausatz durch, so erhält man folgende Messwerte:

$$U_{eff}(C) = 230 V$$

$$U_{eff}(R_1) = 15,5 V$$

$$U_{eff}(R_2) = 1,6 V$$

$$U_{eff}(LED) = 1,6 V$$

$$I_{eff} = 0,016 A$$

$$P_{eff} = 0,3 W.$$

Die berechneten und gemessenen Werte stimmen sehr gut überein. Die Messung darf allerdings aus Sicherheitsgründen nur von einem Fachmann durchgeführt werden, wobei man eine spezielle Prüfsteckdose und besondere Prüfklemmen verwenden muss.

Wesentlich effizienter mit Wirkungsgraden zwischen 70% und 97% arbeiten so genannte LED-Konverter, wie sie vor allem für Hochleistungs-LEDs angeboten werden. In ihnen wird die Gleichspannung der Stromquelle durch einen Schaltregler mit einer hohen Frequenz zwischen 20kHz und 100kHz ständig ein- und ausgeschaltet, also zehackt. Während der Einschaltphasen wird Energie in kleinen Portionen von der Stromquelle zu einem Zwischenspeicher gepumpt. Er besteht aus einer Spule, die mit einer Diode und dem Verbraucher in Reihe geschaltet ist. Meist liegt parallel zum Verbraucher noch ein Kondensator, der den Strom glättet. Die Diode sorgt dafür, dass der Strom nur in eine Richtung fließen kann. Schließlich benötigt die LED Gleichstrom. Je nach Anordnung der Bauteile können Gleichspannungen hoch- bzw. runtergeregelt werden. Die grundsätzlichen Vorgänge machen die Schaltungen in Abb. 7 deutlich. Bei 7a) handelt es sich um einen Abwärtsregler, bei 7b) um einen Aufwärts-

regler, d.h. bei der Schaltung in Abb.7a ist die Ausgangsspannung  $U_a$  kleiner als die Eingangsspannung  $U_e$ , bei 7b ist es umgekehrt.

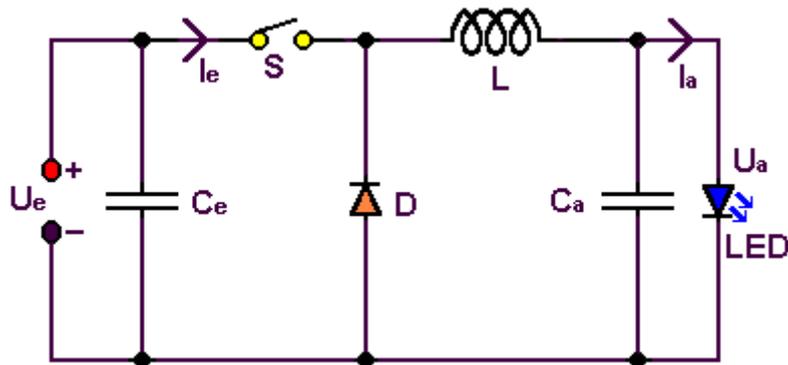


Abb.7a) Abwärtsregler

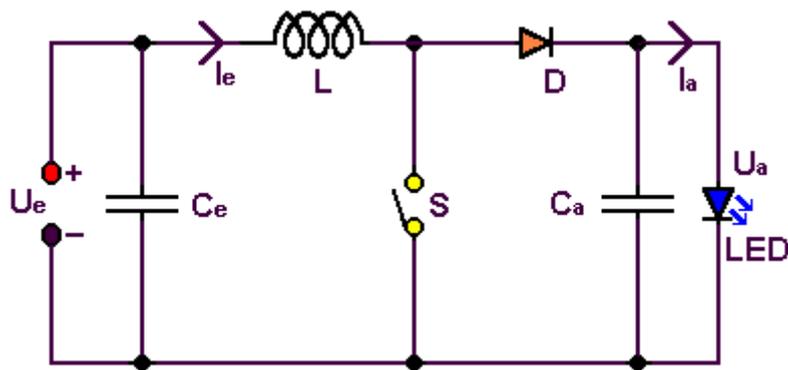


Abb.7b) Aufwärtsregler

Ist in Abb. 7a der Schalter S geschlossen, so fließt ein exponentiell ansteigender Strom durch die Spule. Er baut in ihr ein Magnetfeld auf, bringt die LED zum Leuchten und lädt den Kondensator auf. Öffnet man den Schalter, so treiben die Energien des Magnetfeldes in der Spule und des elektrischen Feldes im Kondensator den Strom durch die LED und die Diode weiter an. Er wird jedoch exponentiell kleiner, da beide Felder sich mehr und mehr abbauen. Schließt man den Schalter wieder, so beginnt das ganze Spiel von vorn. Da die Spule nur während der Einschaltphase mit der Stromquelle verbunden ist, ist die Ausgangsspannung  $U_a$  geringer als die Eingangsspannung  $U_e$ , bei gleichlanger Ein- und Ausschaltphase und nicht zu großer Last etwa halb so groß.

Ist beim Aufwärtsregler nach Abb. 7b der Schalter S geschlossen, so baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf. Die gespeicherte Energie im Feld ist größer als beim Abwärtsregler, da die Spule direkt ohne zusätzlichen Verbraucher mit der Stromquelle verbunden ist. Öffnet man den Schalter, so bricht das Magnetfeld der Spule zusammen. Sie wird zur zusätzlichen Stromquelle und treibt zusammen mit der externen Stromquelle einen Strom durch die Diode. Die LED leuchtet und der Kondensator lädt sich auf. Schließt man den Schalter wieder, so hält die Ladung im Kondensator den Strom durch die LED aufrecht. Fehlt er, so sinkt die Ausgangsspannung während der Einschaltphase des Schalters auf 0V. Er ist beim Aufwärtsregler zwingend notwendig, um einen ständigen Stromfluss durch die LED zu gewährleisten. Da beim Aufwärtsregler in jeder Einschaltphase viel Energie in der Spule gespeichert wird, übersteigt die mittlere Ausgangsspannung die Eingangsspannung, auch wenn während der Schließzeit des Schalters keine Energie zur LED gepumpt wird. Dafür werden sie und der

Kondensator in der Ausschaltzeit mit einer Spannung versorgt, die die Eingangsspannung bei weitem übertrifft.

Für beide Schaltungen gilt: Variiert man die Länge der Ein- und Ausschaltphasen, so wird pro Zyklus mehr oder weniger Energie in den Speicherkreis gepumpt. Der Strom durch den Verbraucher steigt bzw. sinkt.

In der Praxis ersetzt man den Schalter durch einen Transistor, der mit einer Rechteckspannung an seiner Basis ein- und ausgeschaltet wird. Das zeigen die folgenden Versuche mit den Schaltungen nach Abb. 7c und Abb. 7d.

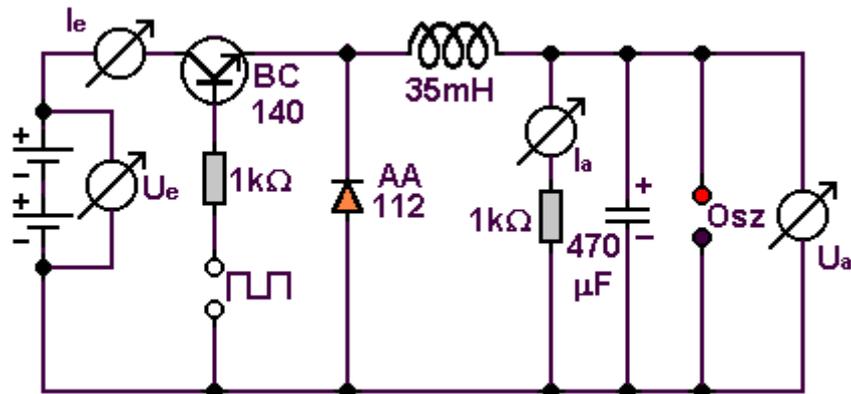


Abb. 7c: Versuchsaufbau Abwärtsregler

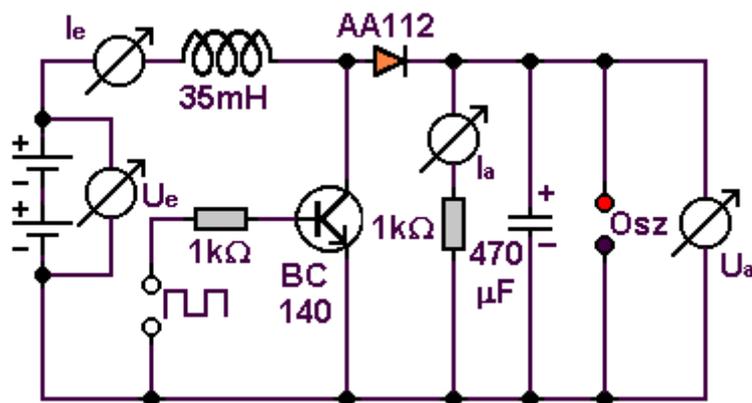


Abb.7d: Versuchsaufbau Aufwärtsregler

### Versuch 1:

#### **Durchführung:**

Man baut die Schaltung nach Abb. 7c auf und schaltet alle Geräte ein. Als Rechteckgenerator benutzt man den Funktionsgenerator der Firma Phywe oder der Firma Leybold, die an einem Ausgang ein rechteckförmiges Signal liefern. Die Frequenz beträgt zu Beginn 5kHz, wird dann im zweiten Teil auf 25 kHz erhöht. Als Spule kann man die große Leybold-Spule mit 1000 Windungen einsetzen, die zwar laut Aufschrift eine Induktivität  $L = 0,044\text{H}$  besitzen soll, aber es in Wirklichkeit nur auf  $L = 0,035\text{H}$  bringt, wie man mit einem Induktivitätsmessgerät zeigen kann. Man fährt die Spannung am Rechteckgenerator hoch. Anschließend entfernt man für einen Moment den Lastwiderstand  $1\text{k}\Omega$  bzw. den Kondensator  $C_a$ .

**Beobachtung:**

Am Anfang liegt am Ausgang keine Spannung an, da der Transistor sperrt. Führt man die Rechteckspannung mit  $f = 5\text{kHz}$  hoch, so zeigt das Voltmeter bzw. der Oszillograph nach kurzer Zeit eine konstante Spannung  $U_a = 1,1\text{ V}$  an. Entfernt man den Kondensator, so steigt die Ausgangsspannung  $U_a$  während der Einschaltzeit des Transistors exponentiell von  $0\text{V}$  auf  $2,2\text{ V}$  an, in der Ausschaltphase fällt sie exponentiell wieder auf  $0\text{V}$  ab. Entfernt man den Lastwiderstand, so liegen am Ausgang nach kurzer Zeit konstant  $2,2\text{ V}$  an. Erhöht man die Frequenz der Steuerspannung auf  $f = 25\text{kHz}$ , so schwankt die Ausgangsspannung ohne Ausgangskondensator um  $1,1\text{V}$ , in der Einschaltphase steigt sie allmählich auf  $1,6\text{V}$  an, während der Ausschaltphase des Transistors fällt sie auf  $0,6\text{V}$  ab. Der Mittelwert beträgt nach wie vor  $1,1\text{V}$ . Die genauen Spannungsverläufe entnehmen Sie den Graphiken in Abb. 7e und 7f. Die roten Linien zeigen den Verlauf ohne Kondensator, die blauen Linien mit Glättungskondensator.

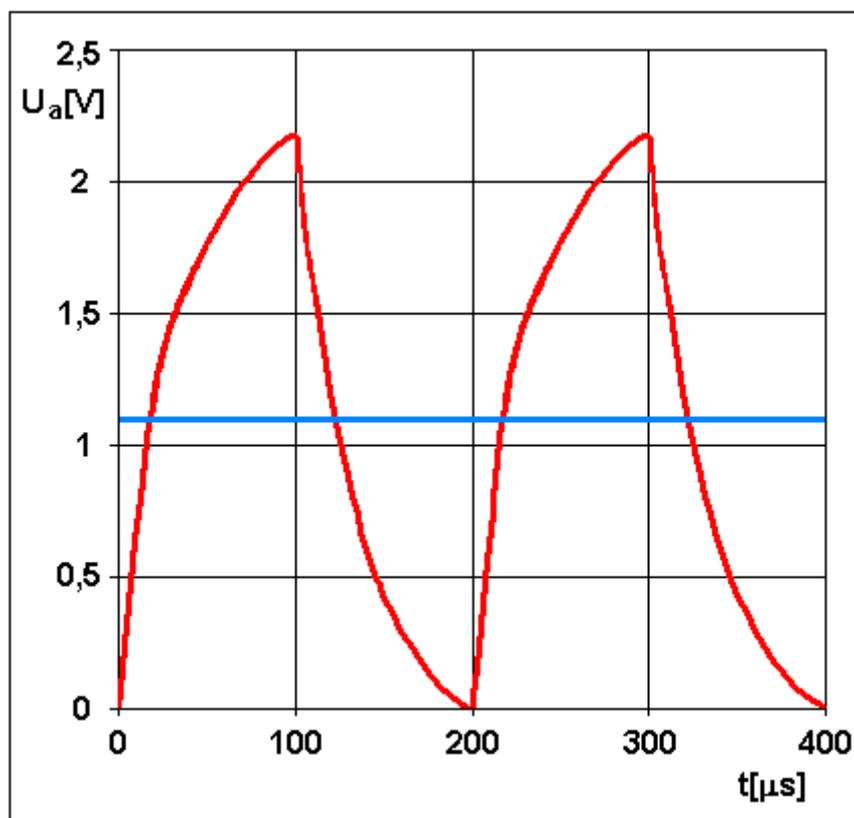


Abb.7e: Abwärtsregler  $f = 5\text{kHz}$

**Messergebnisse:**

Im normalen Betrieb mit Kondensator und Lastwiderstand misst man folgende Werte:

$$U_E = 2,5\text{ V}$$

$$I_E = 0,55\text{ mA}$$

$$U_A = 1,1\text{ V}$$

$$I_A = 1,1\text{ mA}$$

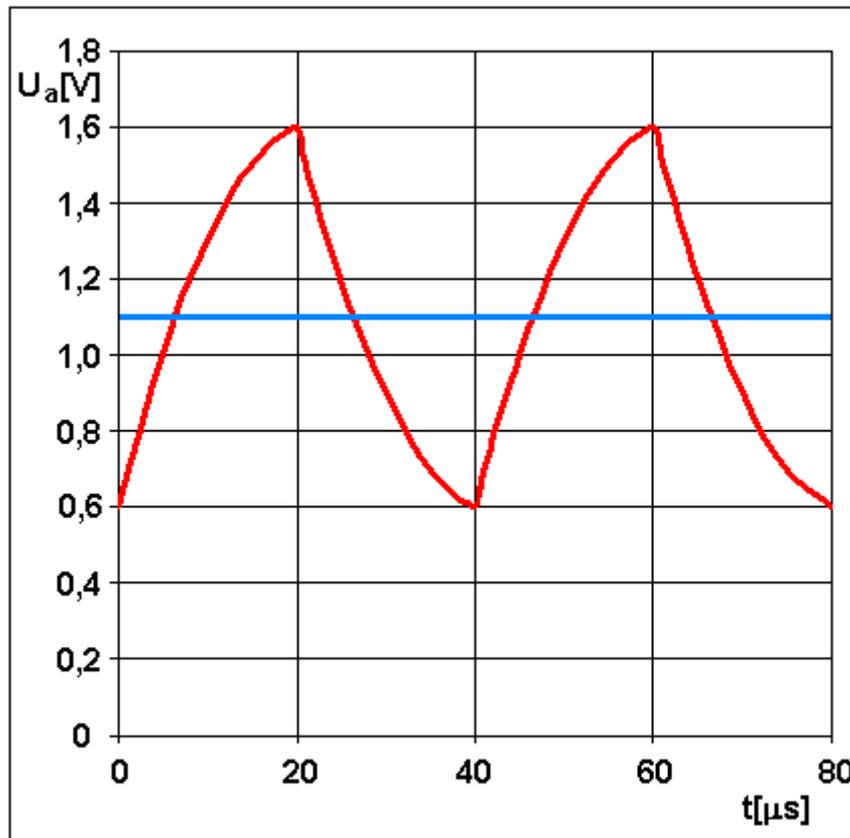


Abb.7f: Abwärtsregler f = 25 kHz

**Auswertung:**

Damit erhält man für die Leistungen:

$$P_E = U_E * I_E = 2,5 \text{ V} * 0,55 \text{ mA} = 1,375 \text{ mW}$$

$$P_A = U_A * I_A = 1,1 \text{ V} * 1,1 \text{ mA} = 1,21 \text{ mW}$$

und für den Wirkungsgrad  $\eta$

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} * 100 \% = 88 \%$$

**Versuch 2:**

**Durchführung:**

Man baut den Versuch nach Abb. 7d auf und schaltet alle Geräte ein. Man fährt die Spannung am Rechteckgenerator mit f = 5kHz hoch. Anschließend entfernt man für einen Moment den Lastwiderstand 1kΩ bzw. den Kondensator C<sub>a</sub>. Dann erhöht man die Frequenz auf f = 25kHz.

**Beobachtung:**

Zunächst liegen am Ausgang etwa U<sub>a</sub> = 2,2V an. Nimmt der Transistor beim Hochfahren des Rechteckgenerators seinen Betrieb auf, so steigt U<sub>a</sub> auf 4V. Entfernt man den Lastwiderstand, so schnellt die Ausgangsspannung bis auf etwa U<sub>a</sub> = 15 V hoch. Baut man den Widerstand wieder ein, so geht sie wieder auf U<sub>a</sub> = 4V zurück. Mit dem Kondensator C<sub>a</sub> am Aus-

gang zeigt der Oszillograph eine perfekte Gleichspannung an, ohne Kondensator eine stark schwankende Gleichspannung zwischen 9V und 2,2V während der Ausschaltphase des Transistors und 0V in der Einschaltphase. Bei  $f = 25\text{kHz}$  schwankt die Spannung weit weniger. Ist der Transistor ausgeschaltet, so schnell sie zunächst nur auf  $U_a = 5\text{V}$  hoch und fällt dann auf 3,9V ab, ist er eingeschaltet, so ist  $U_a$  nach wie vor 0V. Der Wert mit Kondensator bleibt bei konstanten 4V. Die genauen Spannungsverläufe entnehmen Sie den Graphiken in Abb.7g und Abb.7h. Die roten Linien geben den Verlauf ohne Kondensator wieder, die blauen Linien mit Glättungskondensator.

