

Leuchtdioden

Alfons Reichert



Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Theorie	4
3. Versuche.....	9
4. Anhang	15
5. Literatur.....	20

1. Einleitung

LEDs haben innerhalb weniger Jahre den Markt als Lichtquellen in vielen Lebensbereichen erobert, etwa im Haushalt, in den Fahrzeugen und in der Unterhaltungselektronik. Viele Gründe sprechen dafür. Sie haben inzwischen eine höhere Lichtausbeute als Energiesparlampen und Glühlampen. Weil sie in verschiedenen Farben strahlen können, sind sie auch in der Schulphysik auf dem Vormarsch. Sie können mit ungefährlichen, niedrigen Spannungen betrieben werden und eignen sich daher optimal für Schülerversuche im Optikunterricht wie ich in den Skripten Licht/Schatten, Lichtwellen, Optoelektronik auf dieser Webseite näher erläutere. Die Vorgänge, mit denen in ihnen Licht erzeugt wird, unterscheiden sich sehr von denen in Glühlampen oder Halogenlampen. In ihnen steckt eine Menge klassischer Physik und moderner Quantenphysik. Daher kann man mit verschiedenen farbigen LEDs die Plancksche Konstante, eine elementare physikalische Naturkonstante, sehr viel einfacher und exakter bestimmen als mit dem klassischen Versuch zum Photoeffekt. Die physikalischen Grundlagen und Gesetze sind allerdings komplizierter. Mit dem Ohmschen Gesetz kommt man nicht mehr aus. Man muss sich mit der Funktionsweise einer LED auseinandersetzen, damit der Versuch für die Schülerinnen und Schüler nicht auf der phänomenologischen Ebene stecken bleibt. Einen möglichen Weg dahin zeige ich in diesem Skript auf. Seit Jahren bestimme ich in meinen Physikkursen die Plancksche Wirkungskonstante h mit LEDs in einem Versuch, der sich sehr viel schneller aufbauen lässt als der entsprechende Versuch zum Photoeffekt. Außerdem lässt er sich bei normalem Umgebungslicht und als Schülerversuch gefahrlos durchführen. Die Geräte kann man mit etwas Bastelerfahrung selbst bauen. Ferner liefert er einen sehr guten, exakt reproduzierbaren Wert für h . Aus den experimentellen Daten ergibt sich im Gegensatz zum Photoeffekt ein fast proportionaler Zusammenhang zwischen der Spannung U an der LED und der Frequenz f des ausgesandten Lichtes. Aber der Versuch bleibt für die Schülerinnen und Schüler unbefriedigend, wenn man nicht erklärt, warum oder unter welchen Bedingungen man die Quantenbedingung

$$e * U = h * f$$

in ihrer einfachsten Form auf LEDs anwenden darf. Beim Photoeffekt liefert der Energieerhaltungssatz eine anschauliche Deutung der Gleichung. Analysiert man die genauen Vorgänge in einer LED, so erhält man ein Gesetz, das dem Gesetz beim Photoeffekt sehr ähnelt. Es beschreibt den Strom durch eine LED. Die erhaltene Gleichung ist nicht ganz einfach, lässt sich aber mit Schulmathematik herleiten und wie beim Photoeffekt mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes physikalisch anschaulich deuten. Durch die experimentelle Randbedingung, dass man durch die LED nur einen sehr kleinen Strom fließen lässt, vereinfacht sich das Gesetz so weit, dass man die Versuchsdaten mit der oben angeführten einfachen Quantenbedingung auswerten kann. In einem Grundkurs reicht es sicherlich, die Vorgänge in einer LED qualitativ zu beschreiben und zu erklären und anschließend die Versuchsdaten auszuwerten, in einem LK kann man das Gesetz auf Wunsch der Schülerinnen und Schüler auch mathematisch herleiten. Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Basteln und Experimentieren.

Stolberg, im Juli 2015 und im Februar 2021

2. Theorie

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

$$U_1 = 1,3 V; U_2 = 1,8 V; U_3 = 3,5 V$$

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. Heute kann man LEDs in allen diesen Wellenlängenbereichen kaufen. Warum man die obige Quantenbedingung in so einfacher Weise auf LEDs anwenden darf, soll nun erklärt werden. Die Kennlinie einer idealen monochromatischen LED mit vernachlässigbarem Ohmschen Widerstand in den Zuleitungen lässt sich aufgrund der Diffusion der Ladungsträger durch die Grenzschicht mit folgender Formel beschreiben^{1),2),3)}:

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

Darin bedeuten:

I: Stromstärke,

I_0 : Leckstrom,

e: Elementarladung,

U: Spannung,

h: Plancksche Konstante,

f: Frequenz des ausgesandten Lichts,

k: Boltzmann-Konstante,

ΔT : 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. Einerseits sickert ein geringer Teil durch kleine Risse in der Mauer 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 elektrischen 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 somit nach Multiplikation mit u:

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

Man 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 u bedeutet. 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 ΔT 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 und $\Delta T = 20 \text{ K}$ sowie $I_0 = 1 * 10^{-10} \text{ A}$ mit Excel aus, so erhält man die Kurven in Abb. 1. Dabei wird angenommen, dass sich die LEDs im Betrieb nur wenig erwärmen und nur ein geringer Leckstrom fließt.

