

# **Photoeffekt**

**Alfons Reichert**

**Stolberg, im Februar 2019**

## Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Theorie .....	4
3. Versuche.....	9
4. Anhang .....	27
5. Literatur.....	34

## 1. Einleitung

Kaum ein Versuch hat in der Physik so viele Fragen aufgeworfen wie der Versuch zum Fotoeffekt. Er veränderte das Weltbild der Physik nachhaltig. Und Albert Einstein erhielt für die mathematische Deutung der Versuchsergebnisse 1921 den Physiknobelpreis. Aber auch 100 Jahren danach lassen sich die Vorgänge nicht befriedigend anschaulich erklären. Die Physiker haben eine Sprachregelung gefunden, die mehr verschleiert als erklärt. Die Rede ist vom Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes und der Elektronen. Beide Modellvorstellungen scheinen sich zu widersprechen. Dabei sind Lichtteilchen keine klassischen Teilchen, eben so wenig wie Elektronenwellen Wellen im eigentlichen Sinne sind. Tatsache ist, dass sich einige Versuche widerspruchsfreier mit dem Wellenmodell erklären lassen, wie die Interferenzerscheinungen, andere mit der Teilchenvorstellung wie eben der Fotoeffekt. Dabei wird übersehen, dass Interferenzerscheinungen bei Überlagerung von mehreren Wellen auftreten, beim Fotoeffekt wechselwirken jedoch Lichtwellen mit den Elektronen in einem Metall. Die beiden Vorgänge haben also physikalisch eigentlich fast nichts mit einander zu tun, außer dass an beiden elektromagnetische Wellen beteiligt sind. Im folgenden Artikel habe ich versucht, die Vorgänge, die sich bei dieser Wechselwirkung abspielen, genauer zu analysieren. Ich hoffe so den Mythos Welle-Teilchen-Dualismus etwas lüften zu können, der so manchem Physikschüler schon erhebliches Kopfzerbrechen bereitet hat. Dazu werden mit Hilfe einer elektronischen Schaltung die Vorgänge simuliert, die sich abspielen, wenn eine elektromagnetische Welle auf Elektronen in einer Metalloberfläche trifft. Sie liefert die gleiche Abhängigkeit der Spannung  $U$  von der Frequenz  $f$  wie der Fotoeffekt selbst. Außerdem habe ich alle Versuche zusammengestellt, mit denen man den Fotoeffekt qualitativ und quantitativ in der Schule untersuchen kann.

Stolberg, im Februar 2019

## 2. Theorie

Trifft ein elektromagnetischer Wellenzug unter einem bestimmten Winkel auf eine Metalloberfläche, so übt das elektrische Feld der Welle eine Kraft auf die Elektronen an der Oberfläche aus, die in Schwingungen versetzt werden. Das elektrische Feld dringt nur wenig ins Metall ein, da das Innere eines metallischen Körpers Feld frei ist, wie ein Faradayscher Käfig zeigt. Die schwingenden Elektronen erzeugen ihrerseits Huygensche Elementarwellen. Sie überlagern sich zu einer neuen Wellenfront, die mit dem Lot auf die Oberfläche den gleichen Winkel bildet wie die auftreffende Welle. Die Welle wird insgesamt reflektiert. Es gilt das Reflexionsgesetz.

Bestrahlt man wie beim Fotoeffekt mit Licht die Oberfläche eines sehr unedlen Metalls, in dem die Elektronen sehr locker gebunden sind, so können Elektronen aus der Metalloberfläche herausgeschlagen werden. Die elektrische Feldkomponente, die dafür verantwortlich ist, kann nur senkrecht auf der Metalloberfläche stehen. Die parallele Komponente übt auf die Elektronen eine Kraft parallel zur Oberfläche aus und versetzt sie in dieser Richtung in Schwingungen. Sie können die Metalloberfläche nicht verlassen. Die auftreffende Welle muss man in zwei Teilwellen zerlegen, eine, deren Wellennormale senkrecht auf der Metalloberfläche steht und eine, die parallel zur Oberfläche verläuft. Für unsere weiteren Überlegungen ist nur die zweite Teilwelle von Interesse. Versucht man das Austreten der Elektronen mit den Welleneigenschaften des Lichtes zu erklären, so treten Widersprüche zu experimentellen Ergebnissen auf. Die kinetische Energie der Elektronen wird durch die Frequenz der Welle bestimmt und nicht durch die Intensität des Lichtes. Außerdem werden spontan Elektronen herausgeschlagen. Aufgrund der Verteilung der Energie auf eine große Oberfläche müsste es lange dauern, bis die Elektronen genügend Energie gesammelt haben, um die anziehenden Kräfte der Metallkationen zu überwinden und das Metall zu verlassen. Eine Überschlagsrechnung verdeutlicht das Problem. Dabei benutze ich experimentelle Daten eines modernen Versuchsaufbaus mit LEDs zum Thema Fotoeffekt.

Eine punktförmige blaue LED mit den Kenndaten Spannung  $U = 2,9 \text{ V}$ , Stromstärke  $I = 0,02 \text{ A}$  und einer Lichtausbeute  $\eta = 30 \%$  bestrahlt eine Cäsiumoberfläche aus einer Entfernung  $r = 20 \text{ cm}$ . Sie sendet eine Lichtleistung

$$\begin{aligned} P &= 0,3 * 2,9 \text{ V} * 0,02 \text{ A} \\ &= 0,0174 \text{ J/s} \end{aligned}$$

aus. Diese verteilt sich im Bereich der Cäsiumkathode auf eine Kugeloberfläche

$$\begin{aligned} O &= 4\pi r^2 \\ &= 0,5024 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Das Elektron wird aus einem Cs-Atom mit dem Durchmesser  $r = 2,8 * 10^{-10} \text{ m}$  freigesetzt. Es absorbiert eine Leistung  $P_A$

$$\begin{aligned} P_A &= 0,0174 \text{ J/s} * \frac{3,14 * (2,8 * 10^{-10} \text{ m})^2}{0,5024 \text{ m}^2} \\ &= 8,526 * 10^{-21} \text{ J/s}. \end{aligned}$$

Die Austrittsarbeit für die verwendete Fotozelle beträgt  $W_A = 1,54 \text{ eV}$  (s. Kapitel Versuche). Dazu kommt eine Fotospannung der blauen LED von  $U = 1,15\text{V}$ . Damit das Atom diese Energie aus dem Licht der LED absorbieren kann, müsste es eine Zeit

$$t = \frac{(1,54 + 1,15)\text{V} * 1,6 * 10^{-19}\text{C}}{8,526 * 10^{-21}\text{J/s}}$$

$$= 50,5 \text{ s}$$

bestrahlt werden. Dieser Wert ist erheblich kleiner als der Wert im Physikbuch Dorn-Bader<sup>1)</sup>. Meiner Meinung wird dort mit einem falschen Radius des Cs-Atoms gerechnet. Außerdem wird von einer unrealistischen Entfernung zwischen Lichtquelle und Fotozelle von  $r = 1 \text{ m}$  ausgegangen. Das grundsätzliche Problem bleibt jedoch gleich. Es treten spontan Fotoelektronen aus, wenn man die Cs-Oberfläche mit Licht bestrahlt und nicht erst mit einer zeitlichen Verzögerung. Solche Berechnungen beruhen allerdings auf der Annahme, dass das Licht aus einer einheitlichen Welle besteht, die den ganzen Raum gleichmäßig ausfüllt. Jeder Punkt des Raumes wird von der gleichen Energie durchflutet. Diese Voraussetzungen sind in der Realität nicht einmal ansatzweise gegeben. In der Lichtquelle senden einzelne Elektronen Wellenzüge unterschiedlicher Phase und Länge aus, wie Kohärenzprobleme bei Interferenzversuchen eindrucksvoll beweisen. Genau wie in der Lichtquelle muss man beim Fotoeffekt die Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Wellenzug genauer betrachten. Die Physiker schreiben der Welle dazu Teilcheneigenschaften zu. Diese Lichtteilchen, Photonen genannt, schlagen die Elektronen heraus. Ihre Energie ist proportional zu einer Welleneigenschaft des Lichtes, der Frequenz, wie Max Planck als erster postuliert hat, um das Emissionsspektrum schwarzer Strahler erklären zu können. Außerdem treten die Elektronen nicht in Flugrichtung der Photonen aus dem Metall aus, sondern senkrecht dazu. Photonen haben also nur wenig mit klassischen Teilchen zu tun. Auch Elektronenwellen sind keine klassischen Wellen, da in ihnen nicht nur Energie, sondern auch Materie transportiert wird. Der Begriff Welle-Teilchen Dualismus erklärt nichts, ist sogar völlig irreführend.

Wie hat man sich ein Lichtteilchen vorzustellen? Eine Welle besitzt eine geordnete Struktur, die sich über einen größeren Raumbereich erstreckt, ein ideales Teilchen ist punktförmig und hat idealerweise keine räumliche Ausdehnung. Es stellen sich zwei Fragen. Erstens, wie kann eine Welle grundsätzlich zu einem „Teilchen“ mutieren. Zweitens, wie kann aus der Schwingung des elektrischen Feldes eine frequenzabhängige gerichtete Bewegung der Elektronen aus dem Metall heraus entstehen. Abb. 1 verdeutlicht meine Sicht der entscheidenden Vorgänge an der Metalloberfläche, wenn eine elektromagnetische Welle auf sie trifft. Die Energie wird stoßweise mit kleinen konstanten Energieportionen vom Wellenzug auf das Elektron übertragen und zwar jeweils nur in einer Halbwelle. Für die insgesamt während eines Wellenzuges der Kohärenzzeit  $t$  übergebene Energie gilt:

$$E = E_0 * \Delta t * \frac{n}{t}$$

$$= E_0 * \Delta t * f$$

$$= h * f.$$

Darin bedeuten:

$E$ : übertragene Energie

$E_0$ : maximale elektrische Energie der Welle

$\Delta t$ : Kontaktzeit zwischen Welle und Elektron

$t$ : Kohärenzzeit des Wellenzuges

$n$ : Zahl der Energieüberträge

$h$ : Plancksches Wirkungsquantum

$f$ : Frequenz der Welle.

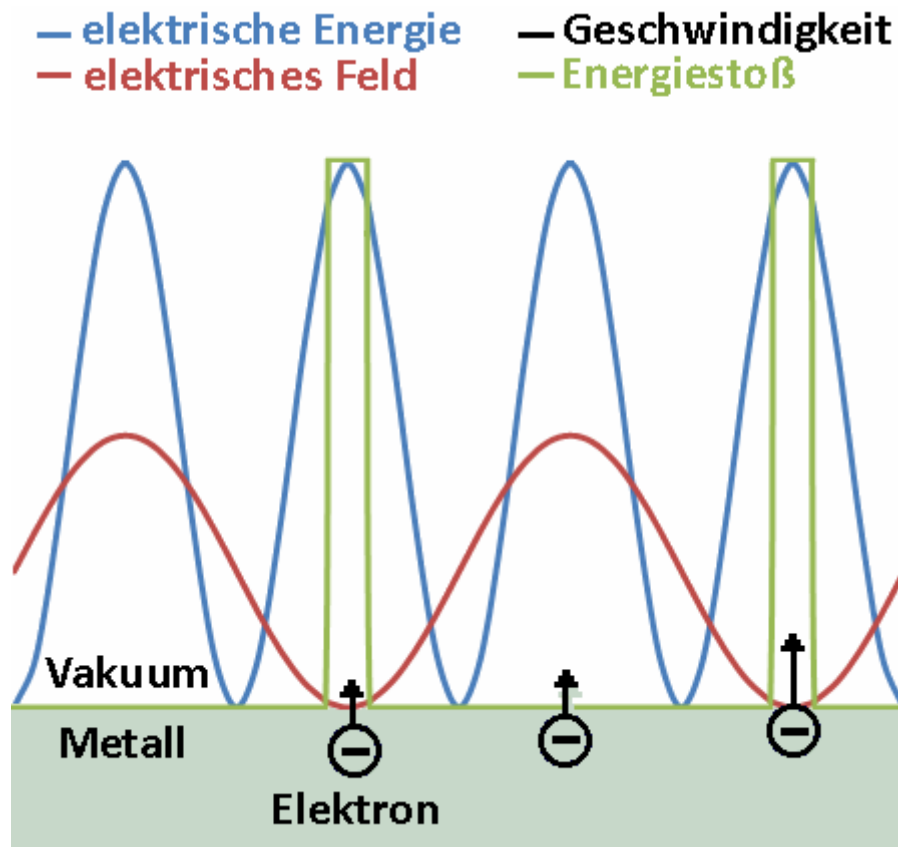


Abb.1: Wechselwirkung beim Photoeffekt

Dieses Ergebnis entspricht der Grundannahme Plancks. Die Konstante  $h$  könnte man ebenso gut als elementaren Energiestoß bezeichnen, da er das Produkt aus übertragener Energie und Kontaktzeit pro Stoß ist. Bei jedem Kontakt zwischen Welle und Elektron wird ein solcher konstanter Energiestoß von der Welle auf ein Elektron übertragen und beschleunigt es aus dem Metall heraus. Erhöht man die Frequenz der Welle, so wird das Elektron im gleichen Zeitraum durch mehr Energiestöße angeregt. Seine kinetische Energie steigt.

Würden die Elektronen durch die elektromagnetische Welle in gleichförmige symmetrische Schwingungen versetzt, so wäre der Mittelwert der Energie und damit die Spannung an der Lampe unabhängig von der Frequenz, wie die Überlegungen zu den Effektivwerten in der Elektrizitätslehre beim Thema Wechselspannung zeigen. Die Kontaktzeit zwischen Elektron und Welle würde mit der Periodendauer zunehmen. Gleichzeitig würde die Zahl der Kontakte während der Kohärenzzeit des Wellenzuges sinken. Beide Effekte würden sich aufheben, so dass die Energie der Elektronen konstant und unabhängig von der Frequenz wäre.

Man kann die Vorgänge mit einem Schlittschuhläufer, einem Fußgänger oder einem Skilangläufer vergleichen, die ihre Geschwindigkeit dadurch steigern, dass sie vorübergehend ihre

Schrittfrequenz erhöhen. Oder man stelle sich vor, man schlägt mit einem Hammer immer auf die gleiche Stelle einer Metalloberfläche. Sie erwärmt sich und zwar umso stärker, je höher die Schlagfrequenz ist. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Berührungen wird kleiner, die Kontaktzeit selbst aber bleibt gleich.