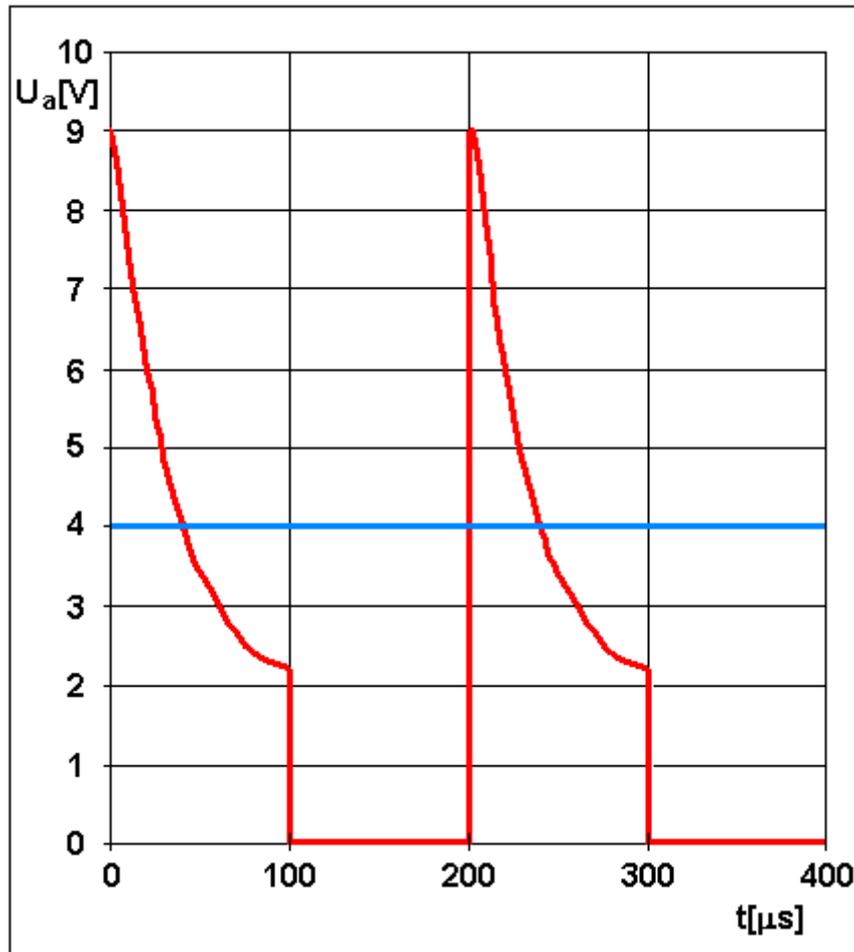


Abb.7g: Aufwärtsregler  $f = 5\text{kHz}$

Messergebnisse:

Im normalen Betrieb misst man folgende Werte:

$$U_E = 2,5 \text{ V}$$

$$I_E = 7,2 \text{ mA}$$

$$U_A = 4 \text{ V}$$

$$I_A = 4 \text{ mA.}$$

**Auswertung:**

Damit erhält man für die Leistungen:

$$P_E = U_E * I_E = 2,5 V * 7,2 mA = 18 mW$$

$$P_A = U_A * I_A = 4 V * 4 mA = 16 mW$$

und für den Wirkungsgrad  $\eta$

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} * 100 \% = 89 \%$$

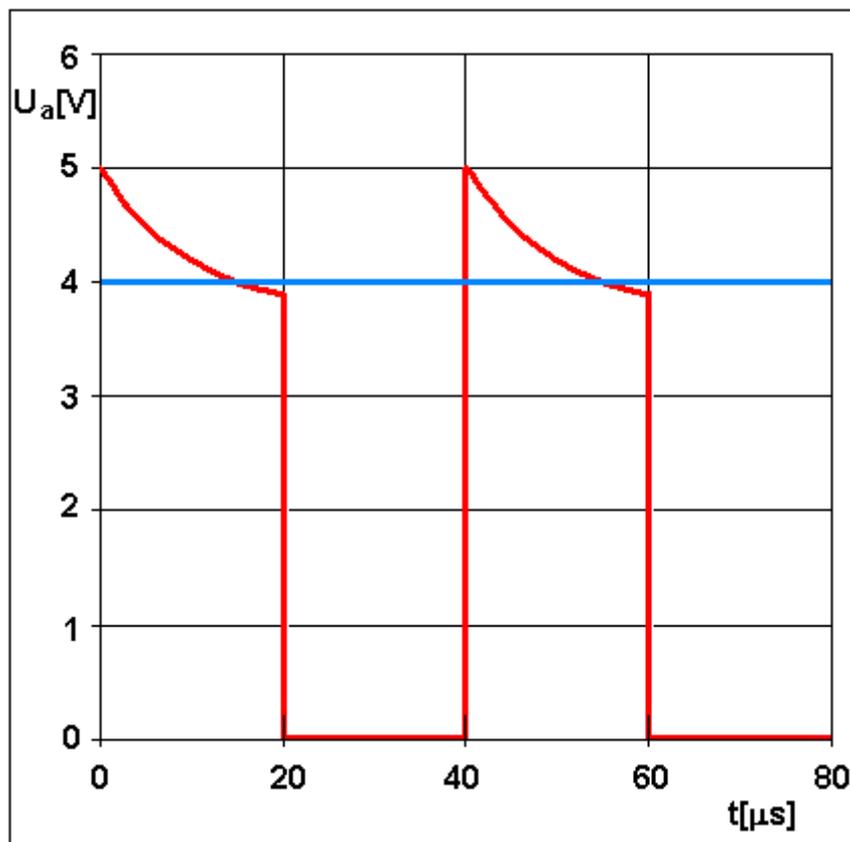


Abb.7h: Aufwärtsregler  $f = 25\text{kHz}$

Die Oszillogramm-Bilder in Abb.7e bis 7h bestätigen die obigen Überlegungen zur Funktion des Auf- bzw. Abwärtsreglers.

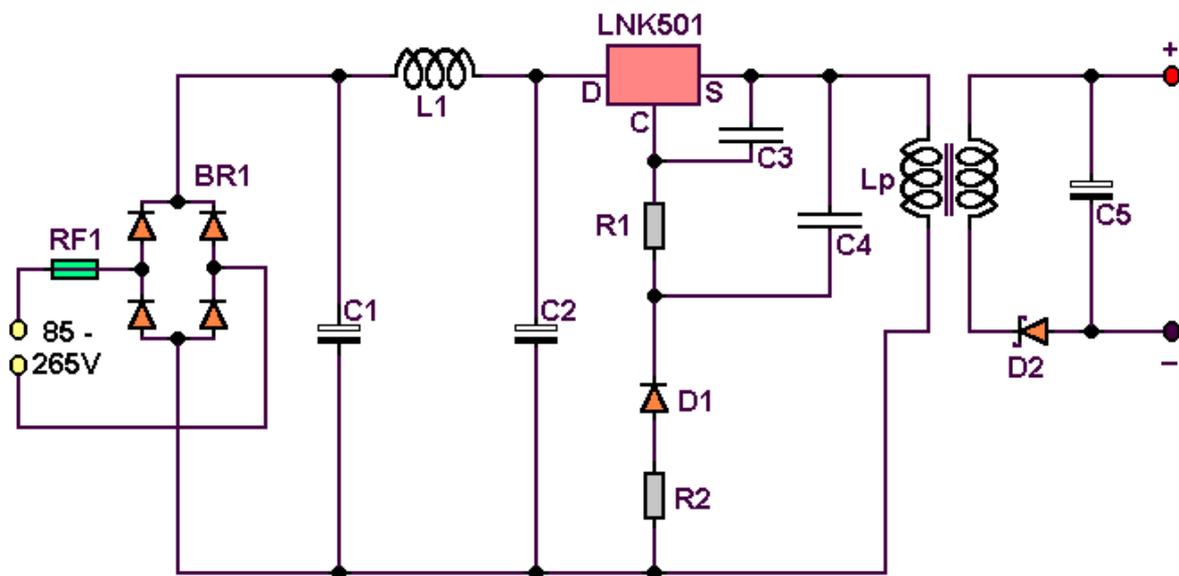
Steuert man das Abtastverhältnis des Rechteckgenerators mit einem kleinen Teil der Spulenspannung über einen Rückkopplungswiderstand oder einen Spannungsteiler, dann regelt sich die Schaltung auf den eingestellten Strom oder die eingestellte Spannung ständig selbst nach. Das gilt auch, wenn sich die Betriebsspannung ändert, weil z.B. die Batterie leerer wird.

Die Einschaltphase verlängert sich, die Ausschaltphase verkürzt sich. Der Eingangsstrom fließt länger. Die mittlere Eingangsstromstärke steigt, so dass die übertragene Energieportion gleich bleibt. Führt man den Rückkopplungswiderstand als Potentiometer aus, so kann

man die Schaltung dimmen. Durch die hohe Schaltfrequenz der Konverter kommt die Speicherdrossel außerdem ohne Eisenkern aus. Sie kann sehr klein ausgelegt sein. Die Verluste im Eisenkern aufgrund von Wirbelströmen entfallen. Außerdem passt die Schaltung in ein kleines Gehäuse, z.B. in den Schraubsockel einer herkömmlichen Glühbirne. Die Speicherdrossel kann auch als Überträger ausgelegt sein, so dass ihre Energie auf einen zweiten, galvanisch getrennten Kreis übertragen werden kann. Das ist vor allem bei Netzbetrieb aus Sicherheitsgründen wichtig. Gleichzeitig kann durch den Überträger über das Windungsverhältnis der beiden Spulen die Ausgangsspannung eingestellt werden.

Inzwischen gibt es von einigen Herstellern Schaltregler in Form integrierter Schaltungen, die den Rechteckoszillator, den Treibertransistor und diverse Zusatzfunktionen wie Energiesparmodus bei geringer Belastung und Ein- und Ausschaltautomatik bei Überlastung, Kurzschluss oder Überhitzung in einem Gehäuse vereinigen.

Einen Schalttrafo auf der Basis des Schaltregler-ICs LNK501<sup>7)</sup>, der für 230V Wechselspannung ausgelegt ist, hat z.B. die Firma [Power Integrations](#) entwickelt. Er wird vielfach als Akkuladegerät für Handys, Digitalkameras, MP3-Player oder Rasierapparate benutzt. Von der Firma Barthelme wurde die Schaltung zum LED-Konverter weiterentwickelt. Er wird von [Conrad-Electronic](#) als fertig aufgebautes Gerät unter der Bezeichnung MPL1 vertrieben. Laut Datenblatt des LNK501<sup>7)</sup> besitzt der Schaltregler, auf dem der Konverter beruht, den grundsätzlichen Aufbau nach Abb.8.



**Abb.8: Schaltregler/Konverter**

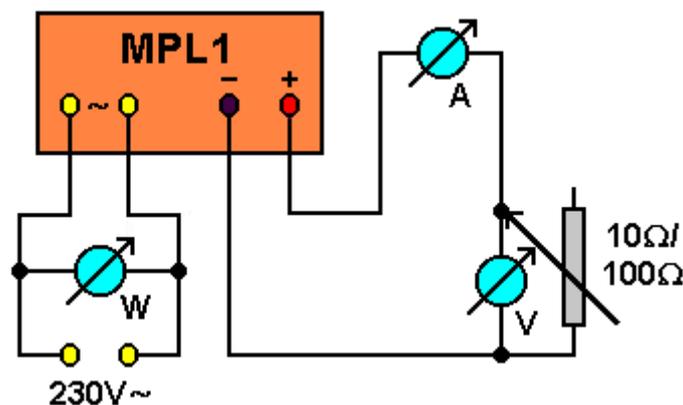
Zunächst wird die Netzspannung gleichgerichtet. Die Siebkette filtert hochfrequente Spannungsanteile heraus und verhindert so eine Rückwirkung der Schaltung auf das Stromnetz, wodurch die Oberwelligkeit des sinusförmigen Netzstromes erhöht würde. Daher liegt die Spule  $L_1$ , die die Gleichspannungsanteile ungehindert passieren lässt, zwischen zwei Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$ , die die hohen Frequenzen auf beiden Seiten kurzschließen. Die Gleichspannung wird geglättet und vom Schaltregler-IC LNK501 zerkleinert. Es arbeitet im Normalbetrieb mit einer Frequenz  $f = 42\text{kHz}$  und im Energiesparmodus mit  $f = 30\text{kHz}$ . Wird der Regler mit der Betriebsspannung verbunden, so lädt sich der Kondensator  $C_3$  intern auf 5,6 V auf. Er

aktiviert den Oszillator und das IC nimmt seine Arbeit auf. Energie wird portionsweise zur Speicherdrossel  $L_p$  transportiert, die als Überträger ausgelegt ist. Ein kleiner Teil der in der Primärwicklung gespeicherten Energie treibt den Rückkopplungsweig an, der aus  $R_2$ ,  $D_1$ ,  $R_1$  und  $C_3$  gebildet wird.  $R_2$  begrenzt die Stromspitzen, die beim Schalten von Induktivitäten auftreten können, auf ein ungefährliches Maß.  $D_1$  hält den Stromfluss durch die Spule während der Ausschaltzeiten des Oszillators aufrecht. An  $C_4$  baut sich eine Spannung auf, die den für die Rückkopplung benötigten Strom durch den Rückkopplungswiderstand  $R_1$  liefert und so das IC steuert.  $C_3$  hält diesen Strom während der Einschaltzeiten des Oszillators aufrecht, in denen der Rückkopplungskreis stromlos ist, da die Diode  $D_1$  sperrt. Steigt die Spannung im Primärkreis des Transformators, so nimmt der Rückkopplungsstrom ebenfalls zu. Über seine Größe werden die Zusatzfunktionen der Schaltung gesteuert. Welche Vorgänge dabei im Einzelnen ablaufen, lässt sich am besten anhand der U/I-Kennlinie des Konverters erklären. Sie kann man mit der Schaltung nach Abb. 9 aufnehmen.

### **Versuch 3:**

#### **Durchführung:**

Man baut die Schaltung nach Abb.9 auf. Zunächst startet man mit voll aufgedrehtem  $100\Omega$ -Poti. Der Widerstand wird dann schrittweise reduziert. Für jeden Stopp notiert man sich die Spannung, die Stromstärke und die Leistung in einer U/I/P-Tabelle. Dann ersetzt man das  $100\Omega$ -Poti durch ein  $10\Omega$ -Poti und führt die Reihe bis  $0\Omega$  fort. Aus der Tabelle erstellt man mit Excel die U/I-Kennlinie.



**Abb.9: Versuchsaufbau U/I-Kennlinie des LED-Konverters**

#### **Beobachtung:**

Zunächst fällt die Ausgangsspannung nur langsam ab, der Ausgangstrom steigt kontinuierlich. Erreicht er seinen Maximalwert, so behält er seinen Wert bei. Dafür sinkt die Ausgangsspannung fast gleichmäßig. Ab einer gewissen Spannung fällt der Strom sehr schnell auf  $50\text{ mA}$  ab. Die genauen Werte entnehmen Sie Tabelle 1. Trägt man  $U$  gegen  $I$  auf, so erhält man den Kurvenverlauf in Abb. 10.

#### **Erklärung:**<sup>7)</sup>

Ist die Ausgangsleistung wie zu Beginn des Versuches sehr klein, so startet der Regler im Energiesparmodus mit einer Schaltfrequenz von  $30\text{ kHz}$ . Der Steuerstrom liegt dann in der Größenordnung von  $I_C = 2,4\text{ mA}$ , der Ausgangstrom bei  $I_A = 10\text{ mA}$ .  $I_C$  ist recht groß, da die Spannung im Sekundärkreis und damit im Primärkreis ihren Höchstwert erreicht. Nimmt die Ausgangsleistung zu, so geht der Regler bei einem Steuerstrom von  $I_C = 2,3\text{ mA}$  und etwa  $4\%$

U[V]	I[mA]	P[W]
6	0	0
5,9	6	0,06
5,5	30	0,26
5,2	60	0,49
4,9	100	0,75
4,7	150	1,09
4,5	200	1,4
4,3	290	1,9
4,2	350	2,15
3,7	350	1,97
3,4	345	1,74
3	340	1,57
2,5	345	1,34
2	350	1,02
1,3	350	0,67
1	310	0,47
0,4	50	0,03

Tabelle 1: Messwerte

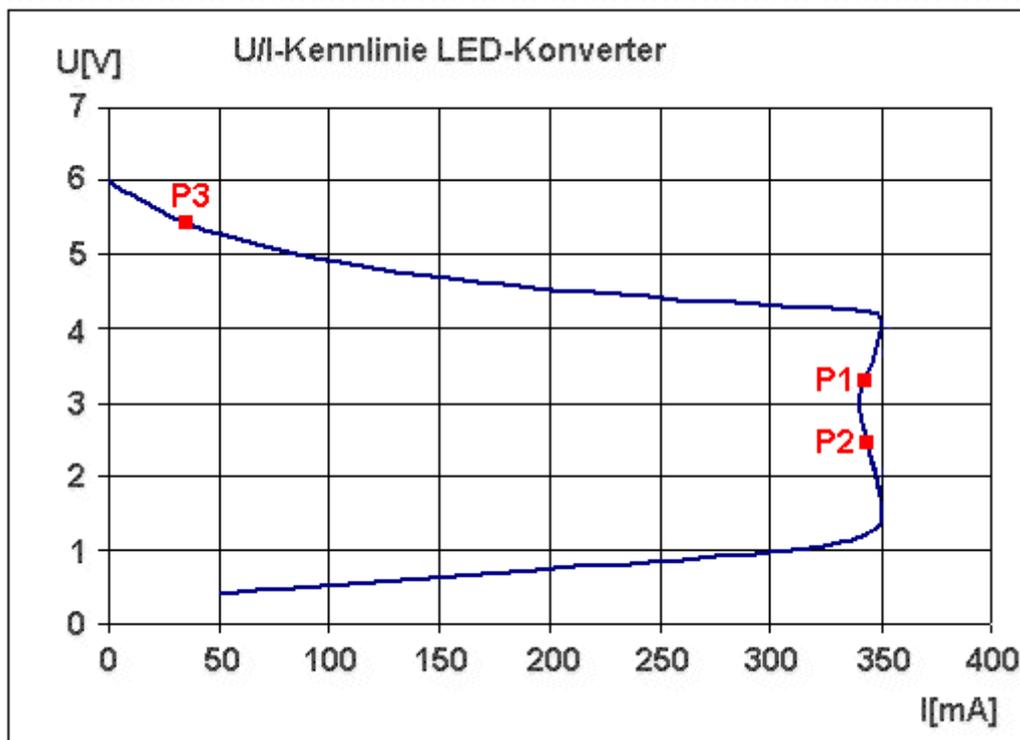


Abb.10: U/I-Kennlinie des LED-Konverters

seiner Maximalleistung in den Normalmodus über, in dem die Schaltfrequenz auf 42 kHz erhöht wird. Die zusätzlich benötigte Energie des Verbrauchers wird durch einen zunehmenden Strom aufgebracht, die Spannung sinkt nur wenig. Der Schaltregler arbeitet im konstantspannungsbereich. Erreicht der Strom seine Obergrenze, so schaltet der Regler auf den

Konstantstrommodus um. Das geschieht bei einem Steuerstrom von etwa 2mA. Reduziert man den Lastwiderstand weiter, so sinken die Ausgangsspannung und der Steuerstrom ab. Erreicht er  $I_c = 1\text{mA}$ , so schaltet der Regler ab und aktiviert die Einschaltautomatik. So ist die Schaltung vor Überlastung, möglicherweise auch verursacht durch einen Kurzschluss, geschützt. Die Einschaltautomatik versucht in diesem Zustand 300 mal pro Sekunde, den Regler wieder im Normalmodus zu starten. Das gelingt, sobald die Überlastung beseitigt wurde.