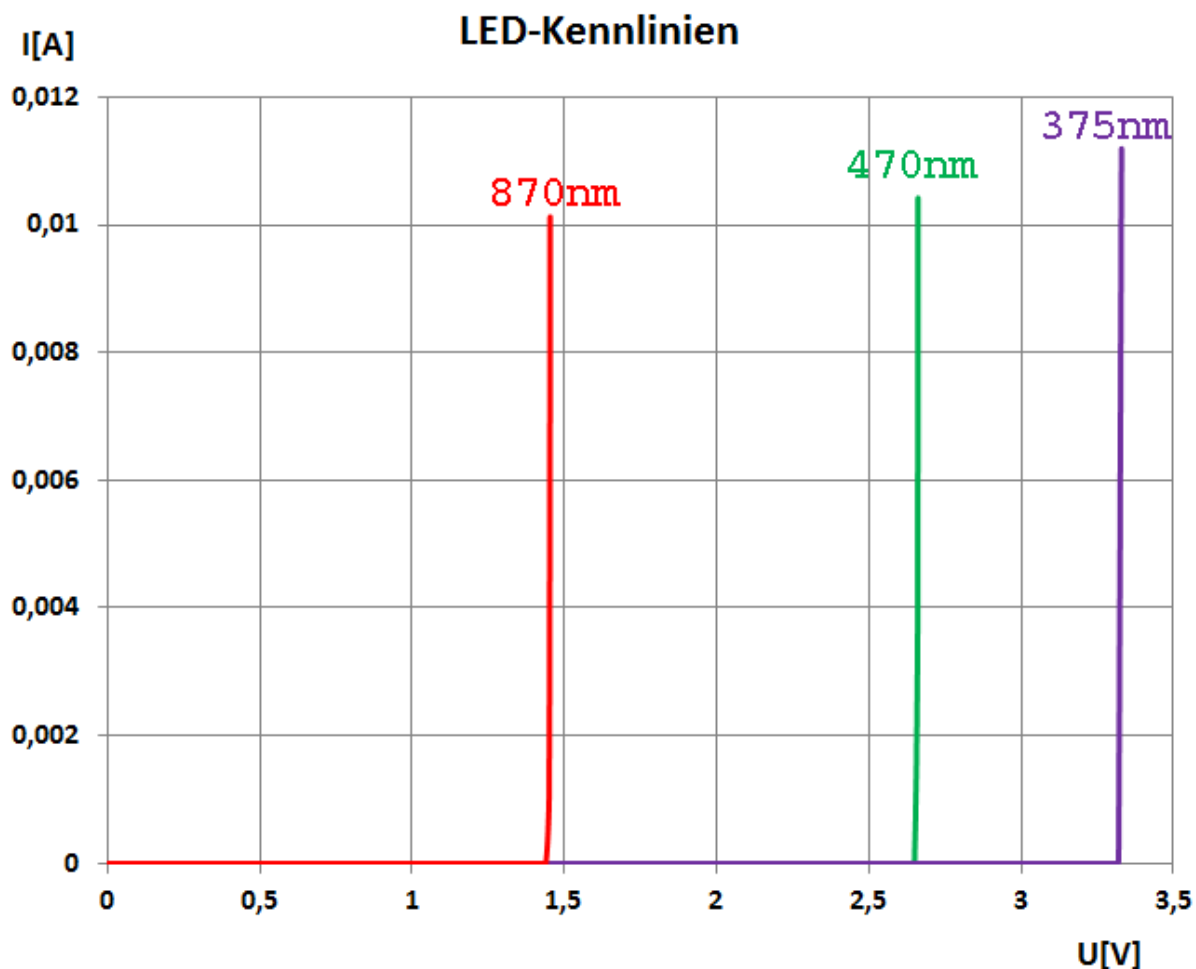


Abb.1: LED-Kennlinien für verschiedene Wellenlängen

Bei der Auswertung 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 verläuft er sehr steil im positiven Bereich. Die Spannung, bei der der Anstieg beginnt, hängt von der Frequenz bzw. der Wellenlänge des Lichtes ab. Dieser Verlauf entspricht recht genau den experimentell ermittelten Kennlinien verschieden farbiger LEDs, wie der unten beschriebene Versuch zeigt. Allerdings verlaufen die Kennlinien bei realen LEDs im zweiten Teil weniger steil, weil sie in den Anschlüssen einen Ohmschen Widerstand besitzen, der den Anstieg begrenzt. Bei einer gewissen 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 Temperatur 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 meist ein wenig zu tief, da die Kennlinie einer realen LED wegen des Ohmschen Widerstandes weniger steil verläuft als der einer idealen.

In jedem Fall gilt bei konstanter Temperaturerhöhung ΔT 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 somit mit großer Genauigkeit die Plancksche Konstante ermitteln.