Die Vorgänge lassen sich außerdem mit einer kleinen elektronischen Schaltung simulieren, die an einem Anschluss einer Lampe oder eines Widerstandes durch eine Wechselspannung gleichgroße Potentialsprünge erzeugt, wobei das andere Ende auf einem festen Bezugspotential liegt. Die mittlere Spannung an der Lampe steigt, wenn die Zeitabstände zwischen den einzelnen Stößen kürzer werden, die Frequenz der angelegten Wechselspannung zunimmt. Sie ändert sich nicht bei symmetrischer Anregung (s. Versuche/Versuch 6).

Wird umgekehrt in einer Oszillatorschaltung eine elektromagnetische Welle erzeugt, so sendet jedes Elektron bei jedem Schwingungsvorgang einen Energiestoß der Größe  $h \nu$  aus. Besitzt das Elektron mehr Energie, so hat es eine höhere Geschwindigkeit und schwingt mit größerer Frequenz hin und her. Es kann pro Sekunde mehr Energiestöße aussenden. Die Frequenz der abgestrahlten Welle steigt. Die im punktuellen Teilchen gespeicherte Energie breitet sich über einen größeren Raumbereich aus und wird zur Welle.

Wie aber kommt es, dass die Intensität des Lichtes keinen Einfluss auf die Energie der Fotoelektronen hat? Licht besteht nicht aus einer einzelnen großen Welle, deren Amplitude des elektrischen Feldes zunimmt, wenn man die Intensität erhöht. Vielmehr senden bei größerer Lichtstärke mehr Atome einzelne Wellenzüge aus. Ihre elektrischen Felder addieren sich zu einem größeren mittleren elektrischen Feld. Trifft das intensivere Licht auf eine Metalloberfläche, so wechselwirken mehr Wellenzüge mit einzelnen Elektronen. Mehr Elektronen erreichen die benötigte Energie, um die Austrittsarbeit  $E_A$  des Metalls zu überwinden und so das Metall zu verlassen. Der Fotostrom steigt, nicht aber die Energie der einzelnen Elektronen. Den Rest der von den Photonen auf die Elektronen insgesamt übertragenen Energie  $E_p$  nehmen die Elektronen als kinetische Energie  $E_{kin}$  mit. Damit ergibt sich folgende Energiebilanz für den Fotoeffekt, die Einstein als erster aufgestellt hat:

$$E_p = E_A + E_{kin}$$

Da die Elektronen durch eine Gegenspannung  $U$  abgebremst werden, bis der Fotostrom null ist, gilt zudem mit  $e$  als Ladung des Elektrons:

$$E_{kin} = e * U.$$

Damit erhält man für den Fotoeffekt mit der oben abgeleiteten Formel für die Photonenenergie das bekannte Gesetz:

$$h * f = E_A + e * U.$$

Dieses Gesetz wurde in zahlreichen Versuchen bestätigt.

Zusammenfassend kann man sagen. Es stellt sich nicht die Frage, ob das Licht eine Welle oder ein Teilchen ist. Die Frage muss vielmehr lauten: Wie wechselwirkt es mit seinem Partner, durch kontinuierlichen oder stoßweisen Energieaustausch, wie in einer Welle oder wie in einem elastischen Stoß. Im ersten Fall hängt die übertragene Energie nicht von der Frequenz ab, im zweiten Fall steigt sie proportional mit der Frequenz  $f$ . Und welche Art der Wechselwirkung zum Zuge kommt, hängt vom Partner ab, mit anderen Wellenzügen wird

die Energie wie in einer Welle übertragen, mit Elektronen eher wie bei einem Stoß. Umgekehrt kann man elektromagnetische Wellen erzeugen, in dem man einzelne ungebundene Elektronen durch kontinuierliche Energiezufuhr in Schwingungen versetzt. Man kann sie aber auch stoßweise mit einer bestimmten Frequenz anregen. Das geschieht z.B. in jeder Oszillatortrückkopplungsschaltung.

Somit muss ein „Lichtteilchen“ beim Doppelspaltversuch auch nicht zwei Spalte gleichzeitig passieren. Der Wellenzug wird erst zum Photon, wenn er mit einem Elektron im Spalt oder auf dem Schirm wechselwirkt. Dabei geht zugleich seine ursprüngliche Phase verloren, die nötig ist, damit er mit anderen kohärenten Wellenzügen interferieren kann. Das angeregte Elektron sendet einen neuen Wellenzug aus, der eine neue Phasenbeziehung schafft.

Die Vorgänge lassen sich sehr gut mit Wasserwellen veranschaulichen. Um sie zu erzeugen, regt man entweder die Wasserteilchen zu einer Schwingung an, oder man überträgt mit einem Fuß oder einem Stift stoßweise Energie auf die Wasserteilchen. Je schneller man den Fuß auf und ab bewegt, je größer seine kinetische Energie ist, umso häufiger taucht er pro Sekunde ins Wasser ein, umso größer ist die Frequenz der Wasserwelle. Läuft andererseits eine Wasserwelle auf eine Kaimauer zu, so können einzelne Wasserteilchen über die Kaimauer katapultiert werden, obwohl die Amplitude der Welle viel niedriger ist als die Kaimauer. Die Welle läuft sich vor der Mauer zur Stoßwelle auf, so dass einzelne Wassermoleküle stark beschleunigt werden und zwar senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.



### 3. Versuche

Im folgenden Versuch werden die wesentlichen Aussagen des Fotoeffektes qualitativ gezeigt.

#### Versuch 1: qualitativer Grundversuch

##### Geräte:

Man benötigt ein Elektroskop, ein Hochspannungskabel, einen Hochspannungstrafo, eine Zinkplatte, eine Quecksilberdampflampe ohne Glasfenster, eine Glasscheibe, eine Halogenexperimentierlampe, etwas verdünnte Schwefelsäure (ätzend) und einen Lappen.

##### Aufbau:

Man tränkt den Lappen vorsichtig mit etwas verdünnter Schwefelsäure und reibt die Zinkplatte damit ab, um die Zinkoxidschicht zu entfernen, die sich nach längerem Liegen an der Luft auf der Platte gebildet hat. Man steckt die Platte auf das Elektroskop und erdet seinen Fuß am Erdeingang des Hochspannungstrafos. An den negativen Hochspannungsausgang schließt man das Hochspannungskabel an.

##### Durchführung:

Man schaltet den Hochspannungstrafo ein und stellt eine Spannung von ungefähr  $U = 2 \text{ kV}$  ein. Man berührt mit dem freien Ende des Kabels die Zinkplatte, so dass das Elektroskop sich auflädt und voll ausschlägt. Man richtet zunächst die weiße Experimentierleuchte auf die Zinkplatte, dann die Quecksilberdampflampe. Man lädt das Elektroskop erneut und wiederholt den Versuch mit einem kürzeren Abstand der Lampen zur Zinkplatte. Bei einem dritten Teilversuch hält man zwischen die Hg-Lampe und die Zinkplatte eine Glasscheibe. Zum Schluss lädt man die Zinkplatte positiv auf und führt die einzelnen Versuche erneut durch.

##### Beobachtung:

Wenn man die negativ geladene Zinkplatte mit der Hg-Lampe bestrahlt, entlädt sich das Elektroskop und zwar umso schneller, je näher sich die Lampe an der Zinkplatte befindet. Benutzt man die weiße Experimentierleuchte oder hält man zwischen die Hg-Lampe und die Zinkplatte eine Glasscheibe, so entlädt es sich nicht. Bei positiver Ladung der Zinkplatte passiert bei allen Teilversuchen nichts.

##### Erklärung:

Die Quecksilberdampflampe sendet neben dem sichtbaren Licht auch UV-Licht aus, die weiße Experimentierleuchte nicht. UV-Licht hat eine höhere Frequenz als sichtbares Licht und ist daher nach der Photonenvorstellung aus Kapitel 2 energiereicher als sichtbares Licht. Wechselwirkt ein UV-Photon mit einem Elektron der Zinkplatte, so kann es genügend Energie absorbieren, um die Austrittsarbeit  $E_A$  des Zinks zu überwinden. Es kann das Metall verlassen. Die negativ geladene Platte entlädt sich. Für Zink beträgt die Austrittsarbeit  $E_A = 4,27 \text{ eV}$ <sup>1)</sup>. Sie entspricht der Mindestenergie, die ein Photon haben muss, damit es aus der Zinkplatte austreten kann. Die Elektronen besitzen in diesem Fall keine kinetische Energie, das Produkt  $e \cdot U$  ist null. Wendet man das Gesetz für den Photoeffekt aus Kapitel 2 an, so erhält man für die Grenzfrequenz  $f_G$  des benötigten Lichtes

$$h \cdot f_G = E_A$$

und damit

$$f_G = \frac{E_A}{h} = \frac{4,27 \text{ eV}}{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}} = 1,03 \cdot 10^{15} \text{ Hz.}$$

Für die Grenzlängewelle gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{1,03 * 10^{15} \text{ Hz}} = 291 \text{ nm}.$$

Hg-Dampflampen senden unterhalb dieses UV-Bereiches mehrere Spektrallinien aus mit Wellenlängen zwischen 248 nm und 289 nm<sup>2)</sup>. Sie werden allerdings von Glas absorbiert. Hält man zwischen die Lampe und die Zinkplatte eine Glasscheibe, so entlädt sie sich daher nicht.

Um die Energieabhängigkeit der Photonen von der Frequenz zu bestimmen, wurden im Laufe der Zeit mehrere Verfahren entwickelt. Man kann mit einem Spannungsmessverstärker mit einem Innenwiderstand im GΩ- bis TΩ-Bereich die entstehende Fotospannung zwischen der Kathode und der Ringanode direkt messen. Alternativ kann man zwischen Kathode und Anode der Fotozelle eine variable Gegenspannung anlegen und diese so weit erhöhen, bis der Fotostrom null wird. Da er sehr klein ist, benötigt man in diesem Fall einen Strommessverstärker im nA-Bereich. Als Lichtquelle kann man eine Halogenexperimentierleuchte mit hoher Lichtstärke verwenden. Man braucht zusätzlich verschiedene Farbfilter, um einzelne Frequenzen aus dem Spektrum herauszufiltern. Heute werden jedoch als Lichtquelle meist verschieben farbige LEDs eingesetzt. Dann entfallen die Farbfilter. Dazu haben einige Firmen, wie z.B. Mekruphy kompakte Versuchsaufbauten für Schülerversuche entwickelt, die sehr leicht zu handhaben sind und sehr gute Ergebnisse liefern.

## Versuch 2: Direkte Spannungsmessung

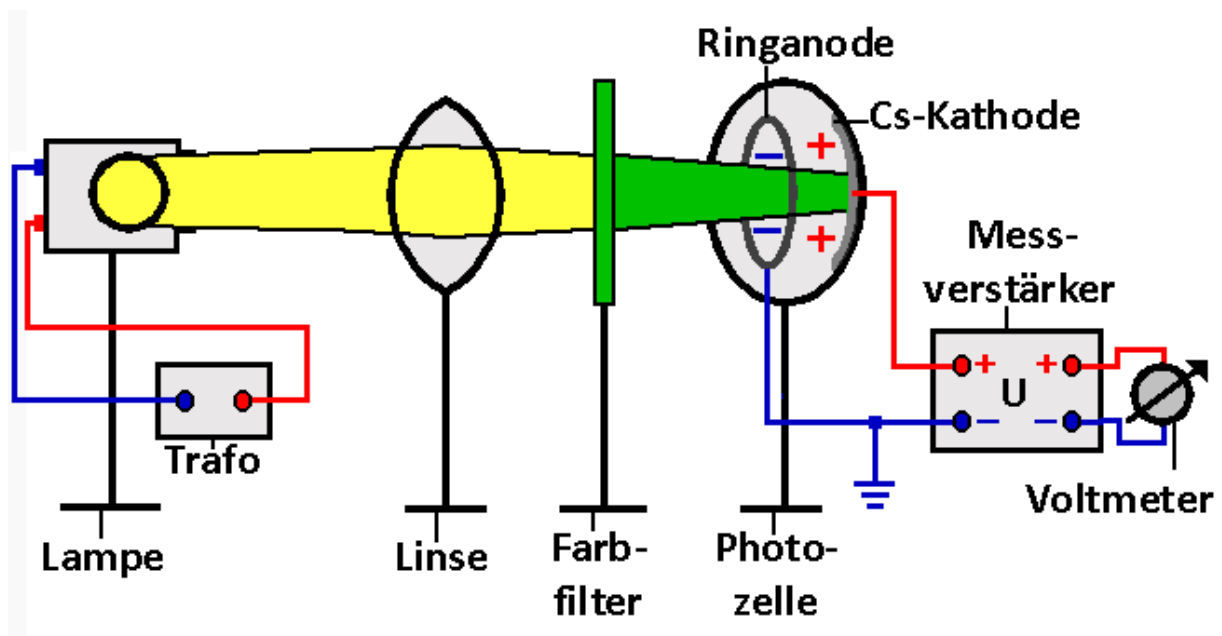


Abb.1: Versuchsaufbau

### Geräte:

Man benötigt eine Photozelle, eine lichtstarke Halogenlampe mit Trafo, eine Linse mit  $f = 150 \text{ mm}$ , Farbfilter mit verschiedenen Wellenlängen und einen Spannungsmessverstärker mit einem Analog- oder Digitalmultimeter als Anzeigegerät.

### Durchführung:

Man baut den Versuch gemäß Abb. 1 auf. Man schaltet den Messverstärker ein. Man hält den Eingang der Photozelle mit der Hand zu und dreht den Messverstärker auf null. Man schaltet die Lampe ein und dunkelt den Raum ab, damit das Umgebungslicht die Messung nicht verfälscht. Die Linse wird so aufgestellt, dass das Licht der Lampe die Photozelle voll ausleuchtet. Dann stellt man zwischen die Linse und die Photozelle nacheinander die verschiedenen Farbfilter und wartet, bis sich die Spannung jeweils stabilisiert hat. Man trägt die Endspannung  $U$  sowie die Wellenlänge  $\lambda$  und die Frequenz  $f$  des Farbfilters in eine Tabelle ein.

### Beobachtung:

Man erhält folgende Messtabelle.