Vor allem der Konstantstrommodus ist für den LED-Betrieb bestens geeignet. Eine weiße LED mit einer Leistung von 1W besitzt laut Hersteller folgende Kenndaten:

$$U = 3,2\text{ V}$$

$$I = 350\text{ mA.}$$

Aus der U/I-Kennlinie in Abb.10 kann man entnehmen, dass der Schaltregler diese Werte im Punkt P1 an seinem Ausgang fast optimal liefern kann. Für eine rote Hochleistungs-LED der Leistung 1W gilt laut Hersteller:

$$U = 2,5\text{ V}$$

$$I = 350\text{ mA.}$$

In Punkt P2 der Kennlinie werden diese Werte in fast idealer Weise erreicht. Schließt man zwei weiße LEDs in Reihe, was laut Hersteller möglich ist, so sinkt die Helligkeit beider LEDs drastisch ab. Sie werden nur noch mit einem kleinen Teil ihrer vollen Leistung betrieben. Nachmessen lieferte für die Spannung und die Stromstärke:

$$U = 5,4\text{ V}$$

$$I = 35\text{ mA.}$$

wobei für den optimalen Betrieb folgende Werte erforderlich gewesen wären:

$$U = 2 * 3,2\text{ V} = 6,4\text{ V}$$

$$I = 350\text{ mA.}$$

Diese Werte kann der Schaltregler an seinem Ausgang nicht liefern. Vor allem die hohe benötigte Spannung bereitet ihm Probleme, die er näherungsweise nur in Punkt P3 der Abb.10 bei einem Strom zur Verfügung stellen kann, der die LEDs gerade noch zum Leuchten bringt. Laut Hersteller soll man an den Konverter nicht zwei rote LEDs in Reihe gleichzeitig anschließen. Warum das so ist, geht aus der Bedienungsanleitung nicht hervor. Möglicherweise befindet sich der Konverter dann in der Nähe des Übergangsbereiches zwischen konstanter Spannung und konstanter Stromstärke. Da LEDs erhebliche Toleranzen aufweisen, könnten

die LEDs sich in einem nicht vorhersagbaren Zustand befinden, so dass sie entweder hell oder nur gering leuchten.

Den elektrischen Wirkungsgrad der Schaltung ermittelt man, in dem man die Eingangsleistung  $P_E$  mit einem Wattmeter (s. Abb.9) bestimmt. Man misst bei maximaler Ausgangsbelastung  $P_A$  (s. Abb.10)

$$P_A = 0,350 \text{ A} * 4,2 \text{ V} = 1,47 \text{ W}$$

des Konverters eine Eingangsleistung

$$P_E = 2,15 \text{ W}.$$

Damit erhält man einen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{1,47 \text{ W}}{2,15 \text{ W}} * 100 \% = 68,4 \%$$

Für alle anderen Punkte der Kennlinie ergeben sich ähnliche Werte. Laut Datenblatt des LNK501<sup>7)</sup> besitzt die Schaltung einen Wirkungsgrad von ca. 72%, was mit dem gemessenen Wert recht gut übereinstimmt.

Andere Firmen haben LED-Konverter auf der Basis von Schaltreglern entwickelt, mit denen sich bis zu 16 LEDs in zwei getrennten Kreisen gleichzeitig bei voller Leistung von 1W pro LED betreiben lassen. Ein solcher dimmbarer Konverter der Firma Voltcraft mit der Bezeichnung Plus V12x350 besitzt bei einer Eingangsleistung pro Kreis

$$P_E = 12,1 \text{ W}$$

und einer Ausgangsleistung pro Kreis

$$P_A = 0,35 \text{ A} * 27 \text{ V} = 9,45 \text{ W}$$

einen Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{9,45 \text{ W}}{12,1 \text{ W}} * 100 \% = 78 \%$$

Er ist ebenfalls für Netzbetrieb ausgelegt. Andere integrierte Schaltungen sind für niedrigere Eingangsgleichspannungen konzipiert. Dadurch steigt der Wirkungsgrad. Die Firma [recom-international](#) verkauft z.B. den LED-Treiber RCD-24-0.35. Alle Bauteile inklusive Diode, Spule und Glättungskondensator sind in einem Gehäuse untergebracht. Mit nur einem externen Widerstand und einem Poti kann man bis zu sieben LEDs zu je 1W Leistung gleichzeitig betreiben und dimmen. Die Betriebsspannung sollte an die Zahl der LEDs angepasst werden, um die Verluste möglichst gering zu halten. Man benötigt 3,5 V pro LED. Dann erreicht man einen Wirkungsgrad bis 97%. Der Widerstand und das Poti müssen so für die Betriebsspannung ausgelegt werden, dass am Dimmereingang eine Spannung zwischen 0V und 4,5 V an-

liegt. Dann werden die LEDs von dunkel bis hell durchgesteuert. Der Aufbau der Schaltung auf einer Lochrasterplatte wurde schon in Kapitel 3.1.1 vorgestellt. Weitere Informationen entnehmen Sie dem Datenblatt, das sie unter [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo) mit der Artikelbezeichnung 180321 downloaden können.

In LED-Taschenlampen werden Aufwärtsregler eingesetzt, damit die Helligkeit der LED konstant bleibt, wenn der Ladungszustand der Akkus sinkt. Fällt die Spannung unter einen Grenzwert, so erlischt die LED fast schlagartig. Beim Aufwärtsregler LT1073 der Firma Linear Technology benötigt man als externe Bauteile eine Speicherdrossel, einen Glättungskondensator, eine Diode und 3 Widerstände, um den Strom zu begrenzen und die Rückkopplungsspannung zu gewinnen. Abb.11 zeigt eine typische Anwendung der Schaltung. Mit ihr lässt sich eine weiße LED mit einer Mignonzelle mit 1V – 1,5 V betreiben. Die integrierte Schaltung bietet weitere interessante Möglichkeiten. Man kann Spannungen bis zu 12 V aus einer 5V Batterie erzeugen. Sie kann auch als Abwärtsregler benutzt werden. Nähere Informationen entnehmen Sie dem Datenblatt, das sie unter [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo) mit der Artikelbezeichnung 151773 abrufen können. Wegen der integrierten Bauweise sind die Schaltwege kurz. Die Verluste werden geringer, der Wirkungsgrad steigt laut Hersteller bis auf 97%.

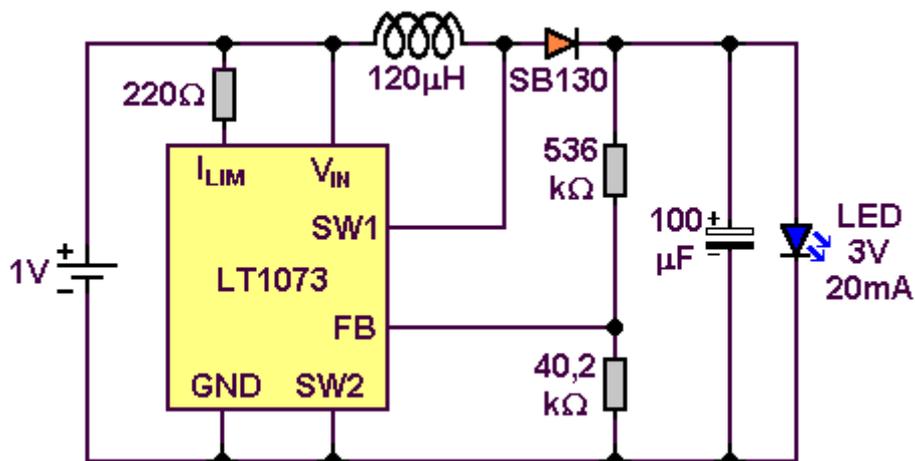


Abb.11: Aufwärtsregler LT1073

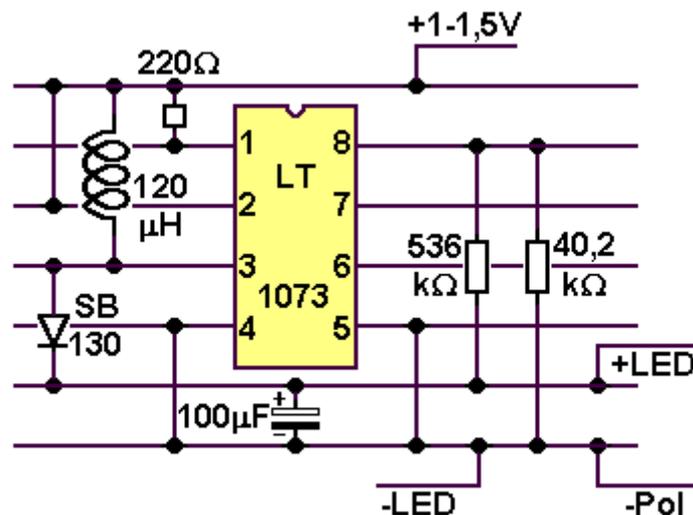


Abb.12: Verschaltung auf einer Lochrasterplatte

Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.12. Für ein Modell der Taschenlampe benötigt man außer der Platine noch folgende Teile:

- 1 Mikroschalter
- 1 Batteriehalter für eine Mignonbatterie AA
- 1 Mignonbatterie AA
- 1 LED-Fassung
- 1 weiße LED
- 2 Holzschraubchen
- 2 Holzleisten 10x10x40mm
- 1 Ferrero-Rocher-Dose
- Lötmaterial
- Patex

Zunächst befestigt man die Platine mit den Schraubchen auf den Holzleisten. Dann klebt man die Leisten ebenso wie den Batteriehalter mit etwas Patex auf den Boden der Ferrero-Rocher-Dose. Für die LED-Fassung bohrt man mit einem Holzbohrer ein 8mm-Loch in den Deckel der Dose, für den Mikroschalter ein 6mm-Loch und verschraubt die Teile am Deckel. Man setzt die LED ein und verbindet die einzelnen Teile mit Schaltlitze gemäß Abb. 11 und 12. Zwischen den Pluspol der Batterie und den Pluspolanschluss der Platine legt man den Mikroschalter, damit man die LED ein- und ausschalten kann. Fertig ist die Luxusausführung der Taschenlampe. Sie ist wegen der vielen Bauteile allerdings nicht ganz billig. Dafür leuchtet sie bis zum Schluss mit stets gleicher Helligkeit und die Batterie hält sehr lange.

## 3.2 Fotosensoren

### 3.2.1 Fotowiderstände

Fotowiderstände steuern vor allem elektronische Schaltungen, die auf das Tageslicht reagieren. Sie schalten bei eintretender Dunkelheit die Straßenlampen an oder fahren die Rollläden automatisch herunter. Alarmanlagen lassen sich mit ihnen in der Nacht scharf machen, oder schummrige Seitenwege automatisch beleuchten. Ein solcher Dämmerungsschalter funktioniert wie folgt. Ein Fotowiderstand registriert laufend die Helligkeit. Sein Widerstandswert hängt vom Lichteinfall ab. Dieser Wert wird in zwei Komparatoren, die in einem IC untergebracht sind, mit einem Sollwert verglichen. Stimmen beide überein, so wechselt das Relais seinen Zustand, gesteuert über den Ausgang des Komparators und einen Schalttransistor. Die Schaltung weist eine Hysterese auf, so dass die beiden Schaltvorgänge für hell und dunkel bei etwas unterschiedlichen Helligkeitswerten erfolgen. Ansonsten würde das Relais zum Schwingen neigen, bei kleinen Schwankungen der Helligkeit in der Nähe der Schaltschwelle mehrfach ein- und ausschalten. Die Schwellen können über zwei Potis getrennt eingestellt werden. Bei Helligkeit ist das Relais angezogen und eine Kontrollleuchtdiode zeigt diesen Zustand an. Die Schaltung ist als Bausatz bei der Firma [Conrad-Electronic](#) erhältlich. Abb.1 zeigt den fertigen Aufbau, untergebracht in einer Mon-Cheri-Dose. Mit dem Schalter kann man einige Versuche vorführen, mit denen sich die Anwendungsmöglichkeiten demonstrieren lassen.



Abb.1: Dämmerungsschalter

#### **Versuch 1:**

#### **Durchführung:**

Man schließt an das Relais des Dämmerungsschalters nach Abb.2 über einen eigenen Stromkreis eine Lampe z.B. mit den Kenndaten 6V/0,05A oder über eine Konstantstromquelle eine LED einmal an den Ausgang I und einmal an den Ausgang II an. Die blaue Buchse ist dabei jeweils der 2. Pol. Dann dunkelt man den Fotowiderstand für kurze Zeit ab.

#### **Beobachtung:**

An Ausgang II leuchtet die Lampe bei Helligkeit. Wird der Dämmerungsschalter durch Abdunkeln ausgelöst, so geht die Lampe aus. Wird es wieder hell, so geht sie wieder an. An Ausgang I ist es umgekehrt.

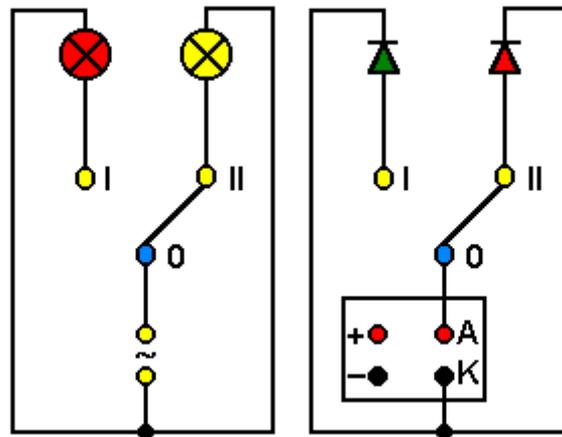


Abb.2: Beschaltung des Relais

**Folgerung:**

Ausgang II hat für Beleuchtungszwecke keine sinnvolle Bedeutung. Mit Ausgang I kann man Straßenlaternen oder andere Lampen automatisch ein- und ausschalten lassen.

**Versuch 2:**

**Durchführung:**

Man ersetzt die Lampe durch einen Piezosummer mit eingebauter Elektronik. Dabei kann man die gleiche Stromquelle benutzen wie für den Dämmerungsschalter und wiederholt Versuch 1.

**Beobachtung:**

An Ausgang II verstummt der Summer beim Abdunkeln, an Ausgang I ertönt er.

**Folgerung:**

Diese Funktion könnte man z.B. verwenden, um in einer Dunkelkammer ein Warnsignal zu erzeugen, wenn es zu hell wird. Ebenso könnte man damit eine Alarmanlage betreiben. Der Sensor wird im Dunkeln hinter einem Bild versteckt. Beim Abnehmen geht die Alarmanlage los.

**Versuch 3:**

**Durchführung:**

Man schließt an das Relais über Ausgang I oder II einen Digitalzähler oder das Messwertfassungssystem Cassy an. Dazu muss man das Signal allerdings entprellen, da sonst jeder Impuls mehrfach gezählt werden kann, weil ein Relais beim Anziehen zum Schwingen neigt. Das gelingt mit einer Schaltung nach Abb.3. Sie lässt sich leicht auf einer Lochrasterplatine zusammenbauen. Der Entpreller wird zwischen das Relais und den Digitalzähler geschaltet. Dann dunkelt man den Dämmerungsschalter ab.

**Beobachtung:**

Jede Abdunkelung verursacht einen Zählimpuls, an Ausgang II jede Aufhellung.

**Folgerung:**

Mit der Schaltung könnte man die Besucher in einem Zoo oder Museum zählen. Dazu müsste man den Fotowiderstand mit einer eigenen Lampe beleuchten. Wird der Lichtstrahl durch einen Besucher unterbrochen, so löst er einen Zählimpuls aus. Besser geeignet wäre allerdings eine IR-Lichtschranke, die in Kapitel 3.3.3 näher beschreiben wird. Sie reagiert weniger

empfindlich auf störendes Umgebungslicht. Ist die Dämmerungsschaltung von vorneherein vorgesehen, einen Zähler zu steuern, so würde man auf das Relais verzichten und das Steuersignal direkt am Transistor des Dämmerungsschalters abgreifen und elektronisch aufbereiten.