Es bleibt die Frage zu klären, warum LEDs eine sehr viel höhere Lichtausbeute als Glühlampen haben. Ein Blick auf die Kennlinien beider Lampen verrät die Lösung. In LEDs können Ladungen, Elektronen und positive Löcher, erst dann fließen, wenn sie ein gewisses Energieniveau erreicht haben. Durch geschickten Aufbau der Grenzschicht kann man es so weit anheben, dass die Ladungen bei der Rekombination vor allem Photonen sichtbaren bzw. bei weißen LEDs blauen Lichtes aussenden. Ein Teil des blauen Lichtes kann anschließend durch Fluoreszenz in rotes und grünes Licht umgewandelt werden, so dass insgesamt der Farbeindruck weiß entsteht. In Glühlampen fließen auch Elektronen mit beliebig kleinen Energien, wie die fast lineare Kennlinie zeigt. Sie stoßen mit den Metallrümpfen zusammen und senden aufgrund ihrer geringen Energie vor allem IR-Photonen, also Wärmestrahlung aus. Nur wenige erreichen das Energieniveau von Photonen sichtbaren Lichtes, bevor sie abgebremst werden. Daher eignen sich Glühlampen eher als Heizquellen und weniger als Lichtquellen. In Energiesparlampen können die Elektronen die Quecksilberatome erst dann anregen, wenn sie die Energie eines UV-Überganges im Quecksilber erreicht haben. Beim Rückfall ins Grundniveau senden die Quecksilberatome UV-Photonen aus, die durch Fluoreszenz in Photonen sichtbaren und infraroten Lichtes umgewandelt werden. Daher haben sie eine viel höhere Lichtausbeute als Glühlampen, aber eine kleinere als LED-Lampen. Die ursprünglich erzeugten UV-Photonen sind zu energiereich. In Röntgenröhren müssen die Elektronen auf Energien beschleunigt werden, die im keV-Bereich liegen, bevor sie sie durch Stöße mit dem Anodenmaterial wieder abgeben. Das gelingt mit einer Beschleunigungsstrecke im Vakuum, in denen die Elektronen auf keine Stoßpartner treffen können. So werden an der Anode vor allem energiereiche Photonen im Röntgenbereich abgestrahlt.

3. Versuche

Versuch 1a:

Geräte:

Man benötigt eine Konstantstromquelle mit $I = 2\text{mA}$ (s. Anhang), ein Voltmeter und monochromatische LEDs verschiedener Wellenlänge λ .

Durchführung:

Man legt eine LED an die Konstantstromquelle und misst die abfallende Spannung an der LED. Man wiederholt den Versuch mit anderen LEDs und trägt die gemessenen Spannungen in eine Tabelle ein, wobei die Stromstärke nicht verändert werden darf.

Beobachtung:

Es ergibt sich folgende Messtabelle:

LED	$\lambda[\text{nm}]$	$f[*10^{14}\text{Hz}]$	U[V]
IR ₁	940	3,19	1,12
IR ₂	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 ₁	403	7,44	2,93
UV ₂	375	8,0	3,16

Tabelle 1: U/f-Messwerte

Versuch 1b:

Geräte:

Man benötigt im Vergleich zu Versuch 1a zusätzlich ein Amperemeter.

Durchführung:

Man benutzt den gleichen Aufbau wie in Versuch 1a. 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 mit beiden Potis von $I_1 = 2\text{mA}$ auf $I_2 = 20\text{mA}$ in Schritten von $\Delta I = 2\text{mA}$ erhöht und sich die jeweiligen Spannungen notiert.

I[mA]	U(940nm)[V]	U(625nm)[V]	U(470nm)[V]
2	1,10	1,78	2,72
4	1,13	1,83	2,80
6	1,15	1,87	2,86
8	1,18	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

Beobachtung:

Für einzelne ausgewählte LEDs erhält man Tabelle 2.