$\lambda[\text{nm}]$	635	580	520	450	400
$f[*10^{14} \text{ Hz}]$	4,72	5,17	5,77	6,67	7,5
$U[\text{V}]$	0,23	0,41	0,62	0,98	1,35

### Auswertung:

Man wertet die Messergebnisse mit Excel aus und erhält das untenstehende Diagramm samt Ausgleichsgerade. Die gemessene Spannung an der Fotozelle steigt linear mit der Frequenz an. Die Steigung beträgt

$$m = 0,3994 * 10^{-14} \text{Vs}$$

die Austrittsspannung  $U_A$

$$U_A = 1,6649 \text{V}.$$

Das Gesetz für den Fotoeffekt lautet nach Kapitel 2

$$h * f = E_A + e * U.$$

Löst man diese Gleichung nach  $U$  auf, so folgt

$$U = \frac{h}{e} * f - \frac{E_A}{e}.$$

Vergleicht man diese Formel mit der Gleichung, die Excel aus den Messwerten errechnet hat, so ergeben sich folgende Beziehungen.

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

$$U_A = \frac{E_A}{e}.$$

Damit erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit  $E_A$

$$\begin{aligned}
 h &= m \cdot e \\
 &= 0,3994 \cdot 10^{-14} \text{Vs} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \\
 &= 6,39 \cdot 10^{-34} \text{Js}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_A &= U_A \cdot e \\
 &= 1,6649 \text{eV}.
 \end{aligned}$$

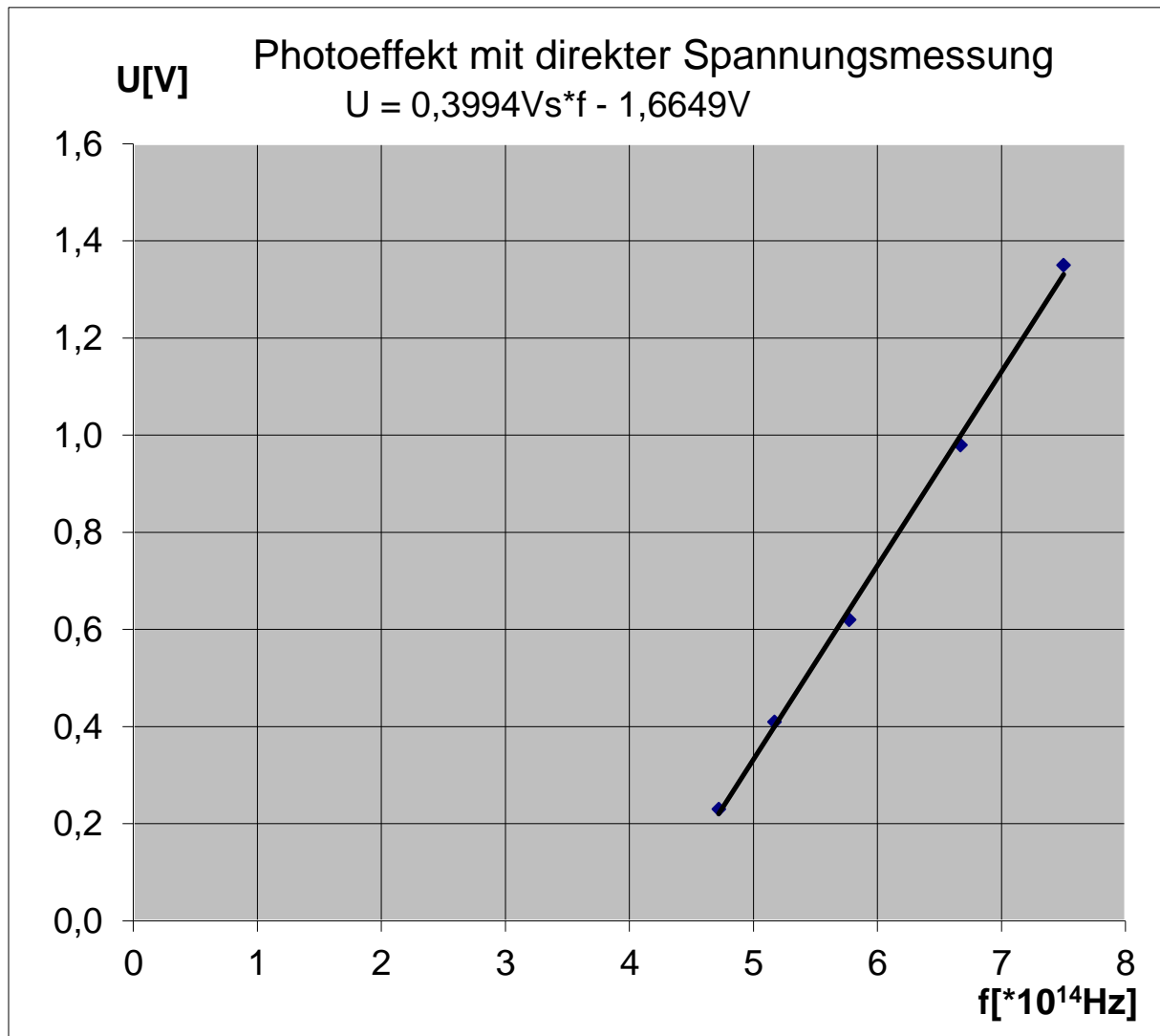


Abb.2: Messkurve

### Versuch 3: Gegenfeldmethode

#### Geräte:

Man benötigt eine Photozelle, eine lichtstarke Halogenlampe mit Trafo, eine Linse mit  $f = 150 \text{ mm}$ , Farbfilter mit verschiedenen Wellenlängen, einen Strommessverstärker im nA-Bereich mit einem Analog- oder Digitalmultimeter als Anzeigegerät, eine Gleichspannungsquelle und ein Voltmeter.

#### Durchführung:

Man baut den Versuch gemäß Abb. 1 auf. Man schaltet den Messverstärker ein. Man hält den Eingang der Photozelle mit der Hand zu und dreht den Messverstärker auf null. Man schaltet die Lampe ein und dunkelt den Raum ab, damit das Umgebungslicht die Messung

nicht verfälscht. Die Linse wird so aufgestellt, dass das Licht der Lampe die Photozelle voll ausleuchtet. Dann stellt man zwischen die Linse und die Photozelle nacheinander die verschiedenen Farbfilter. Man fährt die Gegenspannung bei jedem Farbfilter so weit hoch, bis der Strom null ist. Man trägt die Endspannung  $U$  sowie die Wellenlänge  $\lambda$  und die Frequenz  $f$  des Farbfilters in eine Tabelle ein.

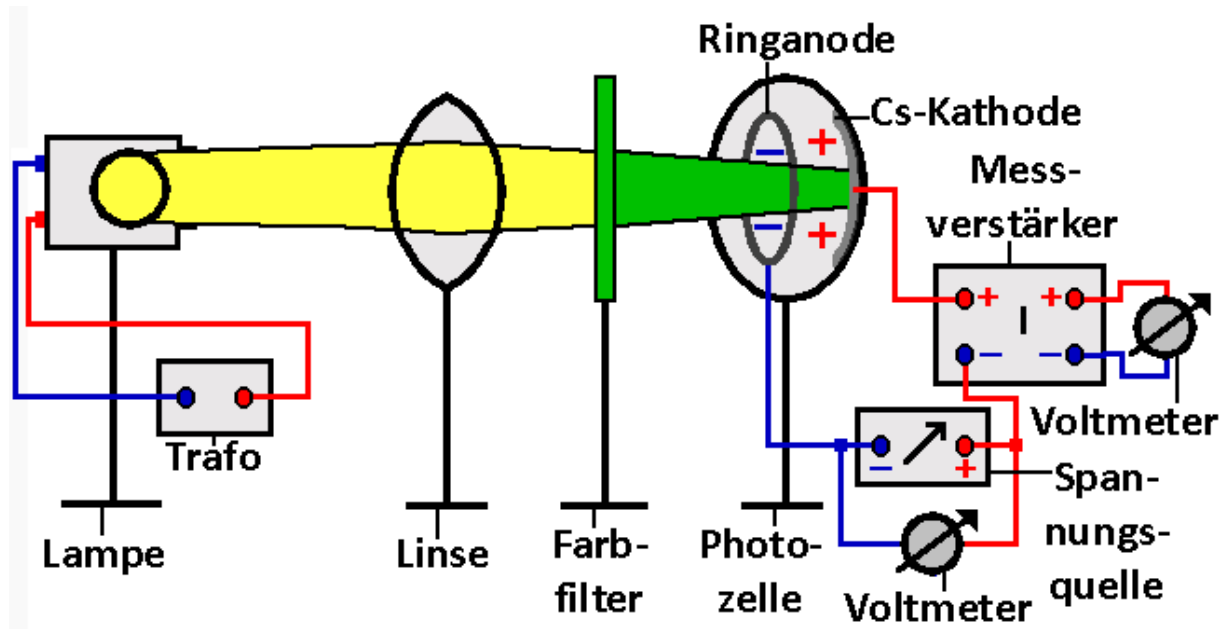


Abb.1: Versuchsaufbau

Ergebnis:

Man erhält folgende Messtabelle.

$\lambda$ [nm]	660	580	520	450	400
$f$ [* $10^{14}$ Hz]	4,55	5,17	5,77	6,67	7,5
$U$ [V]	0,25	0,45	0,70	1,10	1,45

Auswertung:

Man wertet die Messergebnisse mit Excel aus und erhält das untenstehende Diagramm samt Ausgleichsgerade. Die benötigte Gegenspannung an der Fotozelle steigt linear mit der Frequenz an. Die Steigung beträgt

$$m = 0,4137 * 10^{-14}Vs$$

die Austrittsspannung  $U_A$

$$U_A = 1,664V.$$

Mit den gleichen Überlegungen wie bei der Auswertung zu Versuch 2 erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit  $E_A$

$$\begin{aligned} h &= m * e \\ &= 0,4137 * 10^{-14}Vs * 1,6 * 10^{-19}C \end{aligned}$$

$$= 6,62 * 10^{-34} Js$$

$$E_A = U_A * e$$

$$= 1,664 eV.$$

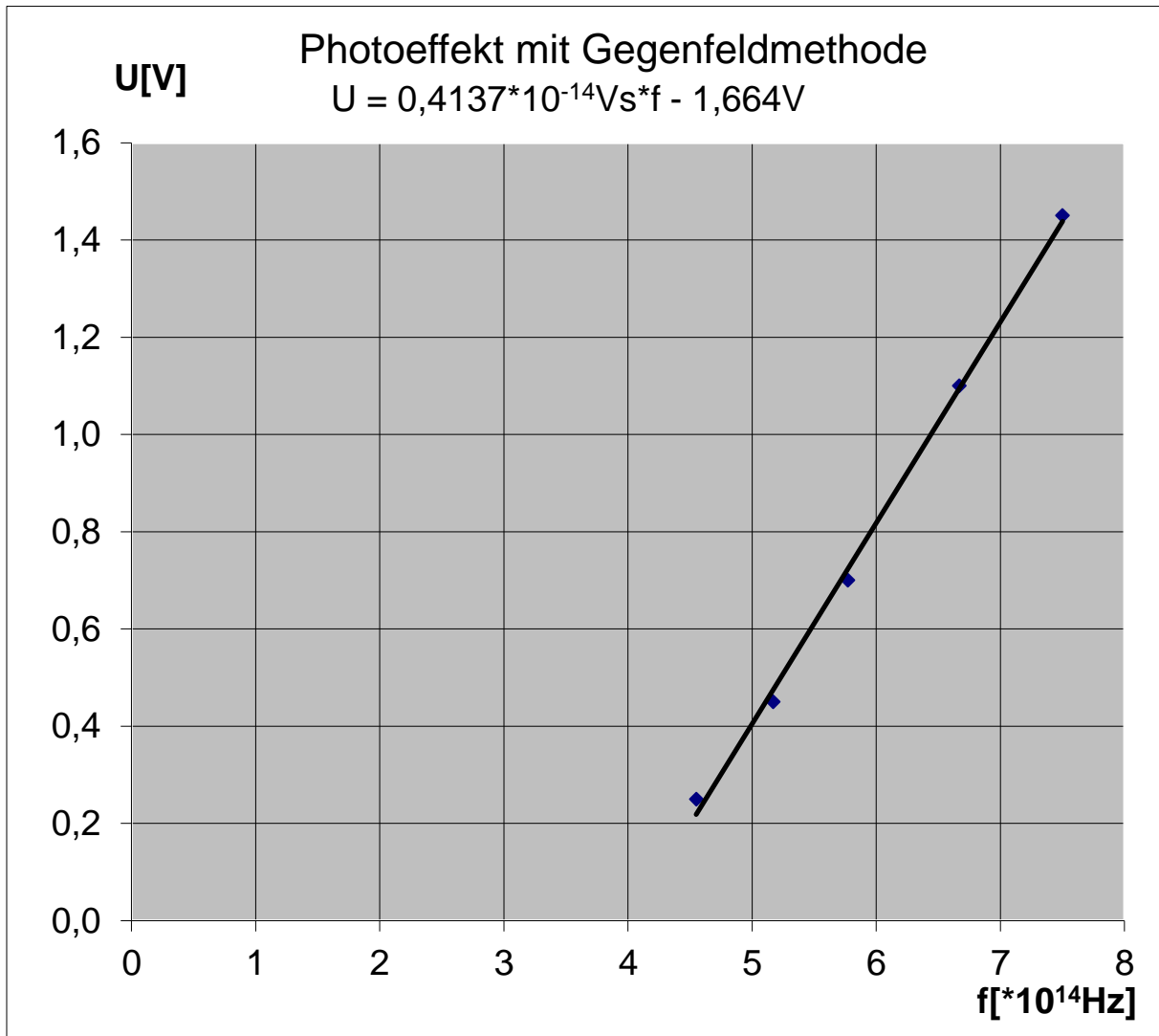


Abb.2: Messkurve

#### Versuch 4: Direkte Spannungsmessung mit LEDs

##### Geräte:

Man benötigt eine Photozelle, mehrere LEDs mit verschiedenen Wellenlängen, eine Konstantstromquelle (s. Anhang B), eine Gleichspannungsquelle, eine Linse mit  $f = 150$  mm, einen Spannungsmessverstärker mit einem Analog- oder Digitalmultimeter als Anzeigergerät.