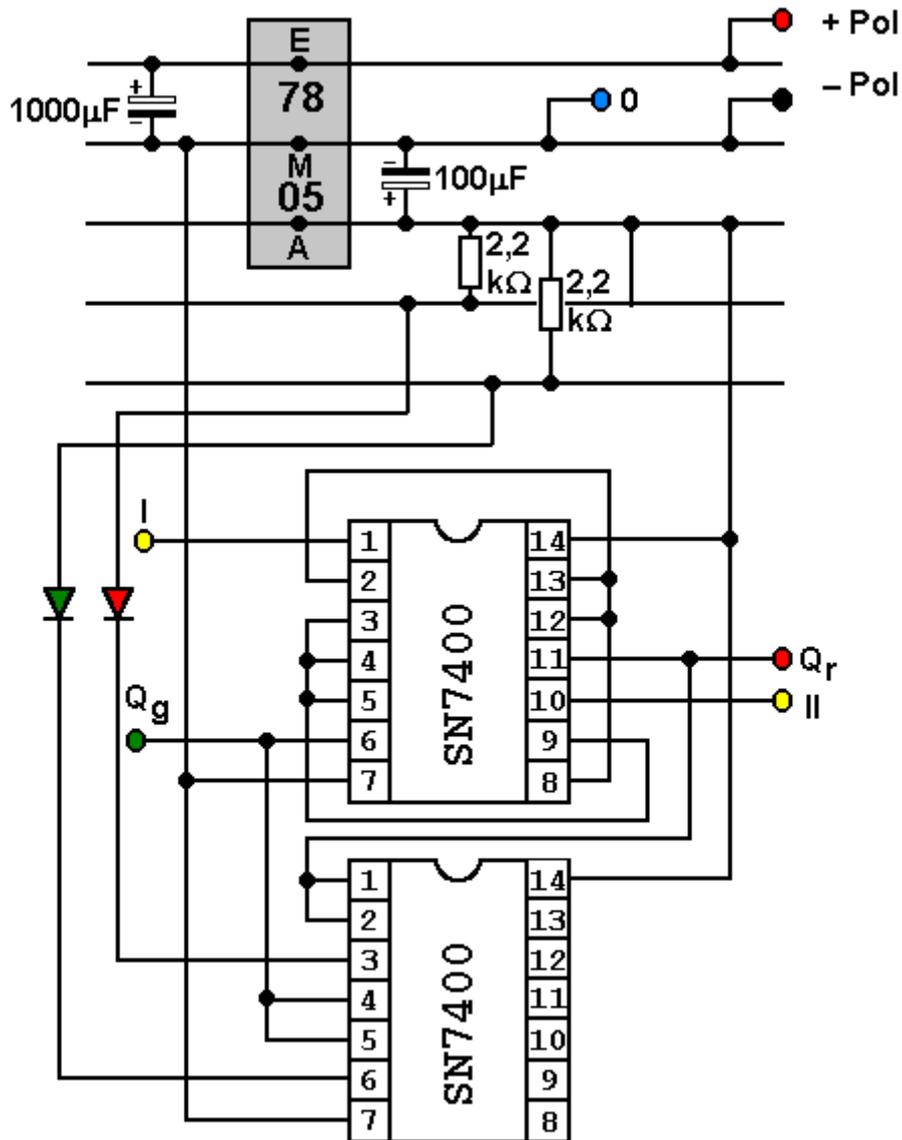


Abb.3: Entpreller

### 3.2.2 Fotodioden

Fotodioden werden außer in CCD-Chips von Digitalkameras heute kaum noch in elektronischen Schaltungen verwendet, aber in der Physik sind einige interessante Versuche mit ihnen möglich, die das elektromagnetische Spektrum betreffen. Es gibt Fotodioden, die für Infrarotlicht, sichtbares Licht oder ultraviolettes Licht empfindlich sind. Mit ihnen lassen sich die einzelnen Wellenlängen im Spektrum einer Lampe nachweisen. Dazu dient der Versuchsaufbau nach Abb.1.

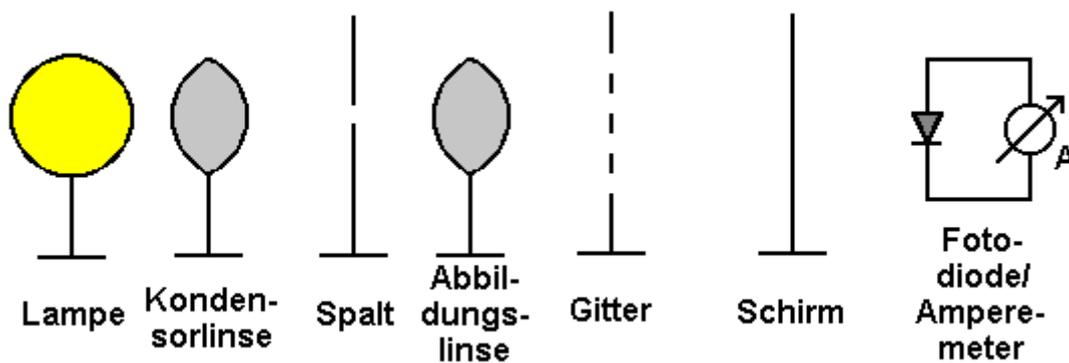


Abb.1: Versuchsaufbau

**Versuch 1:**

**Durchführung:**

Man erzeugt mit dem Aufbau nach Abb.1 das Spektrum einer Quecksilberdampfampe und fährt es mit einer UV-Fotodiode des Typ TW30SX ab.

**Beobachtung:**

Neben der violetten Linie schlägt das Voltmeter stark aus.

**Folgerung:**

Neben der sichtbaren Linie der violetten Farbe gibt es weitere Wellenlängenbereiche, die für unser Auge nicht sichtbar sind. Man bezeichnet sie als Ultraviolett, kurz UV.

**Versuch 2:**

**Durchführung:**

Man ersetzt die Quecksilberdampfampe durch eine Halogenlampe und fährt das Spektrum mit einer IR-Fotodiode des Typs SFH205F ab.

**Beobachtung:**

Im violetten Bereich des 2. Nebenmaximums schlägt das Voltmeter stark aus, im Bereich des 1. nicht.

**Folgerung:**

Das sichtbare Spektrum des 2. Maximums wird durch ein unsichtbares Spektrum im IR-Bereich überlagert. Die Beugungswinkel für diesen Bereich sind nach der Formel

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

größer als die des sichtbaren Bereiches. Darin bedeuten:

$\alpha$ : Beugungswinkel,

k: Ordnung des Maximums,

$\lambda$ : Wellenlänge,

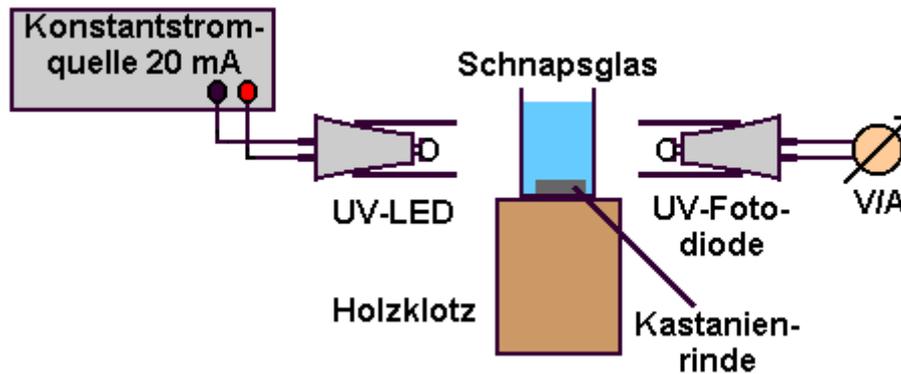
g: Gitterkonstante.

Violettes Licht hat eine Wellenlänge von ca. 450 nm, nahes Infrarot von etwa 900nm, also genau doppelt so groß. Daher wird es nach obiger Formel unter Winkeln gebeugt, die bei kleinen Winkeln etwa doppelt so groß wie die des violetten Lichtes. Das 2. Nebenmaximum des violetten Lichtes wird also vom 1. Nebenmaximum des infraroten Lichtes überlagert.

### **Versuch 3:**

#### **Durchführung:**

Man baut die Versuchsanordnung nach Abb.2 auf. Dann gibt man in das Schnapsgläschen ein Stück Kastanienrinde. Dabei kann man sowohl die Leerlaufspannung als auch den Leerstromstrom messen. Für den Strom benötigt man allerdings ein sehr empfindliches Amperemeter.



**Abb.2: Versuchsaufbau**

#### **Beobachtung:**

Ohne Kastanienrinde zeigt das Voltmeter eine Spannung an. Verschiebt man das Schnapsglas ein wenig hin und her, so kann man beobachten, dass der Ausschlag des Voltmeters sogar etwas zu- oder abnimmt. Wenn sich das Aesculin der Kastanienrinde nach und nach im Wasser löst, sinkt der Ausschlag des Voltmeters. Gleichzeitig fluoresziert das Wasser in bläulicher Farbe.

#### **Erklärung:**

Das UV-Licht der UV-LED durchdringt das Glas und das Wasser und wird zunächst von der UV-Fotodiode empfangen. Je nach Standort wirkt das Glas wie eine Linse. Aesculin absorbiert das violette Licht der UV-LED und wandelt es in sichtbares blaues Licht etwa der Wellenlänge 450nm um. Dieses Licht wird von der UV-Fotodiode nicht mehr registriert, da sie nur im Wellenlängenbereich von 215 – 387nm empfindlich ist.

### **3.2.3 Fototransistoren**

Fototransistoren werden vor allem eingesetzt, wenn es darum geht, mit Licht Informationen zu übertragen oder andere Geräte zu steuern. Musikliebhaber überspielen mit Infrarotlicht Musik vom Verstärker auf die Lautsprecher des Kopfhörers. Infrarotlichtschranken überwachen die Eingänge an Kaufhäusern oder zählen die Besucher in einem Zoo. Angeregt vom Krimi von Agatha Christie habe ich im Folgenden versucht, eine elektronische Schaltung zu entwerfen, mit der man mit einer Leuchtdiode im sichtbaren bzw. infraroten Bereich Musik übertragen kann. Dazu benötigt man eine Elektronik, die das Signal aus dem Ohrhörerausgang eines Radio- oder Kassettenrekorders so aufarbeitet, dass man damit die Helligkeit der LED modulieren kann. Die LED kann man auf keinen Fall direkt an diesen Ausgang anschließen, da die IR-LED relativ viel Strom benötigt und damit der Ohrhörerausgang überlastet wäre. Außerdem hat ein Ohrhörer meist einen Widerstand von 100  $\Omega$  oder mehr, die IR-LED dagegen bei Vollast für den Typ LI521 nur einen Widerstand von

$$R = \frac{1,5 \text{ V}}{0,05 \text{ A}} = 30 \Omega.$$

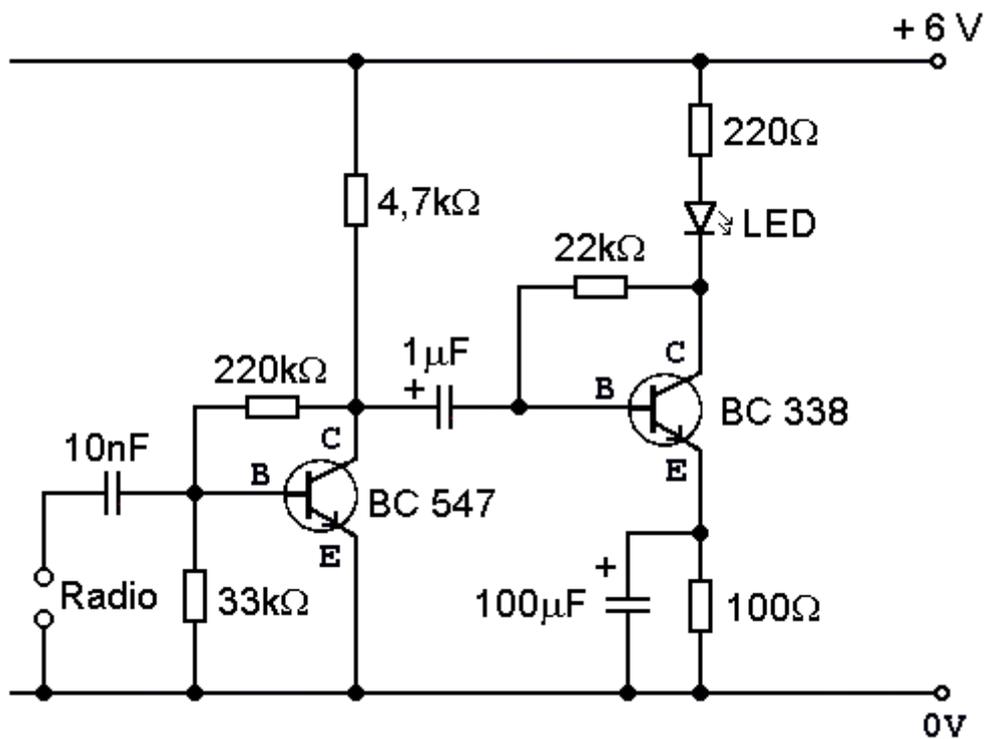


Abb.1: Schaltplan Sender

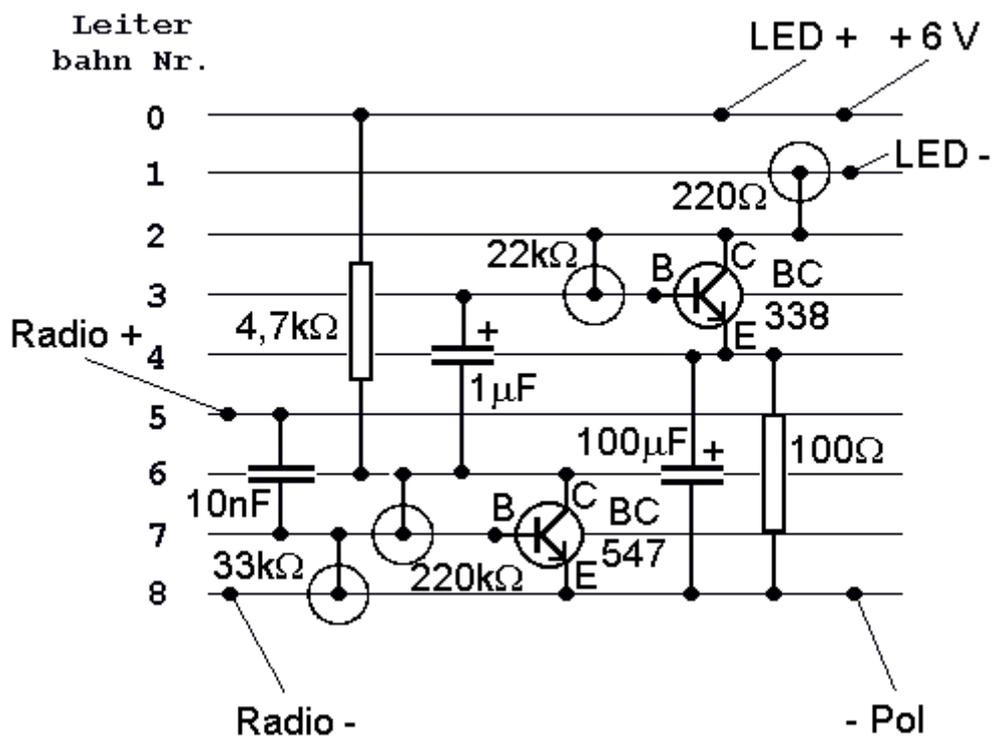


Abb.2: Platine LED-Sender

Ferner liefert ein Ohrhörerausgang nur Spannungen im mV-Bereich. Man benötigt also eine einfache Verstärkerschaltung, die zugleich die Impedanz des Ohrhörerausgangs herabsetzt. Abbildung 1 zeigt die Schaltung, die das leistet.

Die Schaltung besteht aus zwei Transistorstufen. In der ersten Stufe wird die Spannung des Radioausgangssignals verstärkt. Dazu reicht ein preiswerter Kleintransistor vollkommen aus. Um zu verhindern, dass die Gleichspannung der elektronischen Schaltung den Ohrhörerausgang des Radios beschädigen kann, sind beide über einen Kondensator von 10 nF entkoppelt. Die typische Kleintransistorverstärkerstufe steuert einen zweiten Transistor, der die für die LED benötigte Stromstärke liefert. Da mit der Schaltung zu Demonstrationszwecken eine LED im sichtbaren Bereich und im infraroten Bereich betrieben werden soll, muss man bei der Beschaltung des zweiten Transistors einen Kompromiss eingehen.

Die verwendete IR-LED benötigt bei Vollast folgende Betriebswerte

$$U = 1,5 V$$

$$I = 0,05 A,$$

eine weiße LED dagegen

$$U = 3,2 V$$

$$I = 0,02 A.$$

Um keine der beiden zu überlasten, legt man den Vorwiderstand  $R_V$  so aus, dass für die Betriebsspannung  $U_B$  und den Betriebsstrom  $I_B$  maximal gilt

$$U_B = 1,5 V$$

$$I_B = 0,02 A.$$

Damit erhält man für den Vorwiderstand

$$R_V = \frac{U_{ges} - U_B}{I_B} = \frac{6 V - 1,5 V}{0,02 A} = 225 \Omega.$$

Darin ist  $U_{ges}$  die Spannung der Spannungsquelle von 6V und  $U_B$  die Spannung, die an der LED abfällt. Gängig sind 220 $\Omega$ . Zusätzlich wurde ein Widerstand

$$R_E = 100 \Omega$$

in Emitterschaltung eingebaut, um den Arbeitspunkt des Transistors zu stabilisieren. Schaltet der Transistor stärker durch, so steigt der Strom und damit der Spannungsabfall am Emitterwiderstand  $R_E$ . Das Potential des Emitters wird angehoben, die Spannung zwischen Emitter und Basis sinkt. Der Transistor sperrt zunehmend und wirkt so dem zu großen Strom entgegen. Da aber nur der Gleichstromanteil gering gehalten werden soll, die Niederfrequenzschwankungen, die durch den Ohrhörerausgang des Radios verursacht werden, aber gerade an die LED übertragen werden sollen, schaltet man zum Emitterwiderstand einen Kondensa-

tor parallel, der nur den Gleichstrom sperrt, den Wechselstrom jedoch ungehindert passieren lässt. Damit auch tiefe Frequenzen nicht unterdrückt werden, muss der Kondensator einen recht hohen Wert von  $100\mu\text{F}$  haben. Mit den angegebenen Werten leuchten beide LEDs zwar nicht optimal, aber doch so hell, dass man die Übertragung von Musik über eine Entfernung von ein bis zwei Metern demonstrieren kann. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.2.