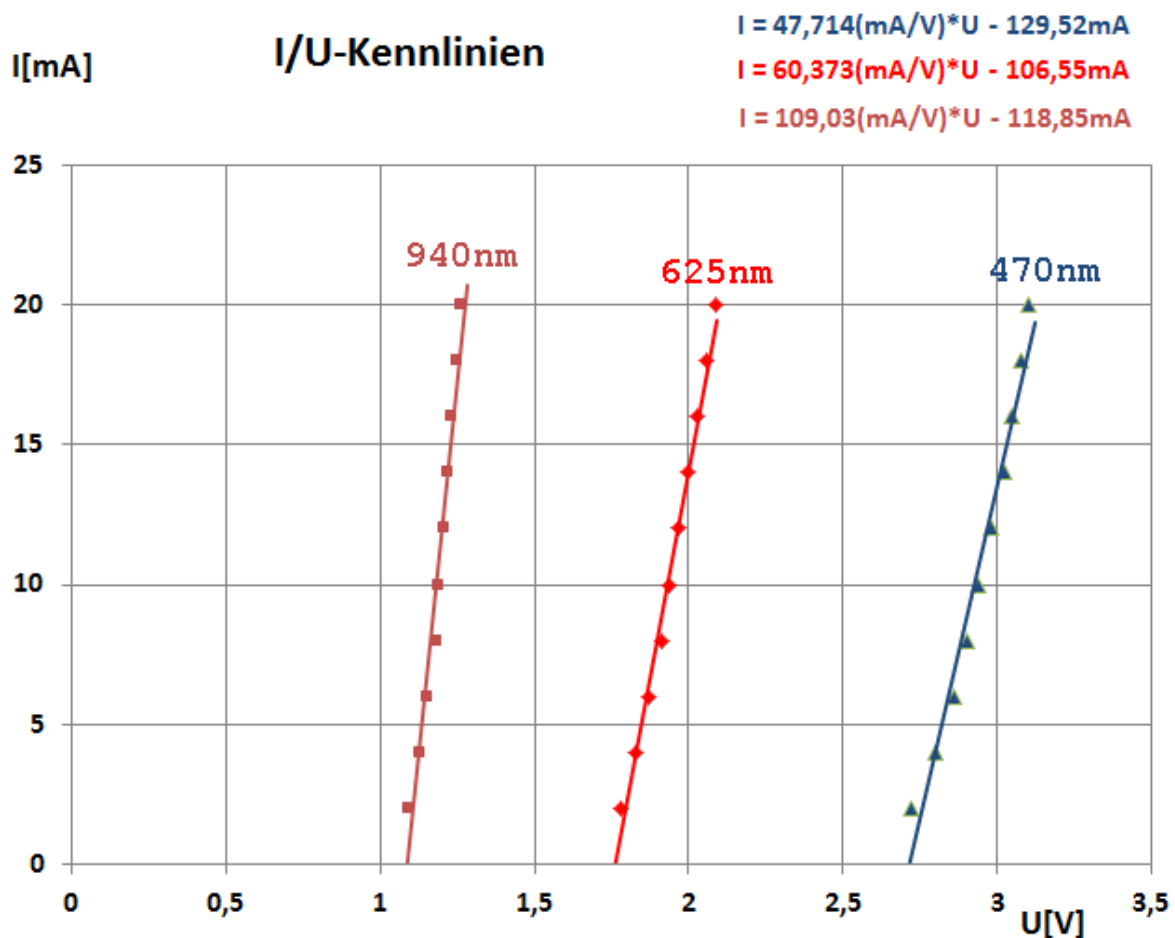


Abb.1: I/U-Kennlinien

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:

$$940 \text{ nm}: U_0 = \frac{118,85\text{mA}}{109,03(\text{mA/V})} = 1,09 \text{ V.}$$

$$625 \text{ nm}: U_0 = \frac{106,55\text{mA}}{60,373(\text{mA/V})} = 1,76 \text{ V.}$$

$$470 \text{ nm}: U_0 = \frac{129,52\text{mA}}{47,714(\text{mA/V})} = 2,71 \text{ V.}$$

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 1c:

Geräte:

Elegant und wesentlich schneller kann man die LED-Kennlinien mit Hilfe der Schaltung in Abb. 2 und einem Messwerterfassungssystem wie etwa Cassy oder cassy mobile der Firma Leybold aufnehmen. Man kann sie auf einer Steckplatte oder in einem Gehäuse aufbauen. Im zweiten Fall erhält man eine komplette Versuchseinheit, an die man lediglich die Versorgungsspannung anlegt und während des Versuches die LEDs austauscht. Wie eine solche Betriebseinheit aussehen kann, wird im Anhang beschrieben.

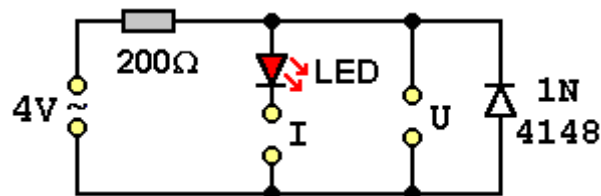


Abb. 2: Versuchsaufbau

Durchführung:

Als Messzeit wählt man eine Periode der Wechselspannung $t = 0,02 \text{ s}$ und als Messintervall $\Delta t = 100 \mu\text{s}$.

Beobachtung:

Man erhält die Kurven in Abb. 3.

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

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

Für sie gilt nach den obigen theoretischen Überlegungen:

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

Damit erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum:

$$h = m * e = 4,201 * 10^{-15} \text{Vs} * 1,6 * 10^{-19} \text{C} = 6,72 * 10^{-34} \text{Js.}$$

Der Literaturwert beträgt:

$$h = 6,63 * 10^{-34} \text{Js.}$$

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 (s. Versuch 1d). Die grüne Farbe der LED ist keine reine Farbe, sondern eine Mischfarbe aus gelb und blau. Der angegebene Wert für die Wellenlänge ist ein Mittelwert. Die benötigte Mindest-

spannung entspricht bei ihr daher in etwa dem Wert der blauen LED. Sie wurde aus diesem Grund bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