##### Durchführung:

Man baut den Versuch gemäß Abb. 1 auf. Man schaltet den Messverstärker ein. Man hält den Eingang der Photozelle mit der Hand zu und dreht den Messverstärker auf null. Man schaltet die Gleichspannungsquelle und die nachgeschaltete Konstantstromquelle ein und stellt einen Strom  $I = 20$  mA ein. Man dunkelt den Raum ab, damit das Umgebungslicht die Messung nicht verfälscht. Die Linse wird so aufgestellt, dass das Licht der LED die Photozelle voll ausleuchtet. Man wartet, bis sich die Spannung jeweils stabilisiert hat. Für jeden Teilver-

sich trägt man die Endspannung  $U$  sowie die Wellenlänge  $\lambda$  und die Frequenz  $f$  der LED in eine Tabelle ein.

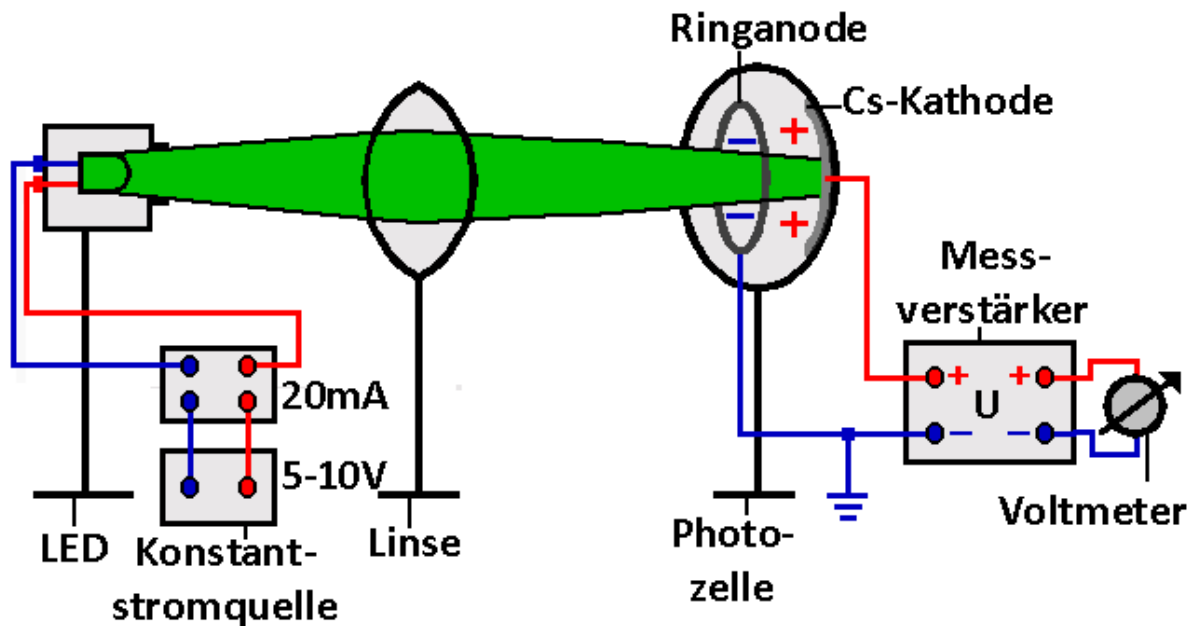


Abb.1: Versuchsaufbau

Ergebnis:

Man erhält folgende Messtabelle.

$\lambda$ [nm]	590	578	546	470	436	403	375
$f$ [* $10^{14}$ Hz]	5,08	5,19	5,49	6,38	6,88	7,41	8,00
$U$ [V]	0,45	0,50	0,60	0,95	1,15	1,35	1,60

Auswertung:

Man wertet die Messergebnisse mit Excel aus und erhält das untenstehende Diagramm samt Ausgleichsgerade. Die gemessene Spannung an der Fotozelle steigt linear mit der Frequenz an. Die Steigung beträgt

$$m = 0,3911 * 10^{-14}Vs$$

die Austrittsspannung  $U_A$

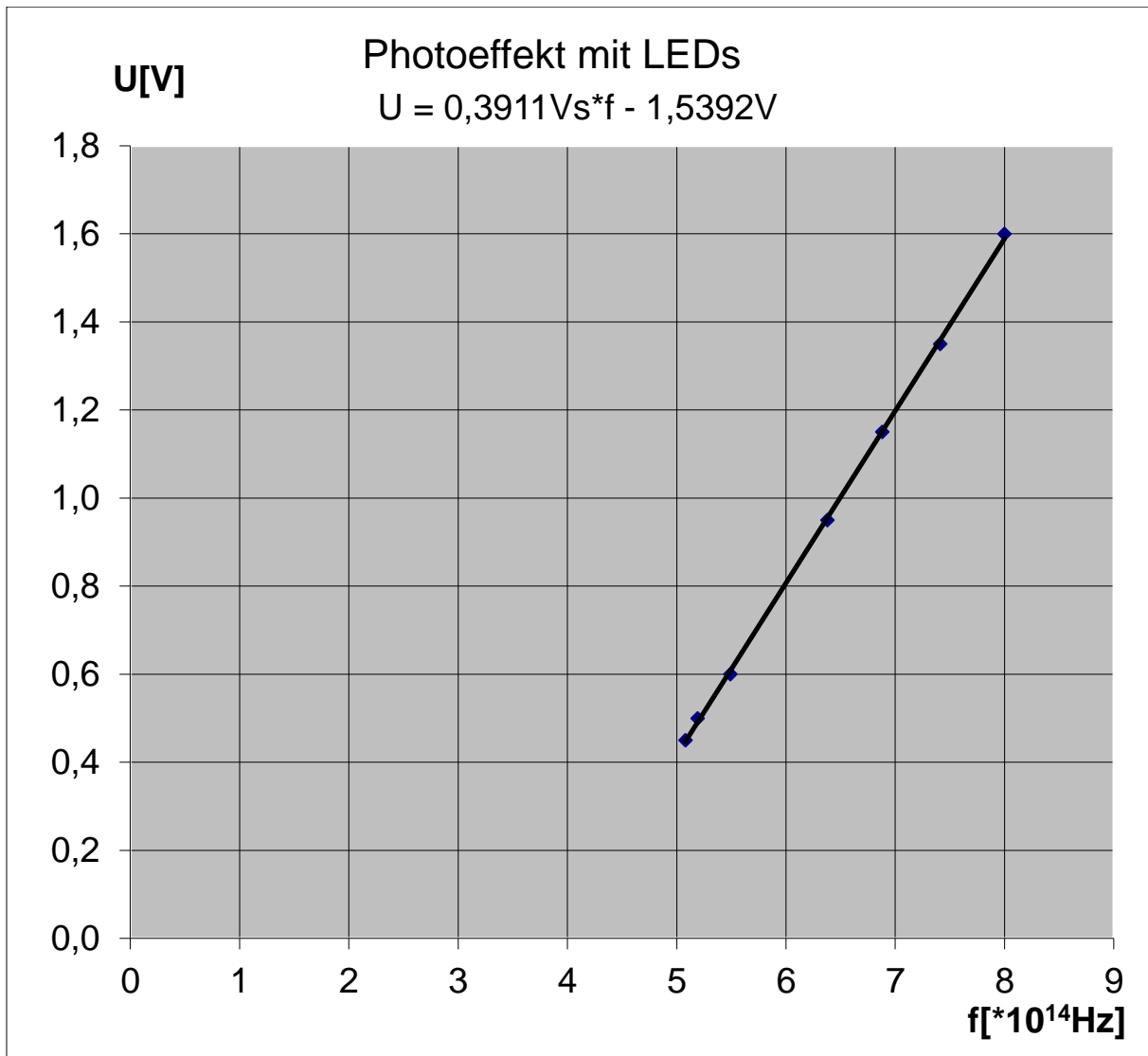
$$U_A = 1,5392V.$$

Mit den gleichen Überlegungen wie bei der Auswertung zu Versuch 2 erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit  $E_A$

$$\begin{aligned} h &= m * e \\ &= 0,3911 * 10^{-14}Vs * 1,6 * 10^{-19}C \\ &= 6,26 * 10^{-34}Js \end{aligned}$$

$$E_A = U_A \cdot e$$

$$= 1,5392\text{eV.}$$



**Abb.2: Messkurve**

### **Versuch 5: Gegenfeldmethode mit LED-Kompaktgerät**

#### Geräte:

Man benötigt den Versuchssatz der Firma Mekruphy und eine Gleichspannungsquelle mit  $U = 12\text{ V}$ .

#### Durchführung:

Man schließt das Grundgerät (s. Abb.1) an die Spannungsquelle an und schaltet sie ein. Man dreht die Helligkeit der LED voll auf. Dann steckt man die LEDs nacheinander in den dafür vorgesehenen Schaft und reguliert die Spannung mit der Grob- und Feineinstellung so weit hoch, bis der Strom null ist. Man notiert sich die Spannung  $U$  sowie die Wellenlänge  $\lambda$  und die Frequenz  $f$  der LED in einer Tabelle.

#### Ergebnis:

Man erhält folgende Messtabelle <sup>4)</sup>.



$\lambda[\text{nm}]$	611	588	525	505	472
$f[*10^{14} \text{ Hz}]$	4,91	5,10	5,71	5,94	6,36
$U[\text{V}]$	0,104	0,201	0,464	0,495	0,687

Auswertung:

Man wertet die Messergebnisse mit Excel aus und erhält das untenstehende Diagramm samt Ausgleichsgerade. Die benötigte Gegenspannung an der Fotozelle steigt linear mit der Frequenz an. Die Steigung beträgt

$$m = 0,3922 * 10^{-14} \text{Vs}$$

die Austrittsspannung  $U_A$

$$U_A = 1,8078 \text{V}.$$

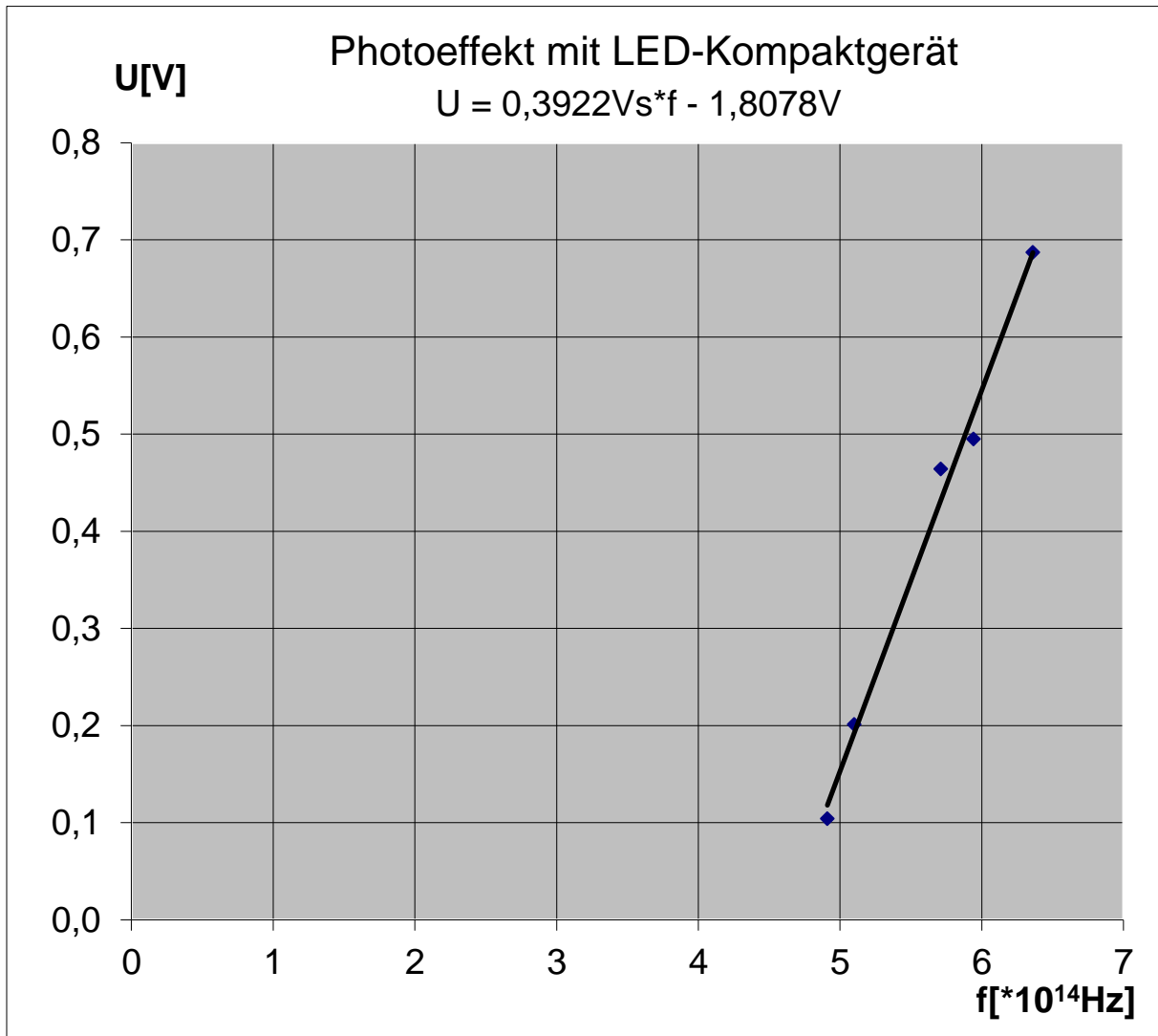
Mit den gleichen Überlegungen wie bei der Auswertung zu Versuch 2 erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit  $E_A$

$$\begin{aligned} h &= m * e \\ &= 0,3922 * 10^{-14} \text{Vs} * 1,6 * 10^{-19} \text{C} \\ &= 6,28 * 10^{-34} \text{Js} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_A &= U_A * e \\ &= 1,8078 \text{eV}. \end{aligned}$$



Abb.1: Kompaktgerät zum Photoeffekt <sup>1)</sup>



**Abb. 2: Messkurve**

## Versuch 6: Simulation

### Teilversuch 1:

Im ersten Teil des Versuches ermittelt man die Abhängigkeit der Lampenspannung  $U$  von der Frequenz  $f$ .