Man benötigt für den LED-Sender folgende Bauteile:

**Transistoren:**

1 BC 338

1 BC 547

**Kondensatoren:**

1  $1\mu\text{F}$

1  $100\mu\text{F}$

1  $10\text{nF}$

**Widerstände:**

1  $100\Omega$  0,25 W

1  $220\Omega$  0,25 W

1  $22\text{k}\Omega$  0,25 W

1  $4,7\text{k}\Omega$  0,25 W

1  $33\text{k}\Omega$  0,25 W

1  $220\text{k}\Omega$  0,25 W

**Steckverbinder:**

2 Bananenstecker rot

1 Bananenstecker schwarz

1 Klinenstecker, passend zum Ohrhörerausgang des Radios

2 Telefonbuchsen gelb

2 Telefonbuchsen schwarz

2 Telefonbuchsen rot

2 Kupplungen schwarz 4mm

2 Kupplungen rot 4 mm

**sonstiges Zubehör:**

1 LED weiß

1 IR-LED

4 Kabel 30 cm lang mit Bananenstecker, 1 adrig,

1 Kabel 1 m lang, 3 adrig

1 Lochrasterplatine RM 2,54 mm  $6\text{cm}\times 9\text{cm}$

2 Holzleisten  $1\text{cm}\times 1\text{cm}\times 7\text{cm}$

4 Holzschraubchen  $2\text{mm}\times 10\text{mm}$

1 Ferrero Rocher oder Mon Chéri Dose

2 Gummistopfen  $\varnothing 3\text{cm}$

Schaltlitze

Lötzinn  
Isolierband  
Patex

#### **zusätzliche Geräte:**

1 stabilisiertes Netzgerät 6V  
1 Stativ zum Halten der LED

Schneiden Sie zunächst die Platine auf eine Größe von etwa 6cmx9cm zurecht. Dann verlöten Sie die einzelnen Bauteile und die Anschlusslitzen wie in Abb.2 angegeben auf der Platine. Die 0. Bahn in der Zeichnung entspricht dabei der 8. Bahn von oben auf der Platine. So haben Sie genügend Spielraum, um die Platine mit den Schraubchen an den Holzleisten zu befestigen. Die Holzleisten kleben Sie mit ein paar Tropfen Patex auf den Boden der Ferrero Rocher Dose. Als Anschlüsse für die Betriebsspannung, die LEDs und den Ohrhörerausgang dienen Telefonbuchsen, die man im Deckel des Gehäuses verschraubt. Bohren Sie dazu mit einem Holzbohrer sechs 8mm-Löcher in den Deckel. Am besten ordnen Sie die Buchsen paarweise an. Eine schwarze Buchse bildet den Minuspol der Betriebsspannung, die zweite die Kathode der LED. Eine rote wird mit dem Pluspol für die Betriebsspannung der Platine, die zweite mit der Anode der LED verbunden. Über die gelben Buchsen wird das Signal des Ohrhörerausganges in die Schaltung eingespeist. Die Leuchtdioden werden wie der Fototransistor der Empfängerschaltung in einen Gummistopfen mit zwei Kupplungen, einer roten für die Anode und einer schwarzen für die Kathode der LED, eingebaut, damit man sie mit einer Klemme an einem Stativ befestigen kann. Eine genaue Anleitung finden Sie weiter unten bei der Empfängerschaltung.

Das Kabel für den Ohrhörerausgang stellen Sie wie folgt her. Entfernen Sie zunächst am dreidringigen Kabel an einer Seite die äußere Isolierung auf einer Länge von 5cm, auf der anderen Seite auf einer Länge von 2cm. Anschließend isolieren Sie die einzelnen Adern an beiden Seiten auf einer Länge von 0,5cm ab. Am am wenigsten abisolierten Ende des Kabels befestigen Sie den Klinkenstecker, an der anderen Seite zwei rote und eine schwarze Telefonbuchse. Die schwarze Buchse sollte dabei mit der Masse des Klinkensteckers verbunden sein, die roten bei einem Stereo-Ohrhörerausgang mit je einem Kanal. Sollte es sich um einen Monoausgang handeln, so lassen Sie ein Kabel frei. Bei einem Stereoausgang stecken Sie die roten Bananenstecker aufeinander, da das Lichtradio nur Monosignale überträgt. Damit ist das Anschlusskabel für den Radioausgang fertig.

Die Lichtempfängerschaltung ist ganz einfach konzipiert. Abb. 3 zeigt den erforderlichen Aufbau. Man benötigt zunächst ein lichtempfindliches Bauteil. Am besten eignet sich ein Fototransistor. Fototransistoren besitzen keinen Basisanschluss, so dass die Basisbeschaltung entfällt. Sie werden bei Lichteinfall automatisch leitend, ähnlich wie eine Solarzelle und zwar umso besser, je mehr Licht einfällt. Man muss lediglich einen Kollektorarbeitswiderstand einbauen. Für den hier verwendeten Fototransistor BPW 40 sind dafür 10k $\Omega$  typisch. Er ist außerdem im infraroten und im sichtbaren Bereich empfindlich. Mit dem Kondensator wird die am Transistor durch die Betriebsspannung zusätzlich entstehende Gleichspannung ausgekoppelt, denn der nachgeschaltete NF-Verstärker soll ja nur die niederfrequenten Signalspannungen verstärken. Sein Eingang könnte durch den Gleichstrom sogar zerstört werden. Um dem Eingang des Verstärkers einen festen Eingangswiderstand zu bieten, wurde zu seinem Eingang zusätzlich ein zweiter Widerstand parallel geschaltet. Der Verstärker arbeitet

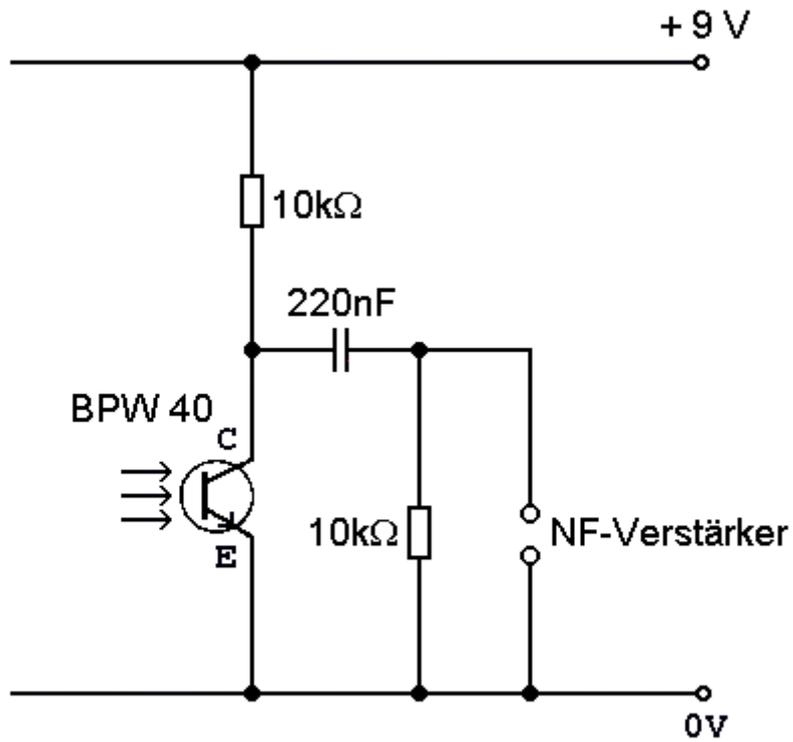


Abb. 3: Schaltplan Empfänger

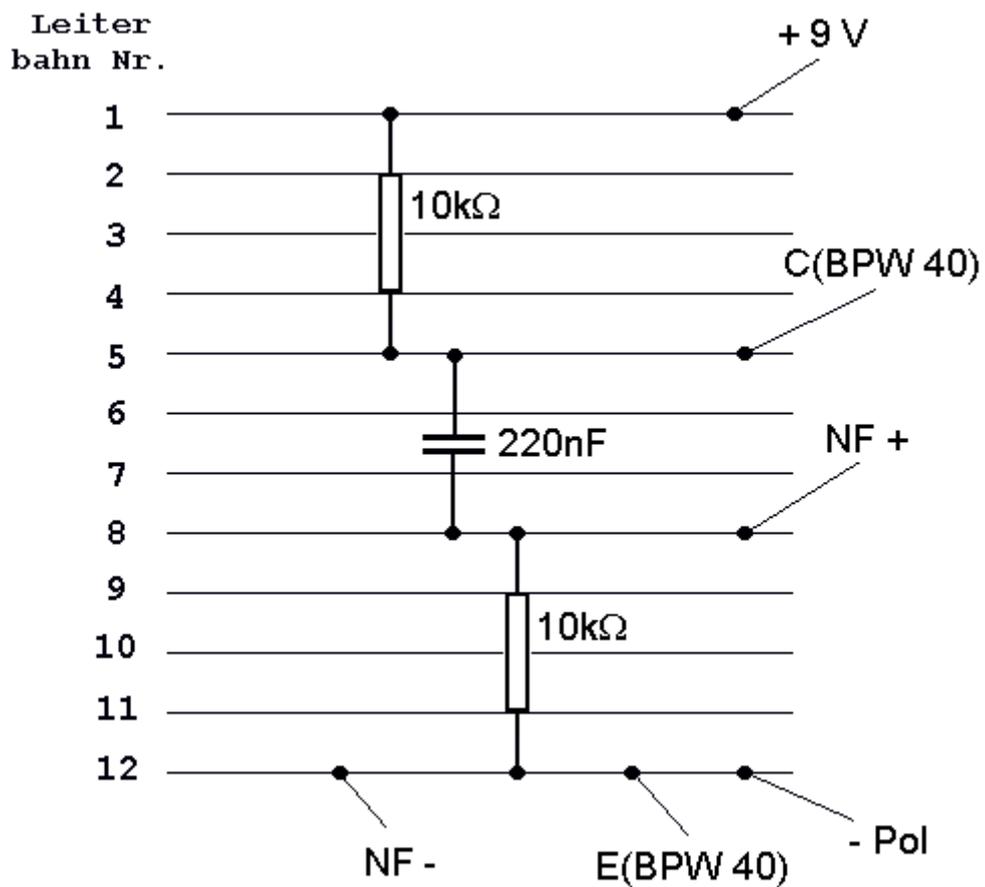


Abb. 4: Platine Empfänger

dann wesentlich stabiler. Er ist aber nicht unbedingt erforderlich. Den NF-Verstärker kann man sich selbst zusammenlöten. Eine entsprechende Bastelanleitung findet man z. B. in einem Elektronikbuch von Jean Pütz<sup>1)</sup>. Aber auch in jedem Elektronikatalog werden preiswerte Bausätze für einfache Mono-NF-Verstärker mit einer Leistung von einigen Watt angeboten. Sie kosten meist unter 10 €.

Für den Aufbau der Empfängerschaltung benötigt man folgende Bauteile:

**Transistor:**

1 Fototransistor BPW 40

**Kondensator:**

1 220 nF

**Widerstände:**

2 10 k $\Omega$  0,25 W

**Steckverbinder:**

1 Kupplung schwarz 4mm  
1 Kupplung rot 4mm  
2 Telefonbuchsen schwarz  
2 Telefonbuchsen rot  
2 Telefonbuchsen gelb

**sonstiges Zubehör:**

1 Lochrasterplatine RM 2,54 mm 5cmx7cm  
1 Filmdöschen  
1 Gummistopfen  $\varnothing$  3cm  
2 Holzleisten 1cmx1cmx7cm  
4 Holzschraubchen  
Schaltlitze  
Lötzinn  
Isolierband  
1 Ferrero Rocher oder Mon Chéri Döschen

**zusätzliche Geräte:**

1 Netzgerät stabilisiert 9V  
1 NF-Verstärker  
1 Lautsprecher 4/8 $\Omega$ , passend zum NF-Verstärker  
1 Stativ zum Halten des Fototransistors

Die Kosten belaufen sich ohne Netzgerät, Verstärker, Lautsprecher und Stativ auf 5-10 €. In vielen Physiksammlungen sind die Zusatzgeräte sowieso vorhanden. Aus diesen Bauteilen lässt sich der Empfänger wie folgt zusammenbauen.

Bohren Sie als erstes zwei kleine Löcher in den Gummistopfen. Am besten eignet sich dazu ein spezieller Bohrer für Stopfen, wie er in vielen Chemiesammlungen vorhanden ist. Auf der

dickeren Seite des Stopfens erweitern Sie die Löcher bis etwa zur Mitte des Stopfens auf ca. 8mm Durchmesser. Dann stecken Sie von der dünneren Seite die Anschlüsse des Fototransistors durch die kleinen Löcher und verschrauben sie auf der anderen Seite des Stopfens mit den Kupplungen. Dabei müssen Sie auf die Polung des Transistors achten. Dreht man ihn um, so dass die Anschlüsse auf einen zu und die abgeflachte Seite am Gehäuse nach links zeigt, so ist der linke Anschluss der Kollektor C und der rechte folglich der Emitter E. C muss nun an der roten Kupplung, E an der schwarzen befestigt werden. Danach drücken Sie vorsichtig die Kupplungen in die erweiterten Löcher auf der dickeren Seite des Stopfens, so dass sie fest im Stopfen sitzen. Danach schneiden Sie mit einem scharfen Messer den Boden des Filmdöschens ab und stülpen es über den Stopfen auf der Seite, auf der sich der Fototransistor befindet. Es schützt den Fototransistor vor Streulicht aus der Umgebung.

Als nächstes schneiden Sie sich die Platine auf eine Größe von 5cmx7cm zurecht. Dann verlöten Sie die wenigen Bauteile gemäß der Abb. 4 auf der Platine. Dabei entspricht die 1. Bahn in der Zeichnung der 5. Bahn von oben auf der Platine. Denken Sie dabei auch an die Litzen für die einzelnen Anschlüsse. Eine Länge von 10cm sollte für sie ausreichend sein. Schrauben Sie die fertige Platine an den Holzleisten fest und kleben Sie die Holzleisten samt der Platine auf den Boden der Ferrero Rocher Dose. Danach müssen Sie den Deckel der Dose bearbeiten. Bohren Sie mit einem Holzbohrer vorsichtig sechs 8mm-Löcher in den Deckel. Ordnen Sie die Löcher jeweils paarweise an und zwar an einer Stelle des Deckels, der nach dem Zusammenbau der Dose nicht über der Platine liegt. Sonst könnte es Platzprobleme geben. Im ersten Lochpaar verschrauben Sie eine schwarze und eine rote Telefonbuchse, im nächsten ebenfalls und im letzten die beiden gelben. Die 1. schwarze Buchse verbinden sie über die entsprechende Schalllitze mit dem Minuspol der Platine (s. Abb. 4), die rote mit dem Pluspol, die 2. schwarze mit dem Emitteranschluss des Fototransistors und die 2. rote mit dem Kollektoranschluss und die gelben mit den NF-Anschlüssen der Platine. Dabei ist es hilfreich, zunächst je eine kleine Öse aus Kupferdraht an den Buchsen zu verschrauben und an diese Ösen dann die Litzen zu löten. Das geht meist einfacher. Die Dose können Sie verschließen und mit einem Streifen Isolierband zukleben. Damit ist auch der Empfänger einsatzbereit. Mit den Schaltungen lassen sich einige interessante Versuche anstellen. Dabei kann man sowohl die LED mit sichtbarem Licht als auch die IR-LED verwenden. Die LED, die sichtbares Licht aussendet, macht es möglich, die Helligkeitsschwankungen mit bloßem Auge zu beobachten. Man benötigt in beiden Fällen den Versuchsaufbau in Abb.5.

### **Versuch 1:**

#### **Durchführung:**

Man baut zunächst den kompletten Versuch nach Abb.5 auf. Dann schaltet man den Empfänger und den NF-Verstärker ein. Man variiert die Lautstärke am Verstärker.

#### **Beobachtung:**

Wenn alles richtig angeschlossen ist, hört man im Lautsprecher ein Rauschen.

#### **Erklärung:**

Das Rauschen wird durch die Bauteile verursacht. Es handelt sich um das typische thermische Rauschen elektronischer Bauteile.

### **Versuch 2:**

#### **Durchführung:**

Man schaltet die Zimmerbeleuchtung ein. Dann hält man den Fototransistor in Richtung Deckenbeleuchtung.

**Beobachtung:**

Aus dem Lautsprecher ertönt ein mehr oder weniger lautes Brummen. Es ist um so lauter, je näher man der Deckenbeleuchtung kommt.

**Erklärung:**

Die Lampen an der Decke werden mit Wechselstrom der Frequenz 50 Hz betrieben. Daher treten in den Lampen Intensitätsschwankungen des Lichtes von 100 Hz auf. Für die Intensität ist nämlich die Richtung des Stromes nicht von Bedeutung. Diese Schwankungen nimmt der Fototransistor wahr. Sie werden im Verstärker verstärkt und im Lautsprecher hörbar gemacht.

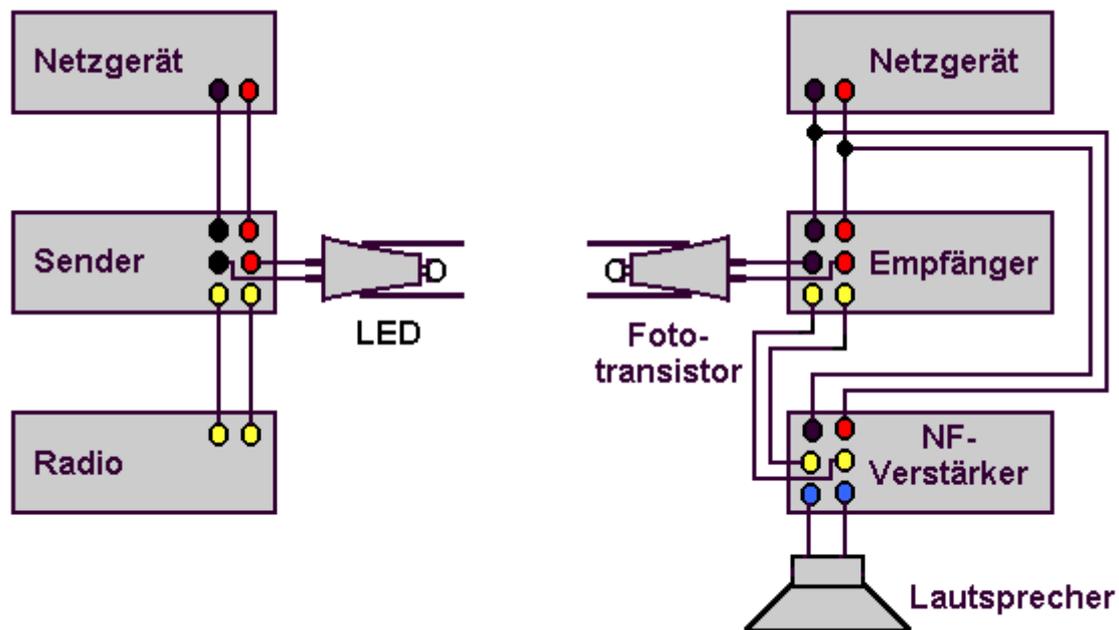


Abb.5: Versuchsaufbau

**Versuch 3:****Durchführung:**

Man verdunkelt den Raum. Dann schaltet man auch den Sender und das Radio ein und stellt die LED in einer Entfernung von 1-2m vom Fototransistor so auf, dass sie das Filmdöschen auf dem Transistor ausleuchtet.

**Beobachtung:**

Aus dem Lautsprecher hört man leise Musik. Sie ist um so lauter, je näher sich Lampe und Transistor befinden. Die Helligkeit der LED im sichtbaren Bereich schwankt im Takte der Musik.