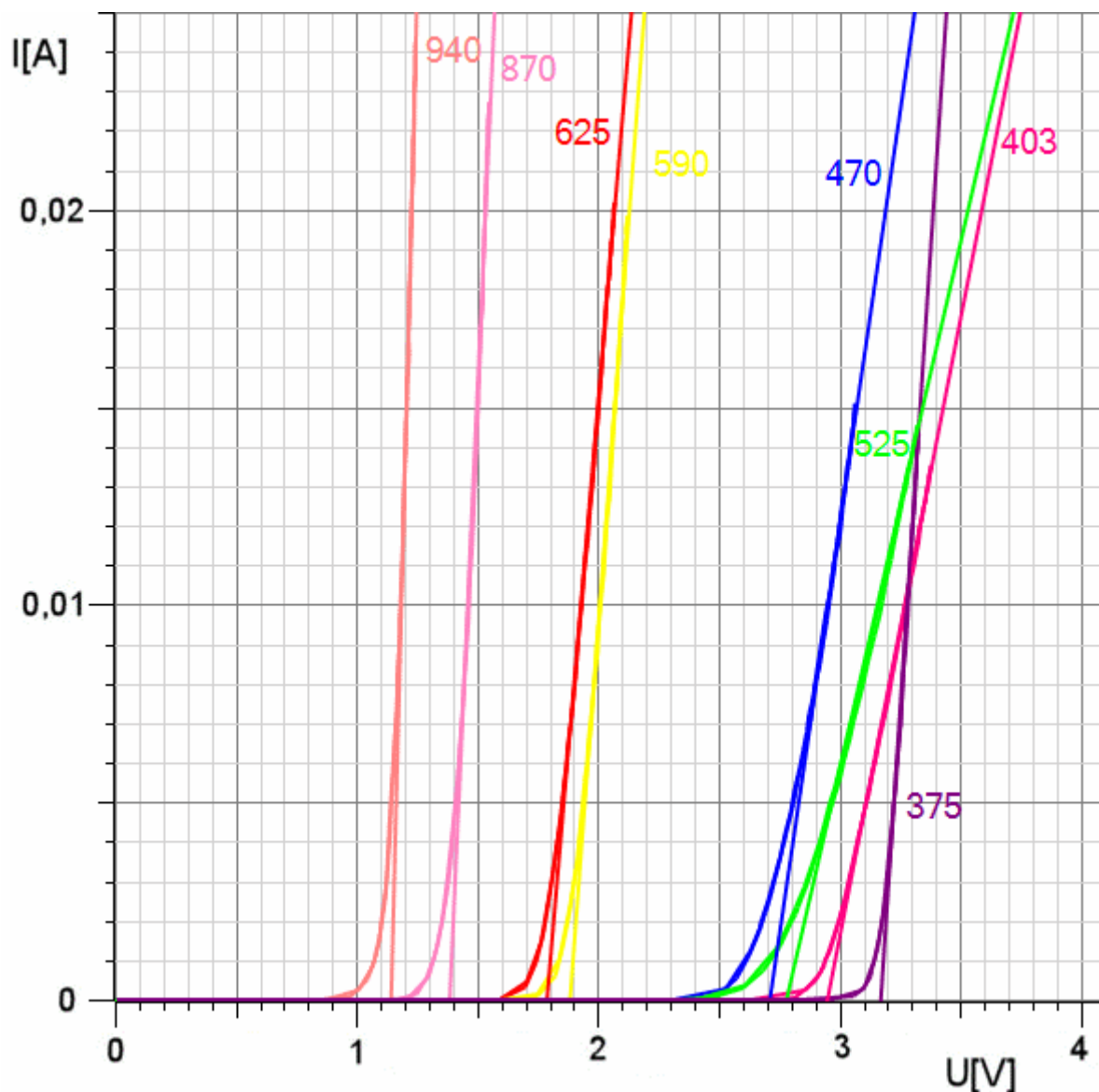


Abb. 3: U/I-Kennlinien

Versuch 1d:

Geräte:

Man benötigt die LEDs aus den vorherigen Versuchen, die selbstgebaute Betriebseinheit oder eine Steckplatte mit dem Versuchsaufbau aus Versuch 1c, sowie eine Linse mit $f = 10 \text{ cm}$, ein optisches Gitter mit $g = 1 \text{ }\mu\text{m}$ und einen Papierschirm.

Durchführung:

Man schließt die Betriebseinheit an eine Wechselspannung $U = 4 \text{ V}$ an und steckt eine LED in die vorgesehenen Buchsen. Dabei muss man die Polung beachten, damit die LED leuchtet. Man bildet die LED mit der Linse auf dem Schirm als kleinen Lichtpunkt scharf ab. Dann stellt man zwischen Schirm und Gitter das optische Gitter und misst den Abstand l zwischen Gitter und Schirm und die Entfernung d zwischen dem ersten Nebenmaximum und dem Hauptmaximum. Man wiederholt den Versuch für verschiedene LEDs.