### Aufbau:

Man benötigt die Simulationsschaltung zum Fotoeffekt (s. Anhang A), eine regelbare geglättete Gleichspannungsquelle mit  $U = 12$  V, ein Voltmeter, ein Digitalvoltmeter mit Frequenzfunktion und sechs Kabel. Als Anzeigegerät kann man auch cassy oder cassy mobile benutzen mit der Timerbox als Frequenzmesser. Abb. 1 zeigt den kompletten Versuchsaufbau mit cassy mobile.

### Durchführung:

Man schaltet die Spannungsquelle und die Messgeräte ein. Man legt den Schalter  $S1$  auf T, den Schalter  $S2$  auf  $U_2$  und dreht das Potentiometer PT ganz nach rechts, so dass es auf der höchsten Frequenz steht. Man stellt die Betriebsspannung so ein, dass das Voltmeter ungefähr  $U = 4,5$  V anzeigt. Man dreht das Potentiometer PT ganz zurück und erhöht mit ihm in etwa gleichen Schritten von 50 Hz die Frequenz von 100 Hz bis zum höchsten Wert. Für jede

Frequenz misst man die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$ , in dem man mit dem Schalter zwischen beiden wechselt. Die Werte für die Frequenz  $f$  und die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  notiert man sich in einer Tabelle. Mit cassy mobile kann man die einzelnen Messwerte jeweils durch Drücken der OK-Taste speichern. Man erhöht mit dem Potentiometer PT zunächst in der Schalterstellung  $U_1$  die Frequenz in Schritten von 50 Hz von 100 Hz bis zum höchsten Wert und erniedrigt sie anschließend in der Stellung  $U_2$  in gleichen Schritten bis auf 100 Hz. So erhält man zwei Messreihen, die man in cassy mobile getrennt auswerten kann.

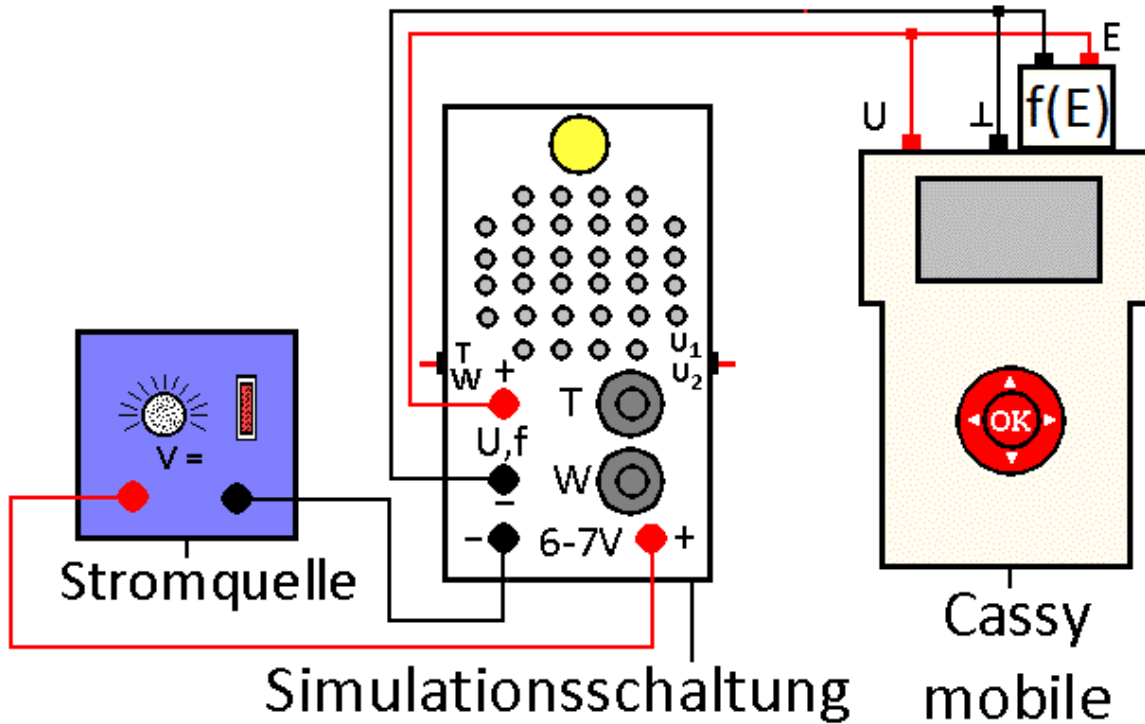


Abb. 1: Versuchsaufbau

Beobachtung:

Je höher die Frequenz, umso heller leuchtet die Lampe. Benutzt man ein Digitalvoltmeter und ein Multimeter mit Frequenzfunktion, so misst man die Werte in folgender Tabelle.

<b>f[Hz]</b>	100	151	199	250	302	351	402	450	500	551	592
<b><math>U_1</math>[V]</b>	-0,05	0,35	0,76	1,20	1,64	2,04	2,47	2,84	3,16	3,41	3,62
<b><math>U_2</math>[V]</b>	0,67	1,08	1,49	1,93	2,35	2,77	3,19	3,56	3,88	4,14	4,34

Mit cassy mobile erhält man folgende Messtabellen für  $U_1$

<b>f[Hz]</b>	100	151	203	253	301	353	396	448	501	554	592
<b><math>U_1</math>[V]</b>	0,01	0,37	0,79	1,24	1,65	2,08	2,42	2,86	3,18	3,45	3,61

und für  $U_2$ .

<b>f[Hz]</b>	100	151	202	251	300	348	399	446	499	549	592
<b><math>U_2</math>[V]</b>	0,71	1,08	1,51	1,95	2,36	2,77	3,19	3,53	3,91	4,16	4,36

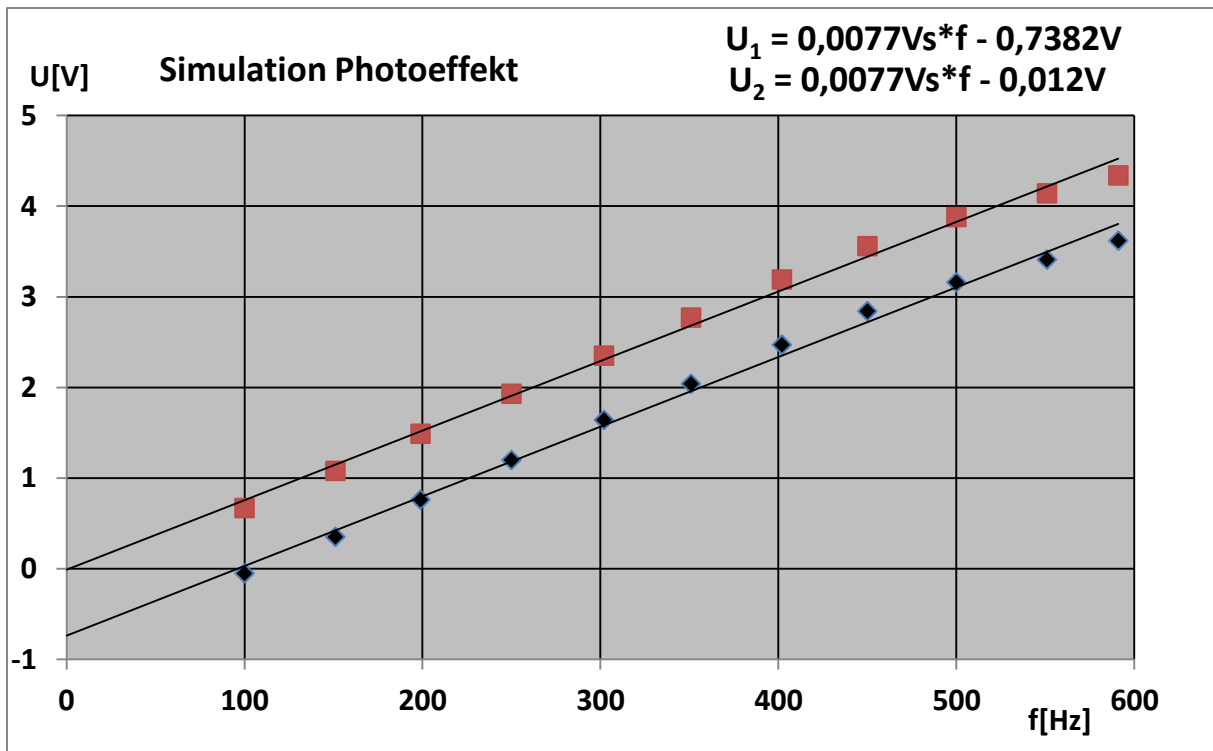


Abb.2: Messkurven mit Digitalmultimeter

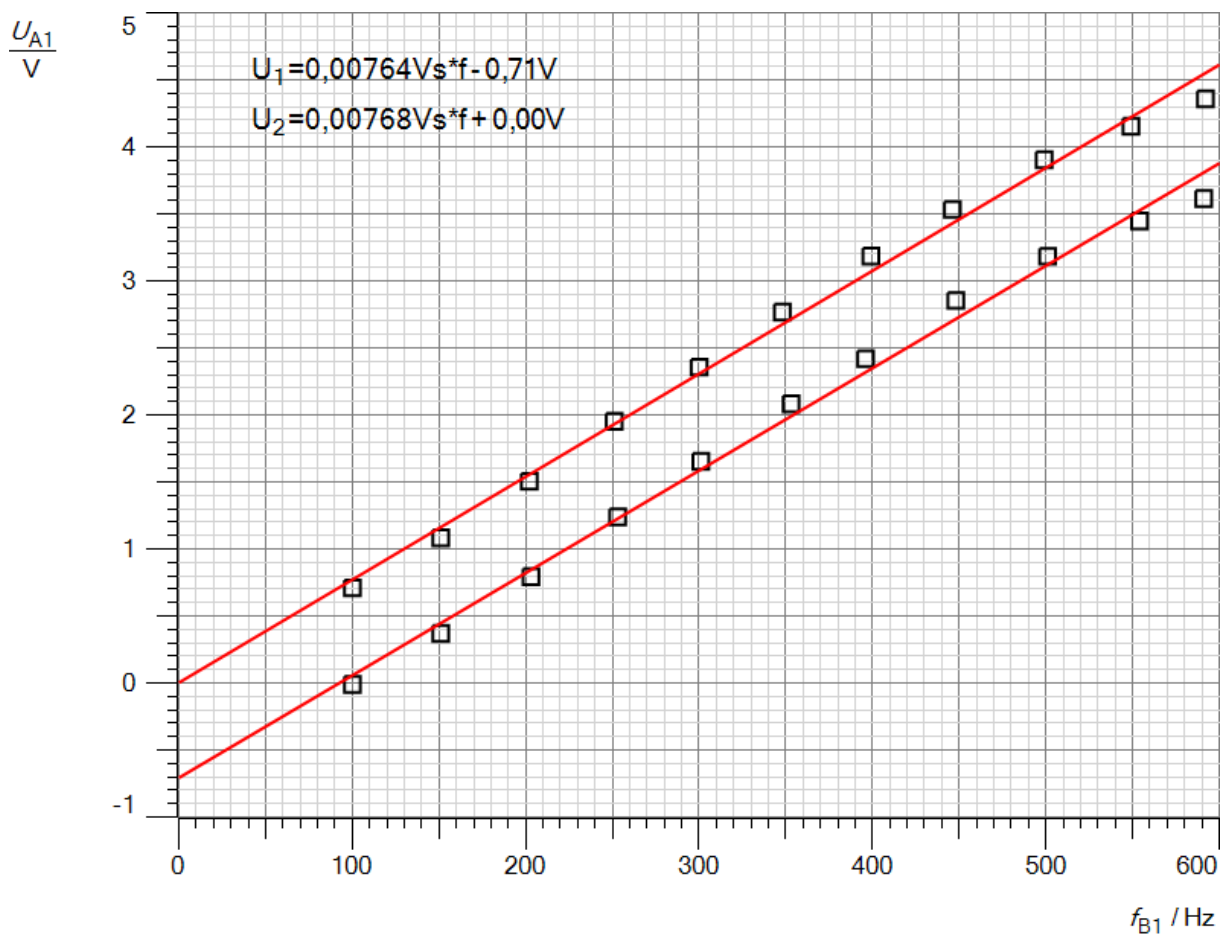


Abb.3: Messkurven mit cassy

### Auswertung:

Wertet man die Messwerte der ersten Messung mit Excel aus, so erhält man das Diagramm in Abb. 2 mit folgenden Ausgleichsgeraden für  $U_1$  und  $U_2$ :

$$U_1 = 0,0077Vs * f - 0,7382V$$

$$U_2 = 0,0077Vs * f - 0,012V.$$

Mit cassy mobile ergibt sich die Messkurve in Abb. 3 mit den Ausgleichsgeraden:

$$U_1 = 0,00764Vs * f - 0,71V$$

$$U_2 = 0,00768Vs * f + 0,00V.$$

Bei beiden Messungen steigt die Spannung  $U_1$ , die mit der kinetischen Energie der Elektronen beim Fotoeffekt übereinstimmt, linear mit der Frequenz  $f$  an. Der negative U-Achsenabschnitt entspricht der Durchlassspannung der Diode und damit der Austrittsarbeit. Die Spannung  $U_2$ , die der gesamten Energie der Elektronen bzw. Photonen beim Fotoeffekt gleichkommt, verläuft proportional zur Frequenz  $f$ . Damit durch den Widerstand  $R = 1M\Omega$ , der die Fozelle symbolisiert, ein Strom fließen kann, muss die Spannung  $U_1$  größer als null sein. Dazu muss der Multivibrator mit einer Mindestfrequenz  $f_0$  schwingen, für die man aus den  $U_1$ -Geradengleichungen in Abb. 2 und Abb.3 erhält

$$f_0 = \frac{0,7382V}{0,0077Vs} = 96 \text{ Hz}$$

$$f_0 = \frac{0,71V}{0,00764Vs} = 93 \text{ Hz.}$$

Bei den Messungen wechselt die Spannung  $U_1$  bei etwa  $f_0 = 100 \text{ Hz}$  das Vorzeichen von Plus nach Minus.

### Teilversuch 2:

Hat man cassy mobile oder ein anderes Messwerterfassungssystem zur Verfügung, so kann man den zeitlichen Verlauf der beiden Spannung  $U_1$  und  $U_2$  für jede Frequenz aufzeichnen.

#### Aufbau:

Man benutzt den Versuchsaufbau nach Abb.1.