**Erklärung:**

Die Signale am Ohrhörerausgang des Radios werden durch die Senderschaltung in Intensitätsschwankungen der LED umgesetzt. Diese Schwankungen wandelt der Fototransistor wieder in kleine Wechselspannungen um, die vom NF-Verstärker aufgenommen, verstärkt und im Lautsprecher hörbar gemacht werden. Die Lichtschwankungen kann man bei der LED im sichtbaren Bereich mit bloßem Auge sehen.

#### **Versuch 4:**

##### **Durchführung:**

Man variiert die Lautstärke am Radio.

##### **Beobachtung:**

Die Lautstärke im Lautsprecher ändert sich entsprechend.

##### **Erklärung:**

Die Lichtwellen werden durch die größeren Spannungen am Ohrhörerausgang des Radios stärker moduliert. Die größeren Intensitätsschwankungen des Lichtes werden im Fototransistor in größere Spannungsschwankungen umgewandelt und über den Verstärker an den Lautsprecher weitergereicht. Dass diese Erklärung richtig ist, beweist der folgende Versuch.

#### **Versuch 5:**

##### **Durchführung:**

Man ersetzt den NF-Verstärker in der Empfängerschaltung durch einen Oszillographen. Dann verändert man die Lautstärke am Radio.

##### **Beobachtung:**

Die Amplituden der Wechselspannung am Transistor verändern sich entsprechend.

#### **Versuch 6:**

##### **Durchführung:**

Man stellt zwischen die LED und den Fototransistor eine Sammellinse mit  $f = 20\text{cm}$  und schiebt sie zwischen den beiden hin und her.

##### **Beobachtung:**

Die Musik im Lautsprecher wird lauter und wieder leiser. Bei einer bestimmten Stelle der Linse ist sie besonders laut.

##### **Erklärung:**

Die Linse bündelt das Licht in den Fototransistor. Dadurch werden die Intensitätsschwankungen des Lichtes größer und damit die entstehenden Wechselspannungen. Daher steigt die Lautstärke.

#### **Versuch 7:**

##### **Durchführung:**

Man hält zwischen LED und Fototransistor in Abb. 5 ein Stück Pappe.

##### **Beobachtung:**

Die Musik im Lautsprecher verstummt augenblicklich.

##### **Erklärung:**

Pappe ist lichtundurchlässig. Daher können die modulierten Lichtwellen sie nicht durchdringen.

#### **Versuch 8:**

##### **Durchführung:**

Man entfernt den Sender in Abb. 5 und richtet aus 2 – 3m Entfernung die Fernbedienung eines DVD-Players oder Fernsehers auf den Empfänger.

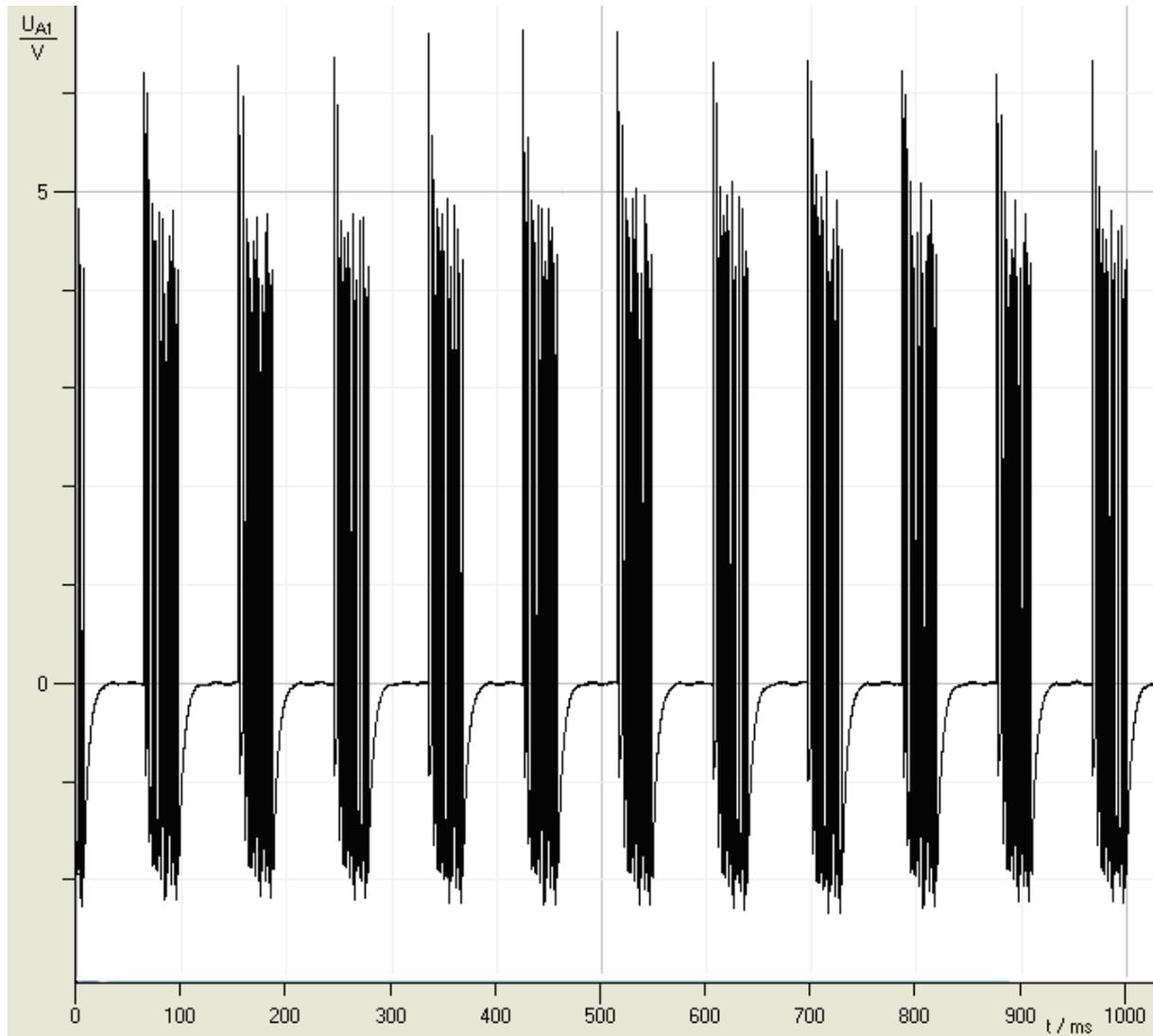
##### **Beobachtung:**

Aus dem Lautsprecher ertönen Knattergeräusche, die bei mancher Fernbedienung wie Maschinengewehrfeuer klingen.

## Versuch 9:

### **Durchführung:**

Man ersetzt in Abb. 5 den NF-Verstärker und den Lautsprecher durch einen Oszillographen oder ein Messwerterfassungssystem, wie z.B. Cassy von Leybold, und wiederholt Versuch 8. Dabei drückt man nacheinander verschiedene Tasten.



**Abb.6: Wiederholfrequenz des Signals einer Fernbedienung**

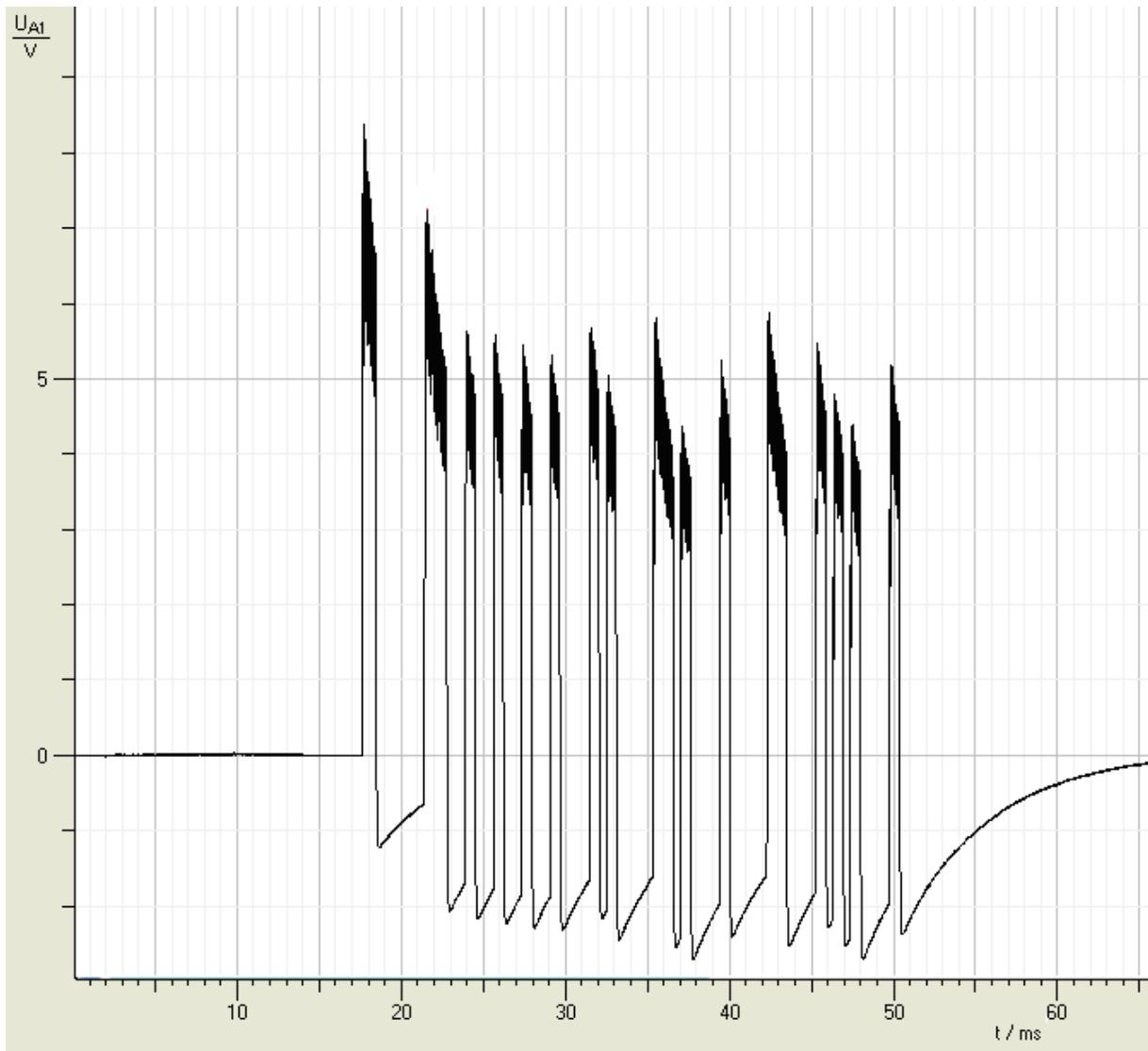
### **Beobachtung:**

Man erhält die Kurven in den Abbildungen 6 – 8. Auf dem Oszillographen beobachtet man eine Abfolge von kurzen und langen rechteckförmigen Impulsen. Die langen Signale dauern je nach Fernbedienung ungefähr  $T_1 = 1,44$  ms, die kurzen etwa  $T_2 = 0,72$  ms. Die Lücken zwischen den Impulsen sind genau so lang. Jedes kurze Signal besteht seinerseits wiederum aus etwa 25 Rechtecksignalen mit  $T_3 = 30$   $\mu$ s, jedes lange aus knapp 50 solcher Rechteckimpulse. Die Abfolge der langen und kurzen Impulse ändert sich je nach gedrückter Taste. Jede Impulsfolge ist 34 ms lang und wiederholt sich 11 mal pro s.

### **Erklärung:**

Fernbedienungen senden eine Folge langer und kurzer Rechtecksignale im infraroten Wellenlängenbereich aus. Ihre Abfolge stellt eine Art Strichcode für die gedrückte Taste dar. Die

gemessenen Impulsfolgen entsprechen aufgrund ihrer zeitlichen Länge Frequenzen im Hörbereich und verursachen damit das Knattern im Lautsprecher. Verschiedene Fernbedienungen hören sich dabei unterschiedlich an. Die zeitliche Länge der Impulse hängt nämlich von der verwendeten Fernbedienung ab.



**Abb.7: Folge langer und kurzer Impulse der Fernbedienung**

### **Versuch 10:**

#### **Durchführung:**

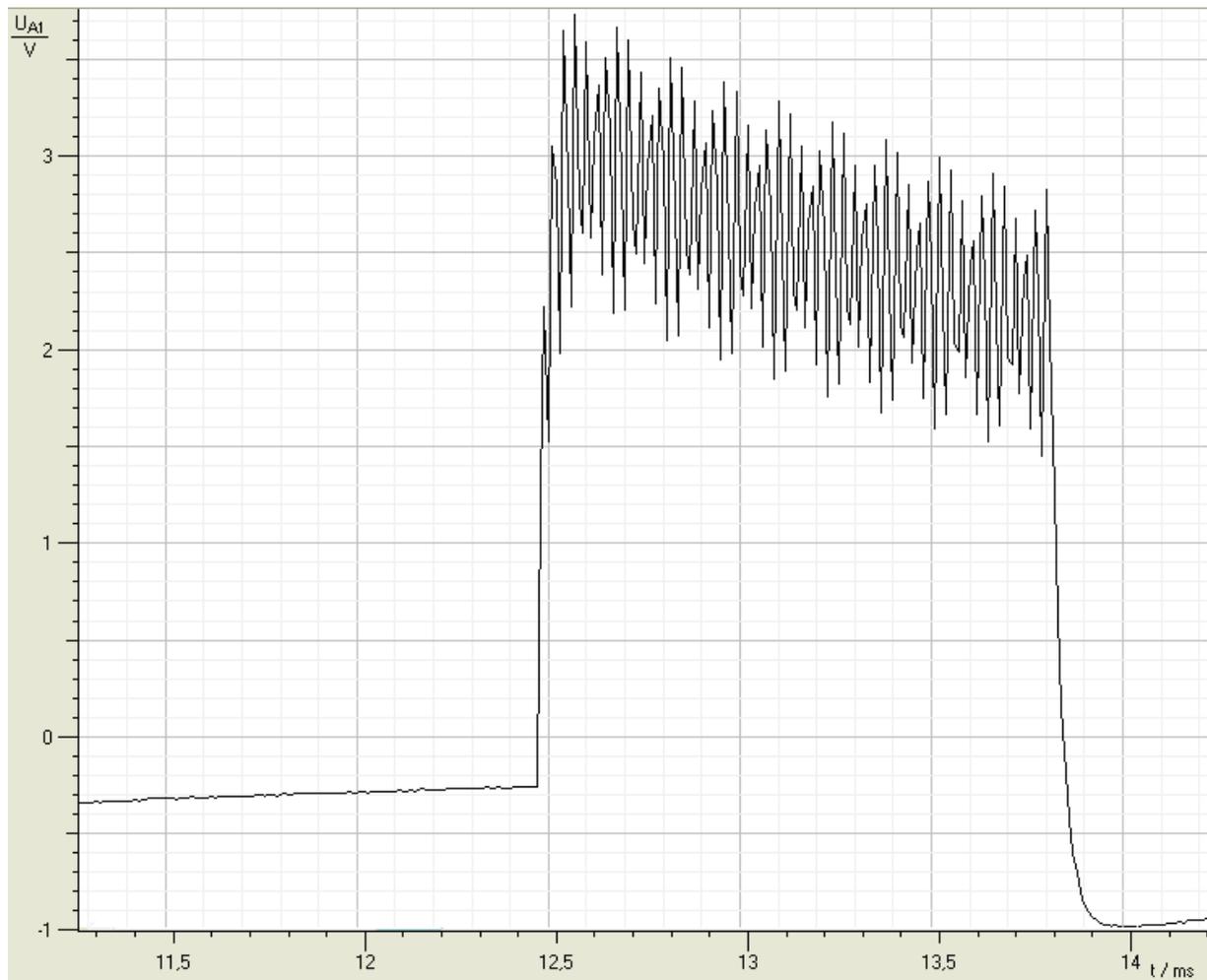
Man hält vor die Senderdiode der Fernbedienung eine Hand, eine Glasplatte, ein Metallblech oder ein Stück Papier.

#### **Beobachtung:**

Das Knattern verstummt bei der Hand, dem Metallblech und dem Stück Papier. Bei der Glasplatte wird es lediglich etwas leiser.

#### **Folgerung:**

Das Infrarotlicht kann Fleisch, Metall und Papier nicht durchdringen, während es von Glas lediglich etwas geschwächt wird. Das verwendete Infrarot muss also nahes Infrarot sein, da seine Durchdringungseigenschaften mit denen des sichtbaren Lichtes identisch sind, während fernes Infrarot durch Glas stark absorbiert wird.



**Abb.8: langer Impuls der Fernbedienung**

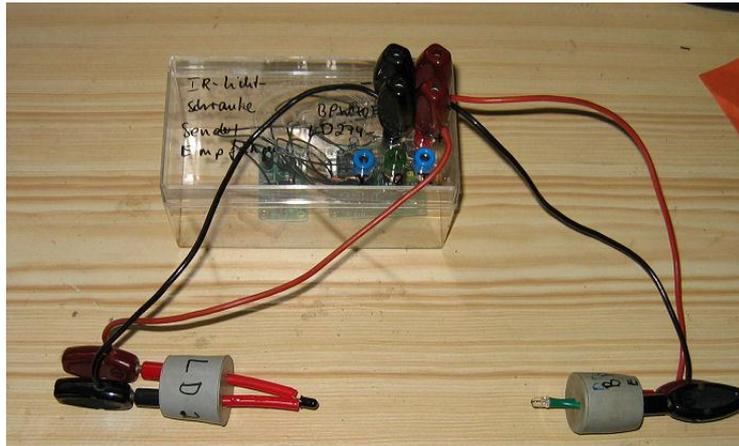
### **Folgerungen:**

Aus allen Versuchen zusammen kann man folgende Schlüsse ziehen:

- 1) Licht lässt sich genauso modulieren wie die anderen elektromagnetischen Wellen. Technisch gesehen ist die Modulation des Lichtes sogar sehr viel einfacher zu realisieren als die der anderen EM-Wellen. Man braucht nämlich keine recht aufwändige Elektronik, um die hochfrequenten Trägerschwingungen zu erzeugen. Spezielle Schwingkreise entfallen.
- 2) Die Signale können sowohl elektronisch als auch optisch verstärkt werden.
- 3) Der Transport von Informationen via Licht ist allerdings sehr störanfällig gegen äußere Einflüsse, vor allem gegen künstliche Lichtquellen. Daher ist eine störungsfreie Übertragung nur in abgeschirmten Lichtleitern oder in lichtdichten Apparaturen möglich. Außerdem können Lichtwellen verschiedene Materialien nicht durchdringen im Gegensatz zu ihren Verwandten im Radio- oder Fernsehwellenbereich.