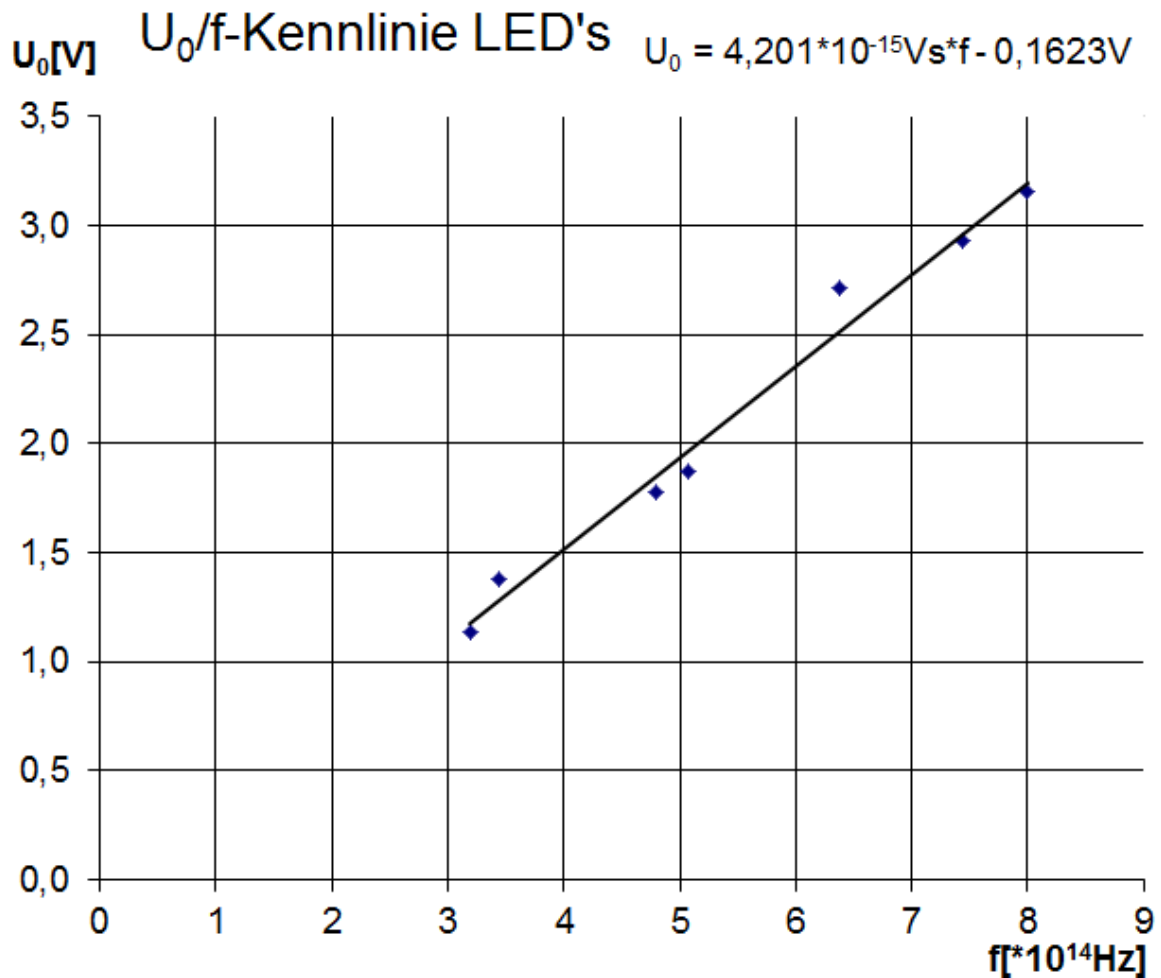


Abb. 4: Abhängigkeit der Spannung U_0 von der Frequenz f

Beobachtung:

Man erhält für die LEDs die Messwerte in den Spalten 4 und 5 der folgenden Tabelle:

Farbe:	λ (Hersteller) [nm]	λ (gemessen) [nm]	l [cm]	d [cm]
rot	625	617	7,0	5,5
gelb	590	581	7,0	5,0
grün	525	523	7,0	4,3
blau	470	477	7,0	3,8
UV ₁	403	405	7,0	3,1
UV ₂	375	371	7,0	2,8

Tabelle 1: Messtabelle

Auswertung:

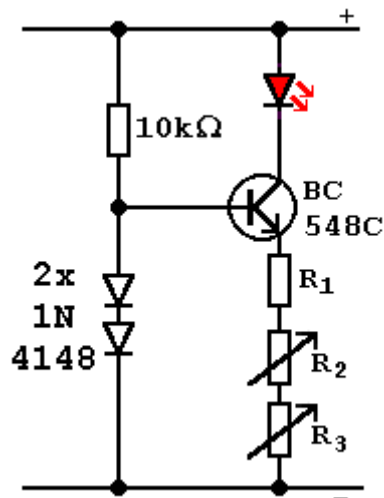
Nach den Gesetzen der Beugung am Gitter gilt für die Wellenlänge λ im 1. Nebenmaximum folgende Formel:

$$\lambda = g * \sin\left(\arctan\left(\frac{d}{l}\right)\right).$$

Mit $g = 1 \mu\text{m}$ erhält man die Werte in Spalte 3 der Tabelle. Sie stimmen sehr gut mit den Werten aus Spalte 2 überein, die den Wellenlängenangaben des LED-Herstellers entsprechen. Bei der grünen LED kann man erkennen, dass sie nicht monochromatisch ist, sondern einen Gelb- und Blauanteil besitzt. Der gemessene Wert bezieht sich auf den grünen Bereich des Spektrums. Die Punkte der Maxima der UV-LEDs kann man auf dem Papier ohne Zinksulfidschirm klar erkennen, da Papier optische Aufheller enthält, die nahes UV in sichtbares bläuliches Licht umwandeln.

4. Anhang

Eine einfache regelbare Konstantstromquelle kann man mit wenigen elektronischen Bauteilen selbst bauen. Abb.1 zeigt ihren elektronischen Aufbau.



**Abb.1: Schaltplan
Konstantstromquelle**

An den beiden Dioden fällt zusammen eine Spannung von

$$U_1 = 2 * 0,7 V = 1,4 V$$

ab, an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors

$$U_2 = 0,7 V.$$

Es verbleiben zwischen Emitter und Minuspol

$$U_3 = 1,4 V - 0,7 V = 0,7 V.$$

Um mit ihnen einen Strom von

$$I_1 = 20 mA$$

aufrecht zu erhalten, muss der Emitterwiderstand R_1

$$R_1 = \frac{0,7 V}{0,02 A} = 35 \Omega$$

betragen. Ein passender gängiger Wert ist 33Ω . Mit Hilfe zweier in Reihe geschalteter Potentiometer mit den Werten $R_2 = 100 \Omega$ und $R_3 = 1 k\Omega$ kann man den Strom herunterregeln, mit beiden zusammen auf

$$I_2 = \frac{0,7 \text{ V}}{33 \, \Omega + 1000 \, \Omega + 100 \, \Omega} = 0,6 \text{ mA.}$$

Mit dem Poti $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ stellt man den Strom im Bereich von 1 bis 6 mA exakt ein, mit dem Poti $R_2 = 100 \, \Omega$ von 6 bis 20 mA, wenn das jeweils andere Poti auf null steht. Verwendet man nur das Poti mit $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, so lässt sich im oberen Strombereich der Strom nur sehr schlecht exakt regeln. Man benötigt für die Stromquelle folgende Bauteile:

- 2 Si-Dioden 1N4148
- 1 Widerstand $10 \text{ k}\Omega$
- 1 Widerstand $33 \, \Omega$
- 1 Potentiometer $1 \text{ k}\Omega$
- 1 Potentiometer $100 \, \Omega$
- 2 Drehknöpfe passend zur Achse der Potentiometer
- 1 Transistor BC548C
- 1 Stück Platine $4\text{cm} \times 6\text{cm}$ RM 2,52mm
- 1 Gehäuse etwa $14\text{cm} \times 8\text{cm} \times 6\text{cm}$
- 2 Telefonbuchsen schwarz
- 2 Telefonbuchsen rot
- 2 Schrauben $10 \times 3 \text{ mm}$
- 4 Muttern M3
- Schaltlitze
- Lötmaterial

Abb.2 zeigt, wie man die Bauteile auf der Lochrasterplatine verlötet. In die fertig verlötete Platine bohrt man an zwei gegenüberliegenden Ecken je ein Loch mit 3 mm Durchmesser. Man legt sie auf den Deckel des Gehäuses und markiert die Löcher auf dem Deckel. Dann bohrt man mit einem Holzbohrer an den markierten Stellen zwei 3 mm Löcher für die Befestigungsschrauben der Platine. Anschließend bohrt man in den Deckel noch vier 8 mm Löcher für die Telefonbuchsen des Ein- bzw. Ausganges und zwei 10 mm Löcher für die Potentiometer (s. Abb.3). Man verschraubt die Buchsen und die Potentiometer am Deckel und verbindet sie gemäß Abb. 2 mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Bei den Potis benutzt man den Mittenabgriff und einen der seitlichen Anschlüsse. Sie werden in Reihe geschaltet mit einem Stück Schaltlitze. Dann befestigt man mit den beiden Schrauben und den Muttern die Platine am Gehäuse. Dabei dienen zwei Muttern als Unterlegscheiben, so dass die Lötstellen nicht zu fest auf die Rückseite des Gehäusedeckels gepresst werden. Man steckt die Drehknöpfe auf die Potiachsen, nachdem man sie mit einer Metallsäge auf die passende Größe gekürzt hat.

Abb. 3 zeigt die fertige Stromquelle. An ihren Eingang E legt man eine Gleichspannung von $U_B = 5 - 10 \text{ V}$ an, an ihren Ausgang A schließt man nacheinander die einzelnen LEDs und ein Voltmeter an. Alle benötigten Bauteile einschließlich der LEDs sind im Elektronikhandel problemlos erhältlich, etwa bei Conrad-Electronic⁴⁾ oder einem anderen Elektronikversandhandel. Auch jeder Elektronikladen dürfte die Bauteile im Sortiment führen, da es sich um gängige Artikel handelt. Die LEDs baut man in kleine Steckkästchen eines vorhandenen Elektronik-Stecksystems ein. Alternativ kann man auch die Spannungsquelle, einen Wahlschalter und die LEDs auf einer Holzplatte montieren, wie im Artikel Optoelektronik auf dieser Webseite beschrieben wird.

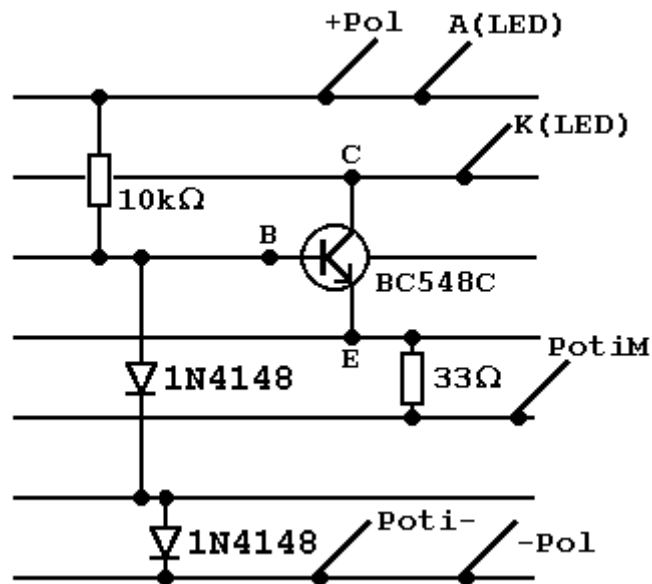


Abb.2: Verschaltung auf einer Platine

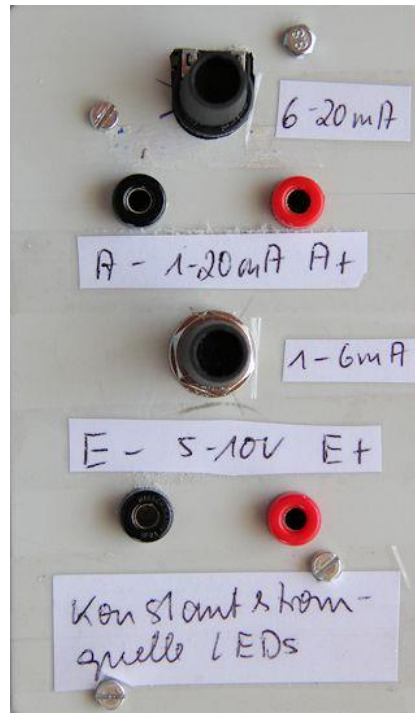


Abb.3: Vorderseite
Konstantstromquelle

Um die Kennlinien mit einem Messwerterfassungssystem problemlos aufnehmen zu können, kann man sich ein eigenes Betriebsgerät bauen. Man muss die Schaltung dann nicht mehr jedes Mal auf einer Steckplatte zusammenstecken. Man benötigt pro Stück folgende Bauteile:

- 1 Widerstand 200 Ω
- 1 Diode 1N4148
- 8 monochromatische LEDs mit verschiedenen Wellenlängen
- 8 Steckkästchen für die LEDs

2 gelbe Telefonbuchsen
2 rote Telefonbuchsen
2 schwarze Telefonbuchsen
1 blaue Telefonbuchse
7 Lötösen
1 Gehäuse etwa 14cmx8cmx6cm
1 Kurzschlussbrücke
Schaltlitze
Lötmaterial.