#### Durchführung:

Man legt den Schalter S1 auf T und den Schalter S2 auf  $U_1$ . Dann verbindet man die Spannungsquelle mit dem Spannungseingang der Simulationsschaltung und stellt bei maximaler Frequenz die gleiche Spannung wie im ersten Teilversuch ein, damit man die Ergebnisse beider Messungen miteinander vergleichen kann. An Cassy mobile wählt man automatische Messwertaufnahme und eine Messzeit  $t = 20 \text{ ms}$ . Außerdem muss die Spannungsmessung auf Momentanwerte stehen. Man kann das Signal zusätzlich mit etwa  $U_T = 1 \text{ V}$  triggern, damit beide Messkurven phasengleich verlaufen. Man wählt mit dem Potentiometer PT eine beliebige Frequenz und startet die Messung an der Messbuchse für die Spannungen  $U_1$  bzw.  $U_2$ . Sie ist beide Male nach kurzer Zeit beendet.

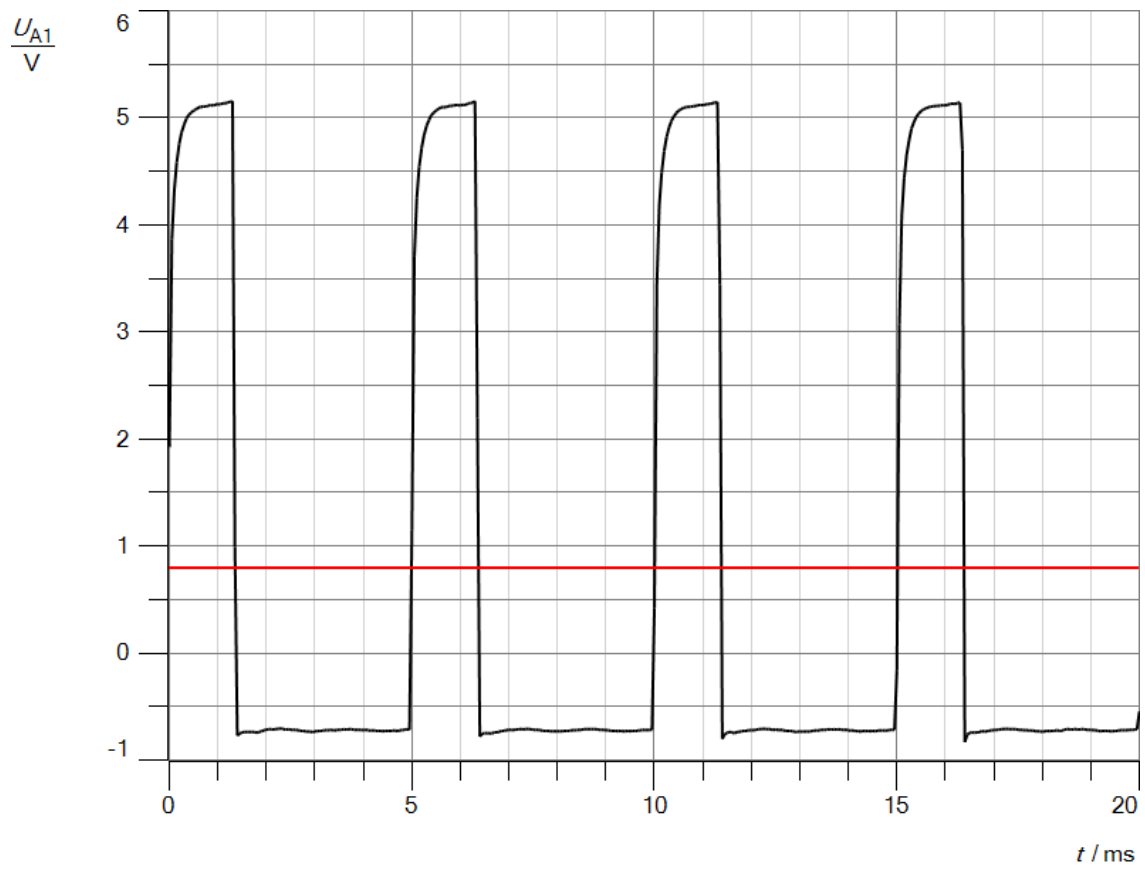
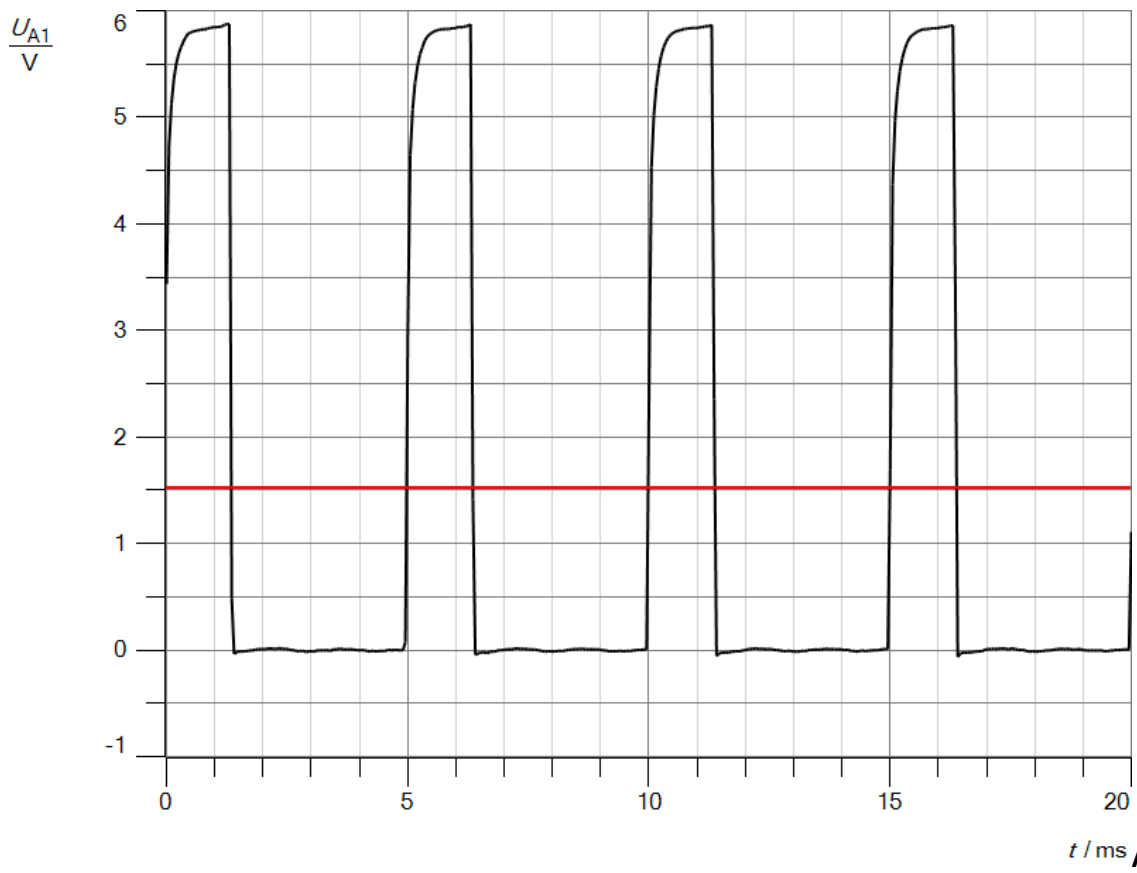


Abb. 2a: Verlauf der Spannung  $U_1$



2b: Verlauf der Spannung  $U_2$

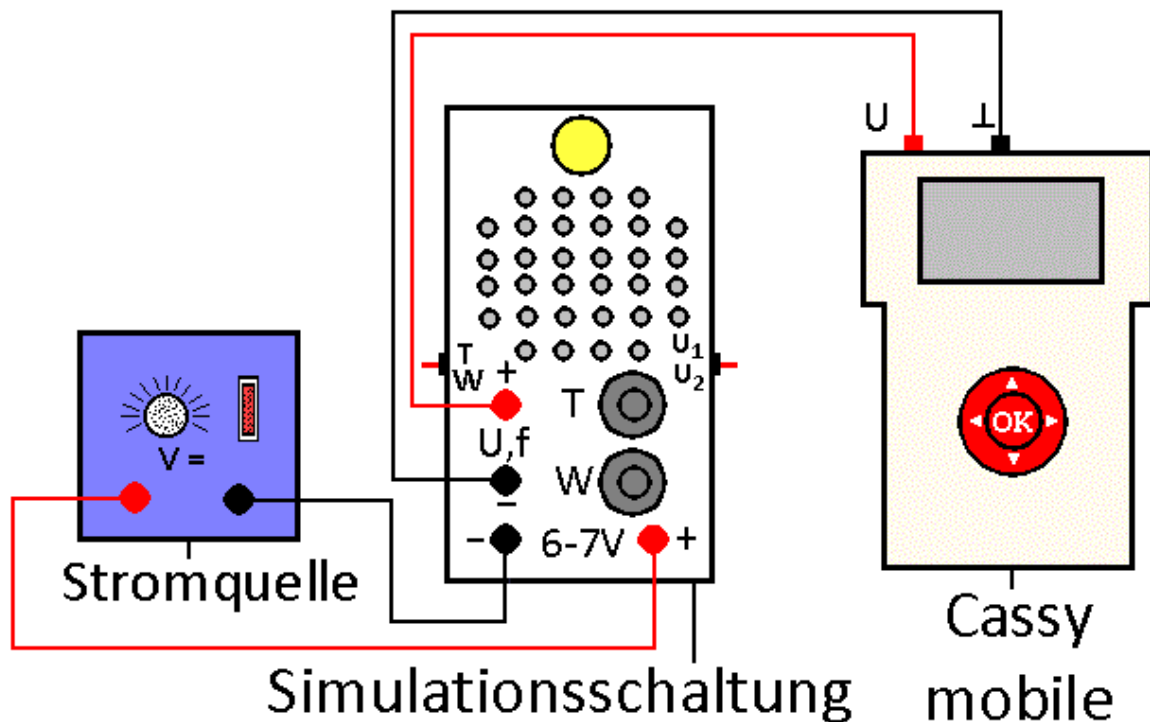


Abb.1: Versuchsaufbau

Beobachtung:

Man erhält z. B. die Messkurven in Abb.2a und 2b.

Auswertung:

Die Spannungsimpulse verlaufen fast rechteckförmig. Die  $U_1$ -Kurve ist gegenüber der  $U_2$ -Kurve um ungefähr 0,7 V nach unten verschoben. Ansonsten zeigen beide den gleichen Verlauf. Der Multivibrator schaltet die Lampe und den Lautsprecher für die Zeit  $t_E = 1,37$  ms ein und für die Zeit  $t_A = 3,63$  ms aus. Man erhält für die Frequenz  $f$

$$f = \frac{1}{(t_E + t_A)} = \frac{1}{(1,37 + 3,63)\text{ms}} = 200 \text{ Hz.}$$

Die Mittelwerte der Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  entsprechen den roten Linien in Abb.1a und Abb.1b. Sie betragen

$$U_1 = 0,80\text{V.}$$

$$U_2 = 1,52\text{V.}$$

Sie stimmen sehr gut mit den Messwerten in den Messtabellen aus Versuch 1 für diese Frequenz überein.

Teilversuch 3:

Aufbau:

Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Teilversuch 1.

Durchführung:

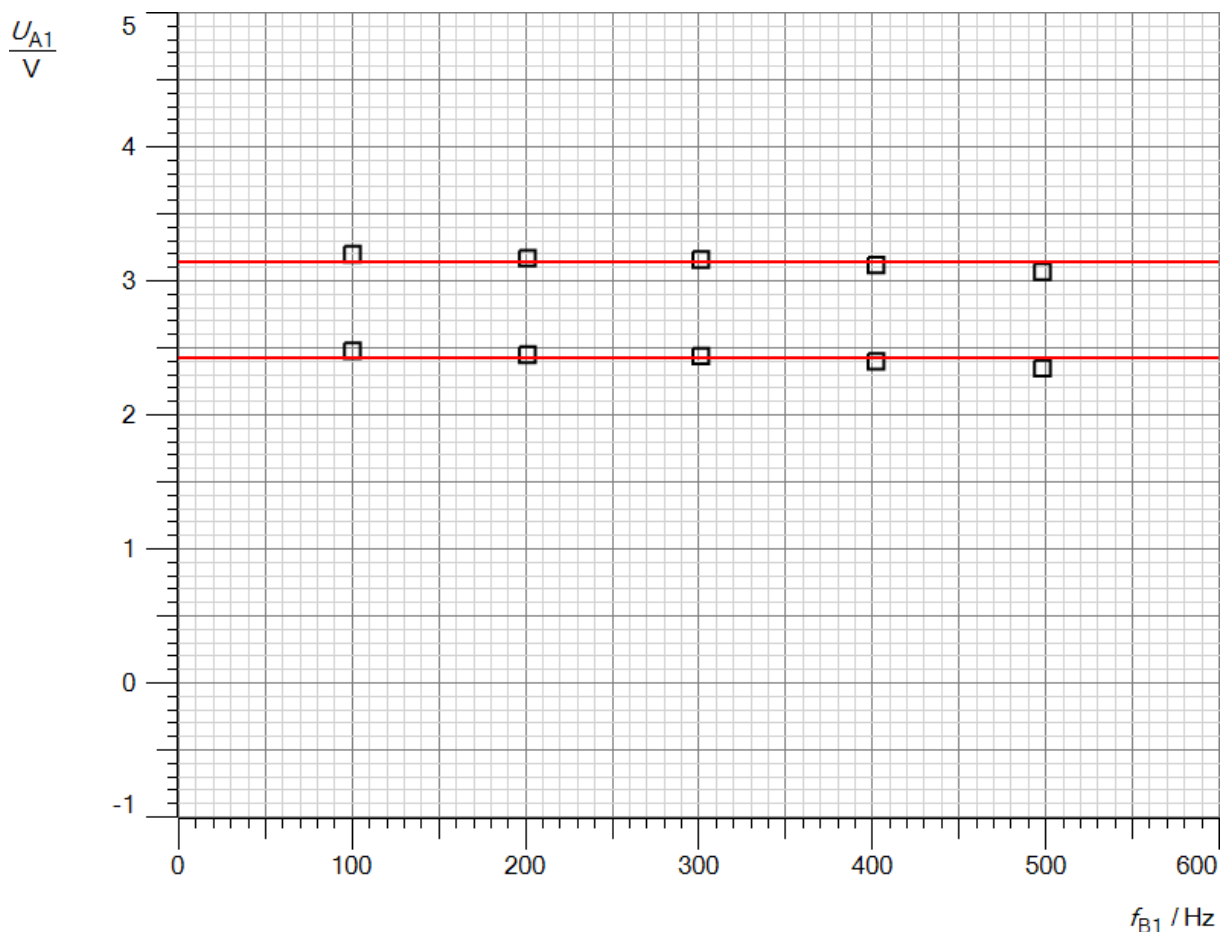
Man schaltet die Spannungsquelle und die Messgeräte ein. Man legt den Schalter S1 auf W, den Schalter S2 auf U<sub>2</sub> und dreht das Potentiometer PW ganz nach rechts, so dass es auf der höchsten Frequenz steht. Man stellt die Betriebsspannung so ein, dass das Voltmeter ungefähr U = 3 V anzeigt. Man dreht das Potentiometer PW ganz zurück und erhöht mit ihm in etwa gleichen Schritten von 100 Hz die Frequenz von 100 Hz bis auf 500 Hz. Für jede Frequenz misst man die Spannungen U<sub>1</sub> und U<sub>2</sub>, in dem man mit dem Schalter zwischen beiden wechselt. Die Werte für die Frequenz f und die Spannungen U<sub>1</sub> und U<sub>2</sub> notiert man sich in einer Tabelle. Mit cassy mobile kann man die einzelnen Messwerte jeweils durch Drücken der OK-Taste speichern. Man erhöht mit dem Potentiometer PW zunächst in der Schalterstellung U<sub>1</sub> die Frequenz in Schritten von 100 Hz von 100 Hz bis auf 500 Hz und erniedrigt sie anschließend in der Stellung U<sub>2</sub> in gleichen Schritten bis auf 100 Hz. So erhält man zwei Messreihen, die man in cassy mobile getrennt auswerten kann.