Eine IR-Lichtschranke arbeitet fast nach dem gleichen Prinzip wie eine Fernbedienung. In einem Modulator wird das Licht einer IR-LED mit einem Rechteckimpuls moduliert, der mit einem Timer der Reihe 555 gewonnen wird. Der Empfänger nimmt die gepulste Strahlung und alle anderen IR-Strahlen über einen Fotowiderstand auf. Er filtert mit einem Operationsverstärker und einigen passiven Bauteilen das Modulationssignal mit einer Frequenz von ca. 7kHz heraus, richtet das Signal gleich, demoduliert es und summiert es über mehrere Perio-

den an einem Kondensator auf. Dessen Spannung steuert die Basis eines Transistors und schaltet ihn mit einer gewissen Verzögerung durch bzw. beim Ausbleiben des Signals ab. Der Transistor regelt den Schaltzustand eines Relais oder ruft an einem Zähler einen Zählimpuls hervor. Dieser Schaltungsaufbau hat mehrere Vorteile. Den Empfänger lassen die allgegenwärtigen IR-Strahlen beliebiger Frequenzen kalt. Außerdem ist IR-Licht für das menschliche Auge unsichtbar und kann daher optimal in Alarmanlagen und beim Objektschutz eingesetzt werden. Die Anlage bleibt ungebetenen Besuchern verborgen. Einen Bausatz aus einem Empfänger und einem Sender erhält man bei [Conrad-Electronic](http://www.conrad-electronic.com). Abb. 9 zeigt die fertig aufgebaute Schaltung, untergebracht in einer Ferrero-Rocher-Dose.



**Abb.9: IR-Lichtschranke**

Die IR-LED LD 274 (im Bild links) baut man wie beim Lichtsender mit zwei Kupplungen in einen Gummistopfen ein, damit man sie variabel einsetzen kann. Im Empfänger wird der gleiche Fototransistor BPW 40 (im Bild rechts) wie in allen Schaltungen dieses Kapitels benutzt, weil er auch im infraroten Bereich sehr empfindlich ist. Mit der IR-Lichtschranke kann man die gleichen Versuche durchführen, die in Kapitel 3.2.1 für den Dämmerungsschalter ausführlich beschrieben sind. Die Schaltimpulse werden ausgelöst, indem man den IR-Strahl zwischen der LED und dem Fototransistor mit der Hand kurz unterbricht.

## 3.3 Solarzellen

### 3.3.1 Versuche

Für eine Solarbatterie befestigt man vier oder mehr gekapselte Solarzellen auf einer Sperrholzplatte bzw. Pertinaxplatte. Ihre Größe richtet sich nach der Größe der Solarzellen. Die Holzplatte nagelt man an den Kopfseiten und in der Mitte auf drei Holzlatten der Dicke 2cmx2,8cm. Als Seitenteile dienen 3cm breite Streifen aus Sperrholz oder Pertinax. Die Pole der Solarzellen bestehen aus Messingstreifen, die am Plastikgehäuse verschraubt sind. Diese Schrauben kann man benutzen, um die Solarzellen auf der Sperrholzplatte zu befestigen. An die Messingplättchen lötet man jeweils ein Stück Schalllitze. Für jede Solarzelle verschraubt man an der Holzplatte eine schwarze Telefonbuchse für den Minuspol der Zelle und eine rote für den Pluspol. Sie werden über die Schalllitzen mit den Polen der Solarzelle verbunden. Die fertige Solarbatterie sieht wie in Abb.1 aus.

Für die folgenden Versuche benutzt man den Batterietester aus dem Artikel „Zwei empfindliche Anzeigelämpchen für die Elektrochemie.“



Vorderseite

Rückseite

Abb.1: fertige Solarbatterie

#### **Versuch 1:**

##### **Durchführung:**

Man schließt an den Motor und die LED eine der vier Solarzellen an und beleuchtet sie mit einer Schreibtischlampe oder hält sie in die Sonne. Dabei beachtet man die Polung der LED.

##### **Beobachtung:**

Der Motor läuft, wenn auch langsam, die LED leuchtet nicht.

##### **Erklärung:**

Solarzellen liefern nur eine Spannung von 0,4 bis 0,5 V. Das reicht für den Motor, nicht aber für die LED. Zum Beweis ersetzt man den Motor bzw. die LED durch ein Voltmeter.

### **Versuch 2:**

#### **Durchführung:**

Man schließt drei bzw. vier Solarzellen in Reihe, wobei man den Minuspol einer Solarzelle mit dem Pluspol der nachfolgenden verbindet. Der freie Minuspol wird mit dem Minuspol der LED, der freie Pluspol mit dem Pluspol der LED verbunden.

#### **Beobachtung:**

Die LED leuchtet bei vier Zellen hell auf, bei dreien leuchtet sie nicht.

#### **Erklärung:**

Drei Zellen liefern eine Spannung von 1,2 bis 1,5 V, vier zwischen 1,6 und 2 V. Nur im zweiten Falle ist sie also hoch genug, um die LED zum Leuchten zu bringen. Zur Kontrolle überprüft man die Spannung der Solarbatterie aus ein, zwei, drei bzw. Zellen mit einem Voltmeter. Die Spannungen addieren sich.

### **Versuch 3:**

#### **Durchführung:**

Man schaltet mehrere Solarzellen parallel, indem man die Minuspole jeweils miteinander verbindet, ebenso die Pluspole. An diese Batterie schließt man den Motor bzw. die LED an.

#### **Beobachtung:**

Die LED leuchtet nicht, der Motor läuft schneller als in Versuch 1.

#### **Erklärung:**

Bei der Parallelschaltung von Batterien bleibt die Spannung gleich, der abnehmbare Strom steigt. Mit 0,4 bis 0,5 V ist die Spannung für die LED also zu gering, der höhere Strom lässt den Motor schneller laufen. Zur Überprüfung ersetzt man den Motor durch ein Amperemeter. Man bestimmt so den Kurzschlussstrom der Solarbatterie mit ein, zwei, drei und vier Zellen. Die Stromstärken der einzelnen Zellen addieren sich.

### **Versuch 4:**

#### **Durchführung:**

Man verringert bei Versuch 1 oder 2 den Abstand zwischen der Solarbatterie und der Schreibtischlampe.

#### **Beobachtung:**

Der Motor läuft langsamer, die LED leuchtet weniger hell.

#### **Erklärung:**

Die von einer Solarzelle gelieferte Leistung hängt stark von der Beleuchtungsstärke ab und die sinkt mit steigendem Abstand, da sich das Licht dann auf eine größere Fläche verteilt.

## **3.3.2 Eigenschaften**

### **Versuch 1:**

#### **Durchführung:**

Man belastet eine ungekapselte, monokristalline Solarzelle der Fläche  $A = 7,2\text{cm}^2$  mit einem Trimpoti von  $100\Omega$  und misst für verschiedene Widerstandswerte die zugehörigen Spannungen und Stromstärken. Man wiederholt den Versuch mit einer fast leeren Mignonzelle und einem Trimpoti von  $1\text{k}\Omega$ . Die benötigte Schaltung zeigt Abb.1.

Die Solarzelle wird dabei mit einer 40W-Lampe oder einer 7W-LED-Lampe aus einer Entfernung von 10-15cm beleuchtet. Aus den erhaltenen Werten berechnet man einerseits den Widerstand und andererseits die Leistung der Solarzelle mit den bekannten Formeln:

$$R = \frac{U}{I}$$

und

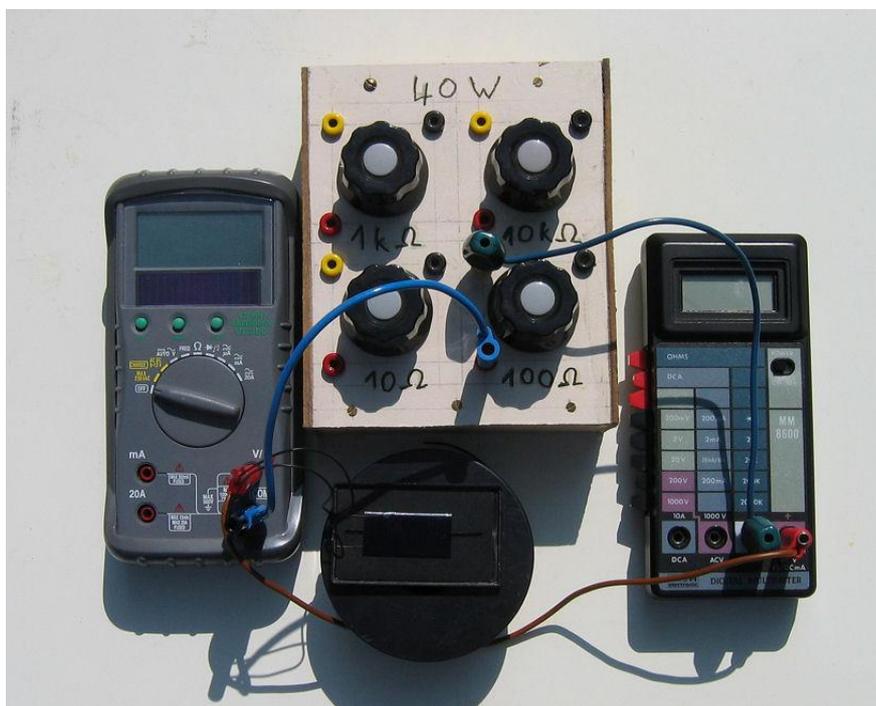
$$P = U * I$$

**Beobachtung:**

Für die Solarzelle ergibt sich Tabelle 1, für die Mignonzelle Tabelle 2.

**Auswertung:**

Wertet man diese Tabellen aus, so erhält man die Kennlinien in den Abbildungen 2-5.



**Abb.1: Versuchsaufbau**

Die U/I-Kennlinie der Solarzelle (Abb.2) verläuft nicht linear wie bei der normalen Batterie (s. Abb.4). Daraus kann man den Schluss ziehen, dass der Innenwiderstand der Solarzelle nicht konstant ist, denn bei einer Batterie gilt nach Abb.4 folgender linearer Zusammenhang zwischen der Klemmenspannung U und der Stromstärke I:

$$U = U_0 - R_i * I$$

oder mit Hilfe der Definition des Widerstandes

$$R * I = U_0 - R_i * I \quad (1).$$

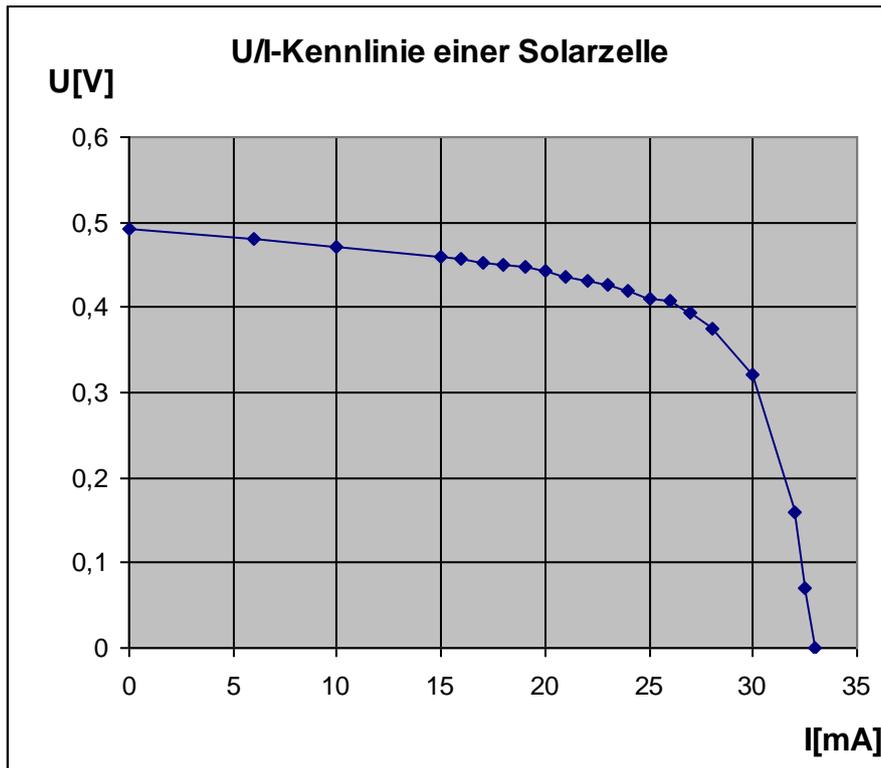
Darin ist  $U_0$  die Spannung im nicht belasteten Zustand und  $R_i$  der Innenwiderstand der Mignonzelle. Im Leistungsmaximum ist ferner der Innenwiderstand der Solarzelle bzw. der Batterie gleich dem Widerstandswert des angeschlossenen Verbrauchers (s. Abb.3 und Abb.5).

I [mA]	U [V]	R [ $\Omega$ ]	P [mW]
0	0,492	-	0
6	0,481	80,2	2,9
8	0,476	59,5	3,8
10	0,472	47,2	3,8
15	0,46	30,7	6,9
16	0,456	28,5	7,3
17	0,453	26,6	7,7
18	0,45	25	8,1
19	0,447	23,5	8,5
20	0,442	22,1	8,8
21	0,437	20,8	9,2
22	0,432	19,6	9,5
23	0,426	18,5	9,8
24	0,42	17,5	10,1
25	0,411	16,4	10,3
26	0,407	15,7	10,6
27	0,393	14,5	10,6
28	0,375	13,4	10,5
30	0,32	10,7	9,6
32	0,16	5	5,1
32,5	0,07	2,2	2,3
33	0	0	0

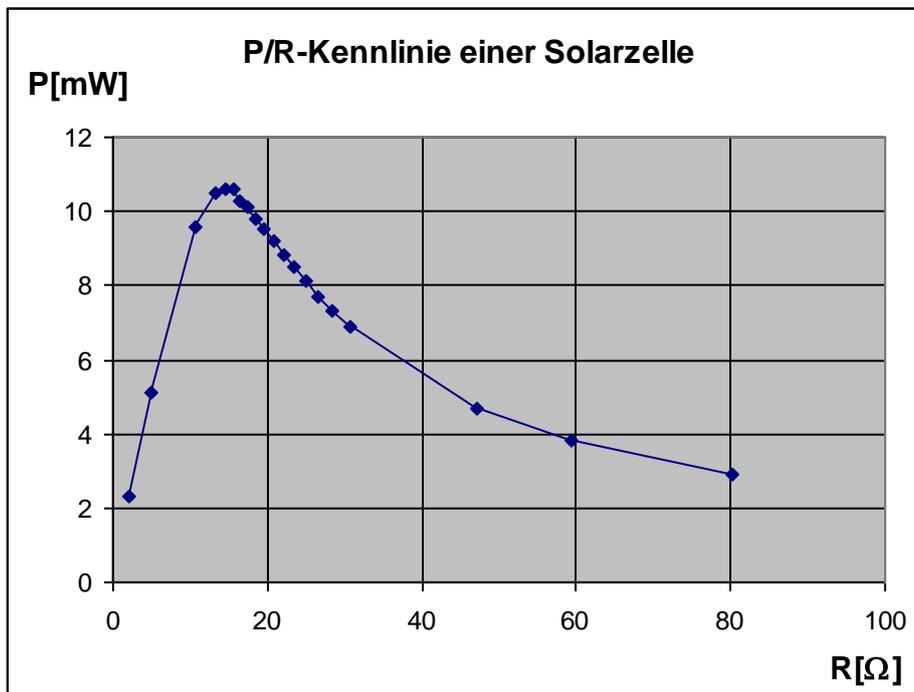
**Tabelle 1: Ergebnisse Solarzelle**

I [mA]	U [V]	R [ $\Omega$ ]	P [mW]
0	1,32	-	0
4	1,21	302	4,8
6	1,16	193	7
9	1,09	121	9,8
12	1	83	12
15	0,92	61,3	13,8
18	0,85	47,2	15,3
21	0,77	36,7	16,2
24	0,7	29,2	16,8
27	0,61	22,6	16,5
30	0,51	17	15,3
35	0,37	10,6	13
40	0,23	5,8	9,2
45	0,1	2,2	4,5
48	0	0	0