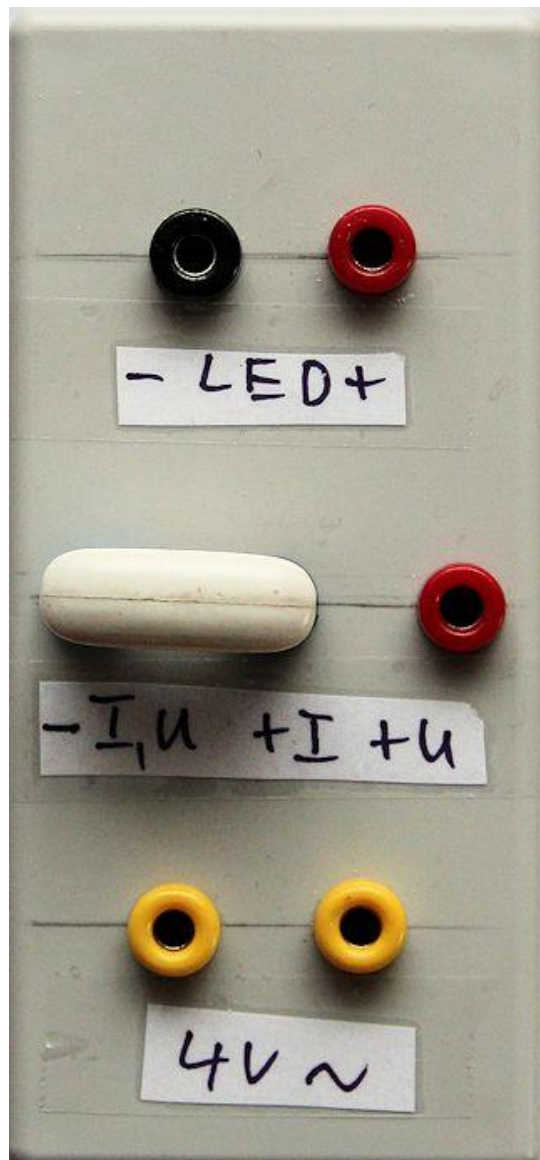


Abb.4: Fertiges Betriebsgerät mit Kurzschlussbrücke

Man baut die LEDs in die Steckkästchen ein. Dann bohrt man in den Deckel des Gehäuses sieben Löcher mit einem Durchmesser von 8 mm in der Anordnung nach Abb. 4. Dabei muss man darauf achten, dass die Löcher jeweils exakt einen Abstand $d = 2 \text{ cm}$ haben, damit die Kurzschlussbrücke und die Steckkästchen der LEDs in die Buchsen passen. Man setzt die Buchsen nach Abb. 4 ein, wobei man jeweils zwischen die beiden Muttern eine Lötöse legt.

Man verlötet die rechte gelbe Buchse über den $200\ \Omega$ Widerstand zunächst mit der roten Messbuchse und diese mit einem Stück Schalllitze mit der roten LED-Buchse. Die schwarze LED-Buchse verbindet man mit einem Stück Schalllitze mit der schwarzen Messbuchse, ebenso die linke gelbe Buchse mit der blauen Messbuchse. Zum Schluss verlötet man den Minuspol der Diode an der roten Messbuchse und ihren Pluspol mit der linken gelben Buchse. Man erhält das fertige Betriebsgerät in Abb. 4. Im Betrieb legt man an die gelben Buchsen eine Wechselspannung mit $U = 4\ \text{V}$ und $f = 50\ \text{Hz}$. An die blaue Buchse schließt man die gemeinsame UI-Messbuchse des Messwerterfassungssystems an, an die schwarze den Stromeingang und an die rote den Spannungseingang. Die Farben der Buchsen entsprechen genau den Messbuchsen von cassy mobile der Firma Leybold. Auf die LED-Buchsen steckt man nacheinander die verschiedenen LEDs und zeichnet für jede die UI-Kennlinie auf. Will man die LEDs nur zum Leuchten bringen, ohne den Strom und die Spannung zu messen, um wie in Versuch 1d ihre Wellenlänge zu bestimmen, so überbrückt man die schwarze und blaue Messbuchse mit der Kurzschlussbrücke.

5. Literatur

- 1) H. Schwarze, Mit Leuchtdioden zu $E=h \cdot f$, Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 1/46 S. 34-36, Köln 1997
- 2) Burkhard Kainka, Experimente mit Hochleistungs-LEDs, Franzis-Verlag GmbH, Poing 2007
- 3) J. Pütz, Einführung in die Elektronik, 20. Auflage, vgs-Verlagsgesellschaft, Köln 1986
- 4) www.conrad.de