**Beobachtung:**

Die Lampe leuchtet unabhängig von der Frequenz immer gleich hell und zwar etwa mit der halben maximalen Helligkeit aus Versuch 1. Man erhält mit den Digitalmultimetern folgende Messtabelle

<b>f[Hz]</b>	100	201	301	402	498
<b>U<sub>1</sub>[V]</b>	2,48	2,45	2,44	2,40	2,35
<b>U<sub>2</sub>[V]</b>	3,20	3,17	3,16	3,12	3,07

und mit cassy mobile folgende Messkurve.



**Abb.1: Messkurve**



#### Auswertung:

Die Spannung am Messwiderstand bleibt nahezu konstant und ist unabhängig von der Frequenz, da die Elektronen durch eine symmetrische Schwingung angeregt werden. (s. Kapitel Theorie). Die kleinen Abweichungen werden durch die Toleranzen der elektronischen Bauteile in beiden Zweigen verursacht, so dass die Ein- und Ausschaltzeiten des Multivibrators nicht genau gleich lang sind. Dieses Ergebnis würde man beim Fotoeffekt erhalten, wenn die Elektronen im Metall durch die elektromagnetische Welle kontinuierlich wie bei einer Schwingung angeregt würden.

#### Teilversuch 4:

##### Aufbau:

Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Teilversuch 2.

##### Durchführung:

Man legt den Schalter S1 auf W und den Schalter S2 auf U<sub>1</sub>. Dann verbindet man die Spannungsquelle mit dem Spannungseingang der Simulationsschaltung und stellt bei maximaler Frequenz die gleiche Spannung wie im dritten Teilversuch ein, damit man die Ergebnisse beider Messungen miteinander vergleichen kann. An Cassy mobile wählt man automatische Messwertaufnahme und eine Messzeit t = 20 ms. Außerdem muss die Spannungsmessung auf Momentanwerte stehen. Man kann das Signal zusätzlich mit etwa U<sub>T</sub> = 1 V triggern, damit beide Messkurven phasengleich verlaufen. Man wählt mit dem Potentiometer PW eine beliebige Frequenz und startet die Messung an der Messbuchse für die Spannungen U<sub>1</sub> bzw. U<sub>2</sub>. Sie ist für beide Messungen nach kurzer Zeit beendet.

##### Beobachtung:

Man erhält für U<sub>1</sub> die Messkurve in Abb.1. Die Kurve für U<sub>2</sub> zeigt den gleichen Verlauf, ist nur um etwa 0,7 V nach oben verschoben. Bei allen Frequenzen sind die Ein- und Ausschaltzeiten stets fast gleich.

##### Auswertung:

Die Schwingung verläuft nahezu symmetrisch, d.h. Ein- und Ausschaltzeit sind fast gleich. Die Energie wird wie in einer Schwingung symmetrisch auf die Elektronen übertragen. Die Einschaltzeit beträgt t<sub>E</sub> = 1,72 ms, die Ausschaltzeit t<sub>A</sub> = 1,58 ms. Man erhält für die Frequenz

$$f = \frac{1}{(t_E + t_A)} = \frac{1}{(1,72 + 1,58)\text{ms}} = 303 \text{ Hz.}$$

Der Mittelwert der Spannung U<sub>1</sub> entspricht der roten Linie in Abb.1 und beträgt

$$U = 2,43\text{V,}$$

in sehr guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Teilversuch 3.

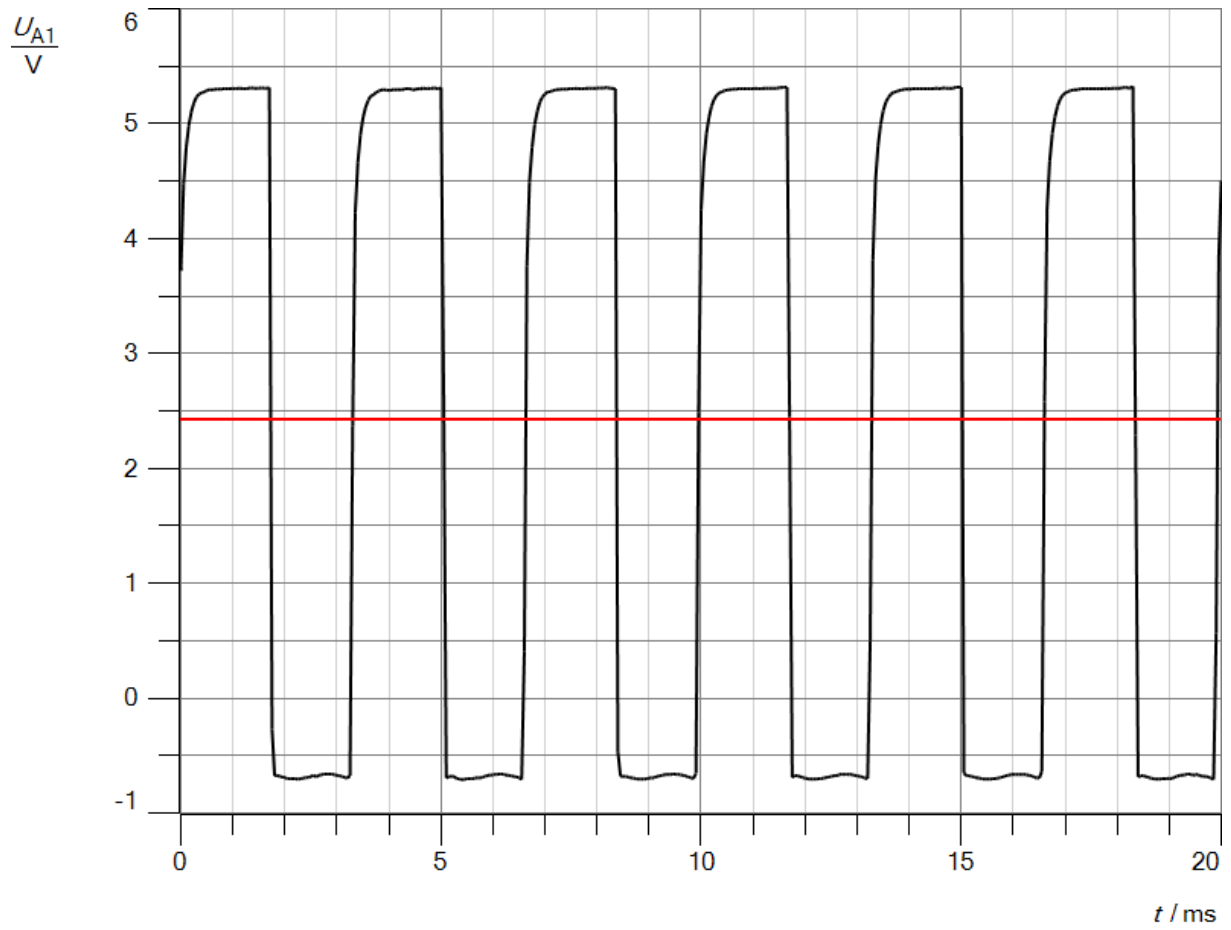


Abb.1: Messkurve für  $U_1$

## 4. Anhang

### Anhang A

#### Schaltplan:

Um die Vorgänge beim Fotoeffekt zu simulieren, muss man mit einer elektrischen Schaltung stoßweise Energie auf die Elektronen in einer Lampe oder einem Messwiderstand übertragen. Die benötigte Schaltung zeigt Abb.1.

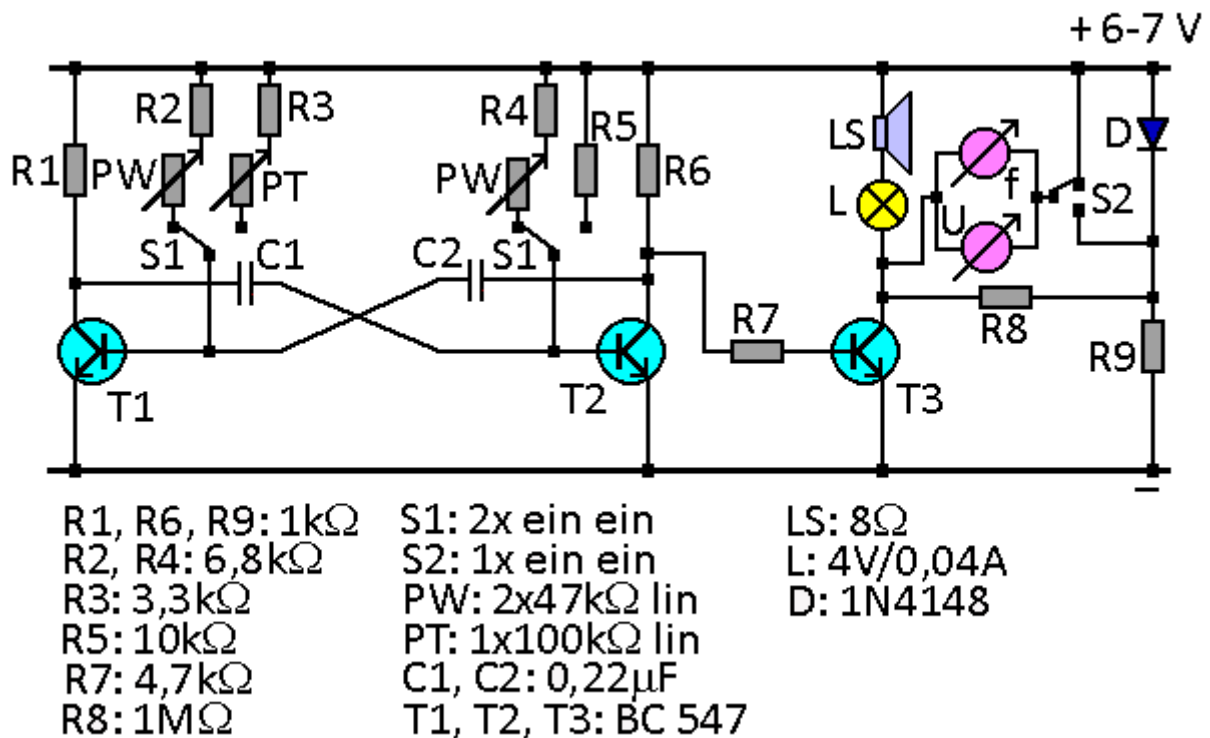


Abb.1: Schaltplan

Sie setzt sich aus drei Teilen zusammen, erstens einem Multivibrator, zweitens einer Anzeigeeinheit aus einem Treibertransistor für eine Lampe, einen Lautsprecher, ein Voltmeter und ein Frequenzmessgerät sowie drittens aus einer Diode mit zwei Widerständen.

#### Funktion:

Ein Multivibrator erzeugt an den Kollektorausgängen seiner beiden Transistoren T1 und T2 eine gegenläufige rechteckförmige Wechselspannung. Die beiden Transistoren schalten sich wechselseitig ein und aus. Ist T1 durchgeschaltet, so sperrt T2 und umgekehrt. Die Durchschaltzeiten bzw. Sperrzeiten der beiden Transistoren werden durch die Basiswiderstände und die Kondensatoren bestimmt. In der Schaltung kann man mit dem Schalter S1 zwischen zwei verschiedenen Modi wählen. Steht der Schalter S1 rechts, so sind die beiden Basiswiderstände unterschiedlich groß. Der Basiswiderstand R5 an T2 hat einen festen Wert. Die Durchschaltzeit  $t_1$  von T1 und damit die Sperrzeit von T2 bleibt gleich. Der Basiswiderstand an T1 lässt sich mit dem Potentiometer PT variieren. Dreht man am Potentiometer PT, so verändert man die Einschaltzeit  $t_2$  von T2 und damit die Sperrzeit von T1. Verkürzt man sie, so schaltet T2 pro Sekunde häufiger für die Zeit  $t_1$  durch, die Frequenz steigt. Das mittlere Potential an seinem Ausgang sinkt. Die Spannung zwischen ihm und dem Pluspol steigt. Sie wird durch T3 verstärkt und invertiert, so dass er mit T1 im Takt schaltet. Die Lampe leuchtet heller. Die Ausgangsspannung am Kollektor von T3 simuliert die wirklichen teilchenartigen Vorgänge beim Fotoeffekt an der Metalloberfläche durch die auftreffenden elektromagneti-

schen Wellen (s. Kapitel Theorie). Es wird mit unterschiedlichen Frequenzen stoßweise Energie in die Elektronen des Metalls bzw. der Lampe und des hochohmigen Widerstandes gepumpt. Steht der Schalter S1 in der linken Position, so sind die beiden Basiswiderstände an T1 und T2 untereinander stets gleich groß, aber ihr Wert kann mit dem Potentiometer PW variiert werden. Die Ein- und Ausschaltzeiten der beiden Transistoren sind gleich lang, lassen sich aber mit dem Potentiometer PW verändern. Die Elektronen im Messwiderstand werden zu gleichmäßigen Schwingungen unterschiedlicher Frequenz angeregt. Dieser Fall simuliert die Vorgänge, die sich abspielen würden, wenn beim Fotoeffekt die klassische Wellenvorstellung zum Tragen käme. Mit diesem Schaltungsaufbau kann man folglich das Teilchen- und das Wellenmodell simulieren. Das ist beim realen Versuch zum Fotoeffekt natürlich nicht möglich.