**Tabelle 2: Ergebnisse Batterie**



**Abb.2: U/I-Kennlinie einer Solarzelle**



**Abb.3: P/R-Kennlinie einer Solarzelle**

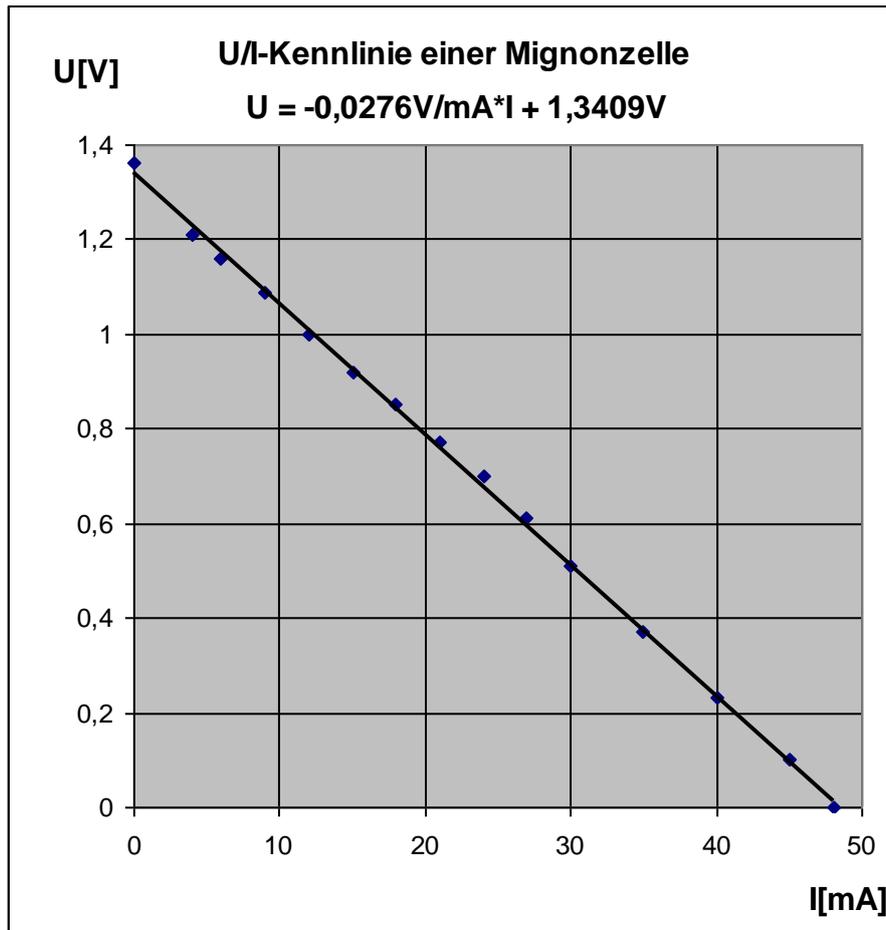


Abb.4: U/I-Kennlinie einer Batterie

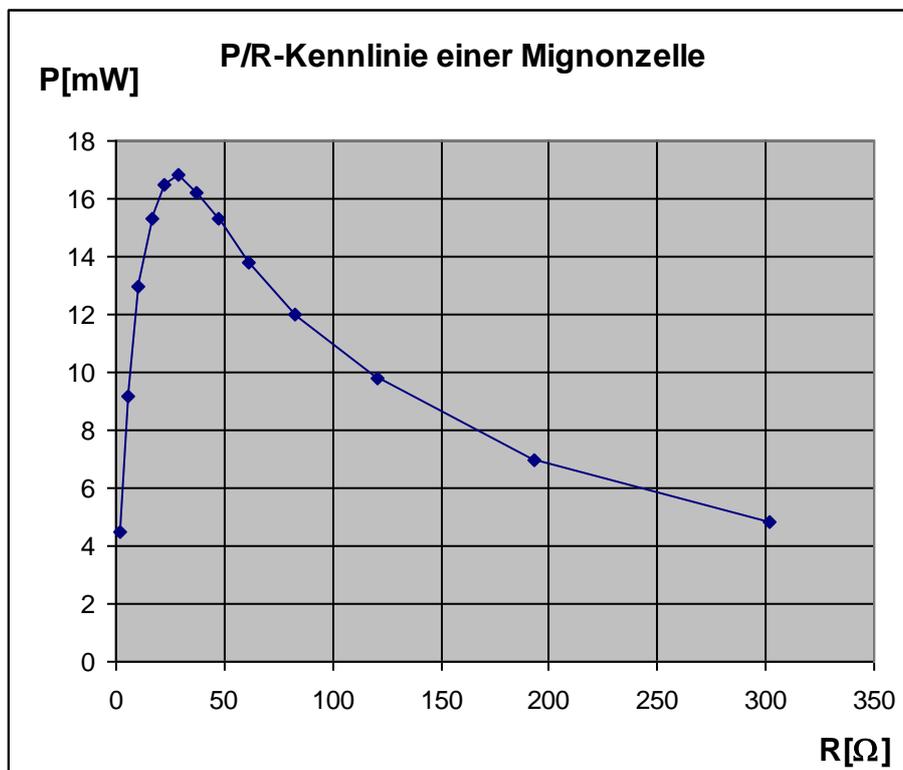


Abb.5: P/R-Kennlinie einer Batterie

Für die lineare U/I-Kennlinie der Batterie kann man diese Überlegung durch eine kleine Rechnung bestätigen. Für die abnehmbare Leistung P gilt:

$$P = U * I = R * I^2 \quad (2)$$

und für die Klemmenspannung U die Gleichung (1). Löst man die Gleichung (1) nach I auf und setzt sie in Gleichung (2) ein, so erhält man

$$P = \frac{R * U_0^2}{(R + R_i)^2} \quad (3).$$

Leitet man diese Gleichung nach R ab, so ergibt sich:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{U_0^2}{(R + R_i)^2} - \frac{2R * U_0^2}{(R + R_i)^3}.$$

Setzt man die Ableitung gleich null und löst nach R auf, so folgt

$$R = R_i.$$

Einsetzen in Gleichung (3) liefert für die maximale abnehmbare Leistung  $P_{max}$

$$P_{max} = \frac{U_0^2}{4R} = \frac{U_0}{2} * \frac{U_0}{2R} = \frac{U_0}{2} * \frac{I_K}{2}.$$

Diese Rechnung gilt nur für die Batterie mit konstantem  $R_i$ , das Ergebnis für R erstaunlicherweise jedoch auch für die Solarzelle mit veränderlichem  $R_i$ . Der Innenwiderstand der Solarzelle bzw. der Batterie lässt sich aber in jedem Fall aus der Leerlaufspannung  $U_0$  und der Kurzschlussstromstärke  $I_K$  ermitteln. Im Kurzschlussfalle wird der Strom nur durch den Innenwiderstand  $R_i$  begrenzt. An ihm fällt dann die gesamte Spannung ab. Es gilt für die Solarzelle

$$R_i = \frac{U_0}{I_K} = \frac{0,492 \text{ V}}{0,033 \text{ A}} = 14,9 \Omega.$$

Aus der P/R-Kennlinie liest man einen Wert von

$$R = 15 \Omega$$

ab, in guter Übereinstimmung mit dem gerechneten Wert. Für die fast leere Batterie gilt nach Abb. 4:

$$R_i = 0,0276 \text{ V/mA} = 27,6 \Omega.$$

Aus der Abb.5 erhält man im Leistungsmaximum

$$R \approx 30 \Omega.$$

### **Versuch 2:**

#### **Durchführung:**

Man bestimmt den Innenwiderstand einer Solarzelle bei vollem Sonnenschein und für eine neue Batterie, in dem man jeweils die Leerlaufspannung und die Kurzschlussstromstärke bestimmt. Dann belastet man beide mit einem Widerstand, der ihrem Innenwiderstand entspricht und misst für diesen Fall die Stromstärke  $I$  und die Klemmenspannung  $U$ .

#### **Beobachtung:**

Für eine neue Batterie erhält man:

$$U_0 = 1,52 \text{ V}$$

$$I_K = 0,8 \text{ A}$$

und im Leistungsmaximum

$$U = 0,77 \text{ V}$$

$$I = 0,39 \text{ A}.$$

Für die voll beleuchtete Solarzelle misst man:

$$U_0 = 0,565 \text{ V}$$

$$I_K = 0,205 \text{ A}$$

und im Leistungsmaximum

$$U = 0,469 \text{ V}$$

$$I = 0,168 \text{ A}.$$

#### **Ergebnis:**

Für den Innenwiderstand der neuen Batterie gilt somit:

$$R_i = 1,9 \Omega.$$

Er ist kleiner als der der fast leeren Batterie. Beim Entladen der Batterie bilden sich Stoffe, die ihre Leitfähigkeit senken. Damit steigt der Innenwiderstand. Die maximale Leistung  $P_{\max}$  der Batterie beträgt:

$$P_{\max} = 0,77 \text{ V} * 0,39 \text{ A} = 0,3 \text{ W}$$

Für die Solarzelle erhält man:

$$R_i = \frac{0,565 \text{ V}}{0,205 \text{ A}} = 2,76 \Omega$$

und

$$P_{max} = 0,469 \text{ V} * 0,168 \text{ A} = 0,0788 \text{ W} = 78,8 \text{ mW}.$$

Vier Solarzellen liefern damit in etwa die gleiche Leistung wie eine Mignonzelle. Ferner sinkt bei Solarzellen der Innenwiderstand mit steigender Bestrahlungsstärke, da die Zahl der freien Ladungsträger zunimmt und damit ihre Leitfähigkeit. Bei einer Lichtstärke  $S$  der Sonne bei senkrechtem Einfall von

$$S = 1 \text{ kW/m}^2$$

gilt für die auf die Solarzelle eingestrahlte Leistung  $P$  bei einer Fläche  $A$  der Solarzelle von

$$A = 7,2 \text{ cm}^2$$

$$P = A * S = 0,00072 \text{ m}^2 * 1000 \text{ W/m}^2 = 0,72 \text{ W}.$$

Damit hat die Solarzelle einen Wirkungsgrad  $\eta$  von

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{max}}{P} * 100 \% \\ &= \frac{78,8 \text{ mW}}{720 \text{ mW}} * 100 \% \\ &= 10,9 \%. \end{aligned}$$

Dabei bleibt die Unsicherheit, ob die Lichtstärke der Sonne bei der Messung tatsächlich ihren optimalen Wert erreicht hat. Moderne monokristalline Doppelschichtsolarmodule, die das Streulicht des Daches und der Umgebung auf ihrer Rückseite zusätzlich ausnutzen, haben laut Herstellerangaben bei direkter Sonneneinstrahlung einen Wirkungsgrad bis ca. 21,5 % und bei diffusem Streulicht bis ca. 17,5 %<sup>12)</sup>. Der gemessene Wert liegt deutlich darunter, weil es sich bei der Messzelle um ein älteres Modell gehandelt hat. Die Werte der Hersteller beziehen sich auf eine Temperatur von 25°C. Der Wirkungsgrad sinkt linear mit der Temperatur. Wenn die Sonne im Sommer optimal scheint, heizen sich die Zellen bei Vollast auf 50° - 70°C auf. Ihre so genannte Nennleistung ist dann um 10 - 20% geringer als die maximal mögliche. Im Winter steigt sie bei 0°C etwa um diesen Prozentanteil. Heute rechnet man in der Mitte Deutschlands im Jahr bei einschichtigen Solarmodulen mit einem Energieertrag von ca. 145 kWh/m<sup>2</sup>, bei Doppelschichtmodulen mit ca. 180 kWh/m<sup>2</sup>, wobei er starken jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. In den Sommermonaten ist er 8 - 10mal höher als in den Wintermonaten.<sup>2),8)</sup> Das macht die ganze Problematik der Stromversorgung mit Solarzellen deutlich. Man benötigt übers ganze Jahr kontinuierlich elektrische Energie in etwa der gleichen Menge, aber die Solarzellen liefern sie nur unregelmäßig. Außerdem kann man

elektrische Energie nicht oder nur mit großem Aufwand speichern, in dem man sie in andere Energieformen, z.B. chemische oder potentielle Energie umwandelt und bei Bedarf wieder in elektrische Energie zurückverwandelt. Beide Vorgänge sind mit Energieverlusten behaftet. Es müssten auf jeden Fall zusätzliche Pumpspeicherkraftwerke, riesige Akkuspeicher oder nicht ungefährliche Wasserstoffspeicher gebaut werden. In diesem Punkt ist uns die Natur meilenweit voraus. Sie speichert überschüssige Sonnenenergie im Sommer in Biomasse, die uns im Winter und in der Nacht als Energiereserve zur Verfügung steht. Über Jahrmillionen hat sie ungeheure Mengen an Energie in Form fossiler Brennstoffe an Land und im Meer gelagert, die wir jederzeit nutzen können. Man kann ein Kohle- oder Erdgaskraftwerk, die dauerhaft Strom liefern, nicht einfach durch einen Solar- oder Windpark ersetzen, die nur zu gewissen Zeiten Strom erzeugen.

Bei einem Bedarf an elektrischer Energie im Haushalt von 1700 kWh pro Person und Jahr<sup>9)</sup> benötigt man bei Einschichtmodulen rein theoretisch eine Solarfläche von 11,7 m<sup>2</sup>, bei Doppelschichtmodulen von 9,4 m<sup>2</sup>. Die Anschaffungskosten für eine Photovoltaikanlage belaufen sich bei einer Betriebsdauer von 30 Jahren auf 7,7 Cent/kWh, sind also deutlich geringer als der Preis, den man für den vom E-Werk gelieferten Strom bezahlt. Zurzeit vergüten die Kraftwerke dem privaten Erzeuger des Solarstromes nur 6 Cent/kWh, weniger als die Anschaffungskosten. Betreiber älterer Photovoltaikanlagen erhalten noch bis zu sage und schreibe 44 Cent/kWh. Heute lohnt sich eine PV-Anlage nur, wenn man sie mit einem Lithiumionenakku kombiniert, um möglichst viel des produzierten Stromes selbst nutzen zu können. Damit kann man seinen Eigenbedarf an Strom im Laufe eines Jahres bis zu 75 % selbst decken, ohne Speicher nur bis zu 30 %. Den restlichen Strom muss man aus dem Netz beziehen zum öffentlichen Stromtarif. Solche Speicher sind mit rund 900 €/kWh<sup>12)</sup> gespeicherter Energie allerdings keineswegs billig und haben nur eine begrenzte Ladekapazität von bis zu 10 kWh. Sie reicht gerade aus, um den Strombedarf eines Zweipersonenhaushaltes für einen Tag zu decken. Außerdem sind sie nicht unendlich oft ladbar, bei guten sind 6000 Ladezyklen möglich. Der Akku hält folglich 20 Jahre bei 300 Lade- und Entladezyklen pro Jahr<sup>12)</sup>. Außerdem ist der Energieaufwand für ihre Herstellung sehr hoch.

Wer ein Elektroauto besitzt, kann es über eine Wallbox an seiner Photovoltaikanlage laden. Der Energiebedarf beläuft sich bei einer Jahresfahrleistung von 15000 km auf etwa 2250 kWh. Er erfordert eine Solarzellenfläche von 12,5 m<sup>2</sup> bei Doppelschichtmodulen. Allerdings muss man im Winter den Strom fast vollständig aus dem öffentlichen Netz beziehen.

Eine noch größere Energiemenge benötigt man zum Heizen, nämlich etwa 10000 kWh pro Person und Jahr<sup>9)</sup>. 63% dieser Energie kann man unter günstigen klimatischen Bedingungen mit einer elektrischen Luftwärmepumpe der Umgebung entnehmen, allerdings nicht überall in Deutschland. Die mittlere Jahrestemperatur ist entscheidend. Im Idealfall benötigt man pro Person und Jahr somit weitere 3700 kWh in Form von Strom, in der Praxis eher mehr. Würden alle Privathaushalte auf Wärmepumpen und Elektroautos umsteigen, würde sich der Strombedarf im Privatbereich mehr als vervierfachen. Die zusätzlich benötigte elektrische Energie kann man zum Teil mit Sonnenkollektoren bereitstellen. Dabei ergibt sich eine noch größere jahreszeitliche Problematik. Im Winter braucht man sehr viel Energie zum Heizen, im Sommer dagegen kaum, die Solarzellen und -kollektoren stellen sie aber im konträren Rhythmus zur Verfügung. Auch die so gewonnene Energie lässt sich allenfalls für ein paar Tage in Form von warmem Wasser speichern. Wegen der Vorfälle in Fukushima, der unvorstellbaren Zerstörung der Landschaft durch den Braunkohletageabbau etwa in der Rheinischen Tiefebene und des Klimawandels gibt es dennoch zur Sonnen-, Wind-, Wasser- und Bioenergie wie zu Zeiten unserer Großeltern auf Dauer keine tragfähige Alternative. Wir

werden uns wohl oder übel an höhere Energiekosten gewöhnen müssen und auf bessere Speichermöglichkeiten in Form von Akkus oder Wasserstoffspeichern hoffen. Energie sparen und Energie effizient nutzen hilft jedenfalls immer, schont die Umwelt und den Geldbeutel. Ein schönes Beispiel sind LEDs. Dabei darf es allerdings nicht passieren, dass viele Personen ihre Beleuchtungen ausbauen, nur weil LEDs so sparsam sind. Außerdem müssen SUVs der Vergangenheit angehören, egal ob mit Elektro- oder Verbrennungsmotor. Sie haben auf unseren Straßen nichts zu suchen, auch wenn sie noch so bequem sind. Ebenso muss die Produktion unsinniger Konsumgüter sofort gestoppt werden. Es ist ein Unding, dass massenweise Kleidung hergestellt wird und sofort oder nach einmaligem Tragen auf dem Müll landet. Und ein Wochenendtrip nach New York eben mal zum Shoppen ist absoluter Wahnsinn. Insgesamt ist unser Energiebedarf nach wie vor viel zu hoch. Das ist das Hauptproblem. Und es lässt sich nicht lösen, indem man eine Energieform durch eine andere ersetzt, z. B. chemische Energie in fossilen Brennstoffen oder Kernenergie in Kernbrennstoffen durch elektrische Energie. Es gibt keinen Ökostrom, außer dem, den man nicht produziert. Er ist ein Märchen, ein Etikettenschwindel, um unser Gewissen zu beruhigen und unsere Energieverschwendung zu legitimieren. Er ist allenfalls das kleinere Übel.

Eine fachlich sehr fundierte Analyse der Energieproblematik finden Sie in Bill Gates Buch mit dem Titel „Wie wir die Klimakatastrophe verhindern“<sup>13)</sup>. Nach ihm müssen wir unsere gesamte Energieversorgung auf elektrische Energie umstellen, da genügend nachhaltige Energie in Form von Sonnen-, Wasser-, und Windenergie zur Verfügung steht. Allerdings gibt es noch eine ganze Reihe Probleme zu lösen, vor allem der Energiespeicherung. Als realistische Zeitvorgabe nennt er 2050. Bis dahin können wir auf Atomenergie als „klimafreundliche Energie“ nicht verzichten. Meiner Meinung nach wäre es sinnvoller, Energie zu sparen und effizienter zu nutzen, wo immer es geht, vor allem, wenn man bedenkt, dass ein US-Amerikaner nach Gates Angaben 55mal mehr CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre pustet als ein Afrikaner. Auch wir Europäer stehen nicht viel besser dar. „The American Way of Life“ ist meiner Meinung nach eindeutig der falsche Weg. Ein weiter so kann es nicht geben.

## 4. Literatur

- 1) Hrsg.: Jean Pütz, Experimente Elektronik, vgs-Verlags-gesellschaft, 12. Auflage Köln 1988
- 2) Bo Hanus, Solar-Dachanlagen selbst planen und installieren, Franzis-Verlag GmbH, Poing 2007
- 3) Johannes Krückeberg, Hochleistungs-LEDs in der Praxis, Franzis-Verlag GmbH, Poing 2007
- 4) Bo Hanus, Experimente mit superhellen Leuchtdioden, Franzis-Verlag GmbH, Poing 2008
- 5) Burkhard Kainka, Experimente mit Hochleistungs-LEDs, Franzis-Verlag GmbH, Poing 2007
- 6) Conrad-Elektronik, Produktkatalog 2009, [www.conrad.de](http://www.conrad.de)
- 7) Datenblatt LNK501, erhältlich unter [www.powerint.com](http://www.powerint.com)
- 8) [www.solarnova.de](http://www.solarnova.de)
- 9) Christoph Buchal, Energie, Koelblin-Fortuna-Druck, Baden-Baden 2008
- 10) H. Schwarze, Mit Leuchtdioden zu  $E=h \cdot f$ , Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 1/46 S. 34-36, Köln 1997
- 11) J. Pütz, Einführung in die Elektronik, 20. Auflage, vgs-Verlagsgesellschaft, Köln 1986
- 12) Informationsschrift der Firma prosolartec, Januar 2021
- 13) Bill Gates, Wie wir die Klimakatastrophe verhindern, Piper Verlag, München 2021