Der zweite Teil der Schaltung macht die Frequenz und die Energie der angeregten Elektronen über den Lautsprecher hörbar und über die Lampe sichtbar. Da der Multivibrator nur wenig belastet werden darf, damit er sauber oszilliert, benötigt man den Treibertransistor T3. Er schwingt mit T1 im Takt und entspricht dem Messverstärker beim Versuch zum Fotoeffekt. Mit dem Frequenzmesser bzw. dem Voltmeter kann man die Frequenz bzw. die Energie der Elektronen genau messen. Mit dem Schalter S2 wechselt man zwischen der Gesamtenergie und der kinetischen Energie. Das ist beim Realversuch zum Fotoeffekt nicht möglich. Dort wird nur die kinetische Energie der Elektronen gemessen. So gesehen bietet der Simulationsversuch einen Vorteil.

Die Reihenschaltung aus der Diode und dem hochohmigen Widerstand  $R_1 = 1\text{M}\Omega$  stellt die eigentliche Fotozelle dar. Die Diode sorgt für die Austrittsarbeit. Damit sie dauerhaft eingeschaltet ist, muss sie über den zweiten Widerstand  $R_2 = 1\text{k}\Omega$  vorgespannt werden.

#### Aufbau:

Die Schaltung kann man aus Einzelelementen eines Elektronikbaukastens zusammenbauen. Es handelt sich um gängige Bauteile. Am besten verlötet man sie auf einer Lochrasterplatine und baut die Komponenten in ein Gehäuse ein. So erhält man einen übersichtlichen Versuchsaufbau. Die Verschaltung auf der Platine zeigt Abb. 2. Man benötigt folgende Bauteile:

- 3 Widerstände 1 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Widerstand 3,3 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Widerstand 4,7 k $\Omega$ , 0,25 W
- 2 Widerstände 6,8 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Widerstand 10 k $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Widerstand 1 M $\Omega$ , 0,25 W
- 1 Potentiometer 100 k $\Omega$  lin
- 1 Doppelpotentiometer 2x47 k $\Omega$  lin
- 1 Diode 1N4148
- 3 Transistoren, etwa BC 547C o. ä.
- 2 Kondensatoren 0,22  $\mu\text{F}$ , 16 V
- 1 Lochrasterplatine 35x53 mm, RM 2,52 mm
- 1 Gehäuse 128x60x45 mm
- 1 Mikrowechselschalter 1x ein ein
- 1 Mikrodoppelwechselschalter 2x ein ein
- 1 Kleinlautsprecher 8  $\Omega$
- 1 Lampenfassung
- 1 Glühbirnchen 4V/0,04A

- 2 Drehknöpfe
- 2 rote Telefonbuchsen
- 2 schwarze Telefonbuchsen
- 4 Lötösen für die Telefonbuchsen
- 5 Schrauben 10mmx3mm
- 5 Muttern 3mm
- Schaltlitze
- Lötmaterial

Zunächst verlötet man die Bauteile auf der Platine nach Abb. 2. Dann bohrt man sich in den Deckel des Gehäuses für die Lampenfassung ein 10 mm-Loch, für die Schalter 6 mm- Löcher, für die Telefonbuchsen 8 mm- Löcher, für die Potentiometer 10 mm Löcher und für die Schrauben und die Schallabstrahlung des Lautsprechers 3 mm-Löcher. Eine mögliche Anordnung der Komponenten auf dem Gehäusedeckel zeigt Abb.3. Man setzt die einzelnen Teile in die dafür vorgesehenen Löcher ein, verschraubt sie am Gehäusedeckel und verlötet sie mit den Litzen auf der Platine bzw. über Zusatzlitzen untereinander nach Abb.3. Will man die Drehrichtung der Potentiometer umkehren, so benutzt man statt der rechten die linken Anschlüsse. Damit ist das Gerät fertig.

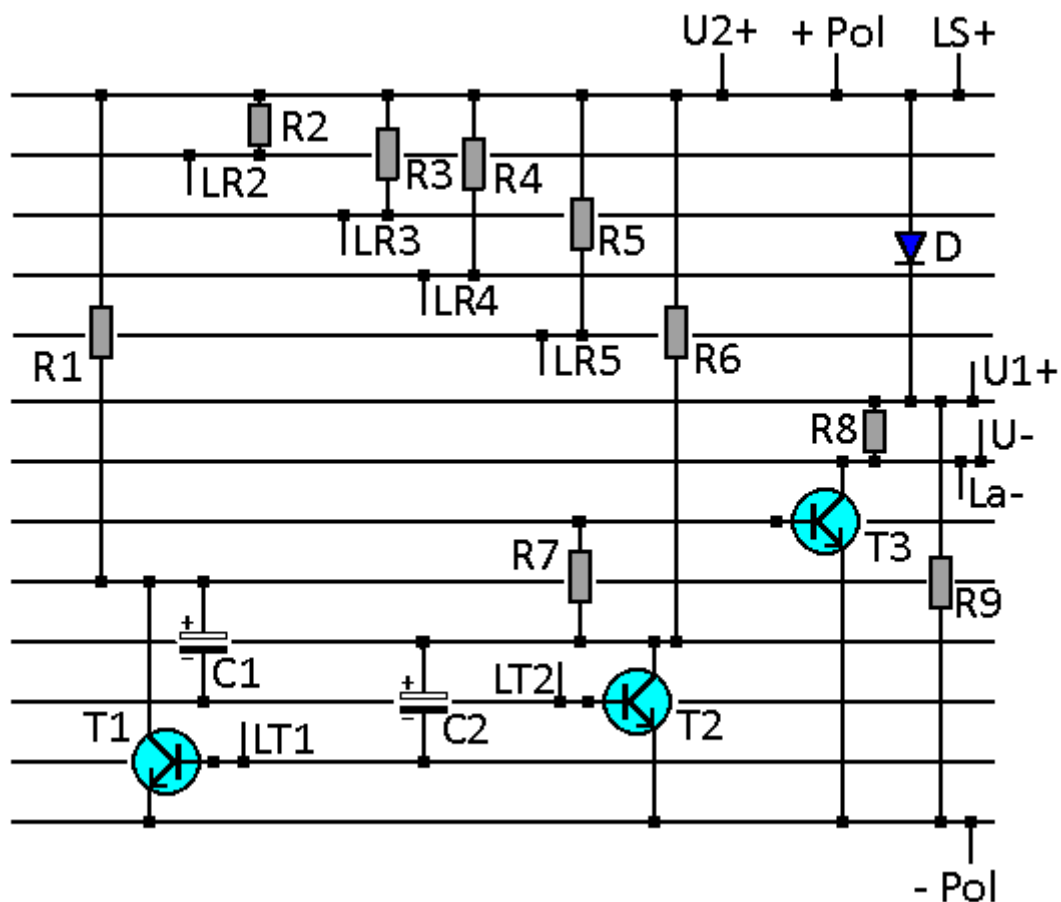


Abb.2: Platine

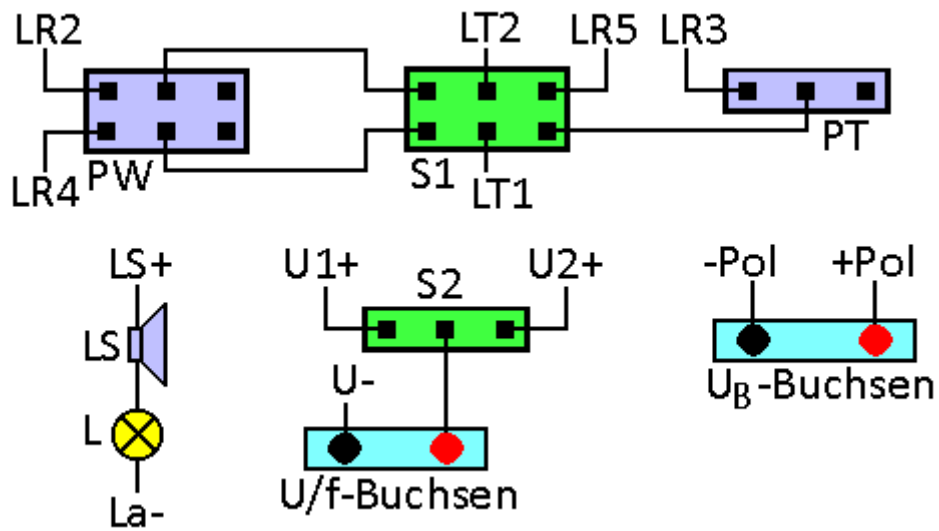


Abb.3: Verkabelung der Komponenten



Abb. 4: Vorderansicht

## Anhang B

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

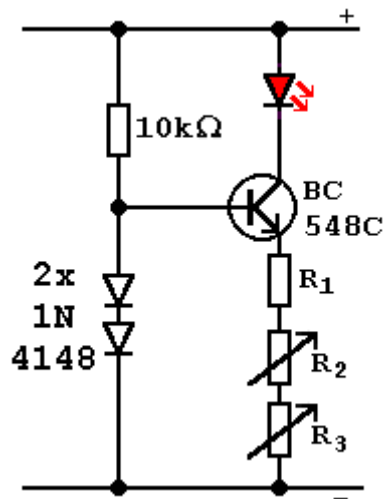


Abb.1: Schaltplan

An den beiden Dioden fällt zusammen eine Spannung von

$$U_1 = 1,4V$$

ab, an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors

$$U_2 = 0,7V.$$

Es verbleibt zwischen Emitter und Minuspol eine Spannung

$$\begin{aligned} U_3 &= 1,4V - 0,7V \\ &= 0,7V. \end{aligned}$$

Um mit ihr einen Strom von

$$I_1 = 20mA$$

aufrecht zu erhalten, muss der Emitterwiderstand  $R_1$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{0,7V}{0,02A} \\ &= 35\Omega \end{aligned}$$

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

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

Mit dem Poti  $R_3 = 1k\Omega$  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  $R_3 = 1k\Omega$ , 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  $10k\Omega$
- 1 Widerstand  $33\Omega$
- 1 Potentiometer  $1k\Omega$
- 1 Potentiometer  $100\Omega$
- 2 Drehknöpfe passend zur Achse der Potentiometer
- 1 Transistor BC548C
- 1 Stück Platine  $4cm \times 6cm$  RM 2,52mm
- 1 Gehäuse etwa  $14cm \times 8cm \times 6cm$
- 2 Telefonbuchsen schwarz
- 2 Telefonbuchsen rot
- 2 Schrauben  $10 \times 3$  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 3mm 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.



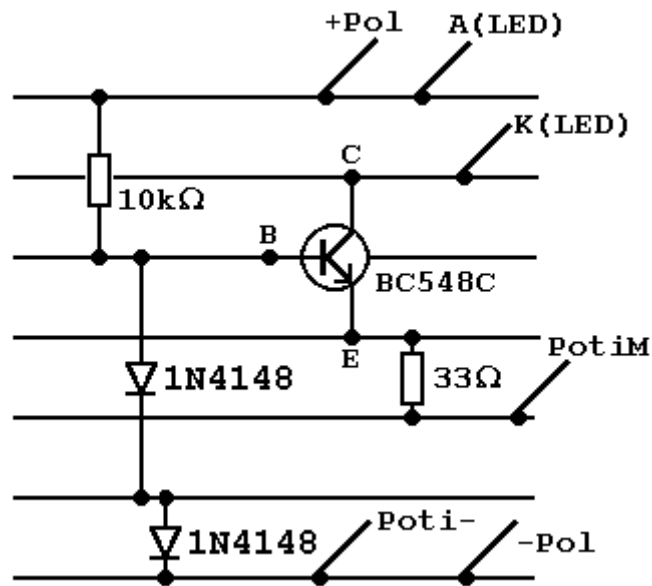


Abb.2: Platine

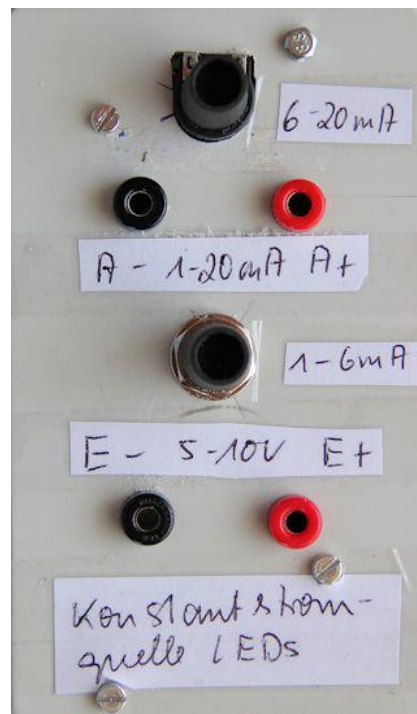


Abb.3: Vorderseite

Abb.3 zeigt die fertige Stromquelle. An ihren Eingang E legt man eine Gleichspannung von 5 - 10 V, 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-Electronic<sup>4)</sup> 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.

## 5. Quellen

- 1) Dorn-Bader, Physik Gymnasium SEK II, Schroedel-Verlag, Braunschweig 2010
- 2) Hrsgb. Franz Bader, Formeln und Tabellen zur Schulphysik, Aulis Verlag Deubner &Co KG, Köln 1967
- 3) [www.mekruphy.com](http://www.mekruphy.com), Download vom 27.1.2019
- 4) Julia Hoche, Gymnasium Baesweiler