Techni Science.

# Gerät zum photoelektrischen Effekt (Bestimmung der Planck-Konstante)

## Inhaltsverzeichnis

**Lieferumfang und Übersicht über das Betriebsgerät ....3**
Lieferumfang und technische Daten ....3
Das Betriebsgerät ....4
Hinweise: Bevor Sie beginnen ....5
Hinweis zur Offset-Einstellung ....5
**Geschichtliches über die Natur des Lichts ....5**
**Elektromagnetische Wellen ....6**
**Stärke von elektromagnetischen Wellen ....7**
**Der photoelektrische Effekt ....7**
Versuch 1 ....8
**Arbeitsweise ....9**
**Die fotoelektrische Schwellenenergie ....9**
**Die charakteristische Kurve einer Fotozelle ....10**
Versuch 2 ....10
**Das Gegen-Potential (Gegenspannung) ....11**
Versuch 3 ....12
**Die Kinetische Energie eines Elektrons ist unabhängig von der Strahlungsstärke ....13**
Versuch 4 ....13
**Der Anodenstrom steigt mit der Strahlungsstärke ....13**
Versuch 5 ....14
**Die kinetische Energie eines Elektrons steigt mit der Strahlungsfrequenz ....15**
Versuch 6 ....15
**Zusammenfassung ....17**
**Einsteins Quantentheorie ....17**
**Erklärung experimenteller Ergebnisse durch Einsteins Theorie ....18**
**Ermittlung der Schwellenfrequenz bei einer Fotozelle ....19**
Versuch 7 ....19
**Ermittlung der Planck-Konstante ....20**
Versuch 8 ....20
**Anhang ....22**
Hinweise und Tipps für die Lehrkraft ....22
**Sicherheitshinweise ....25**
Wenn einmal etwas nicht funktioniert... ....25

# Lieferumfang und Übersicht über das Betriebsgerät

## Lieferumfang und technische Daten

1 Halterung mit Fotozelle für LEDs und Abdeckkappe

1 Betriebsgerät mit 24V-Netzgerät (DC) mit

- 4-stelliges Voltmeter, Empfindlichkeit <2mV
- 4-stelliges Amperemeter, Empfindlichkeit <5nA
- Stufenlose Intensitätseinstellung der LEDs von 0 bis 100%
- Stufenlose Einstellung der Anodenspannung

1 LED – rot (λ = 618 ± 10) nm
1 LED – grün (λ = 533 ± 10) nm
1 LED – blau (λ = 462 ± 10) nm

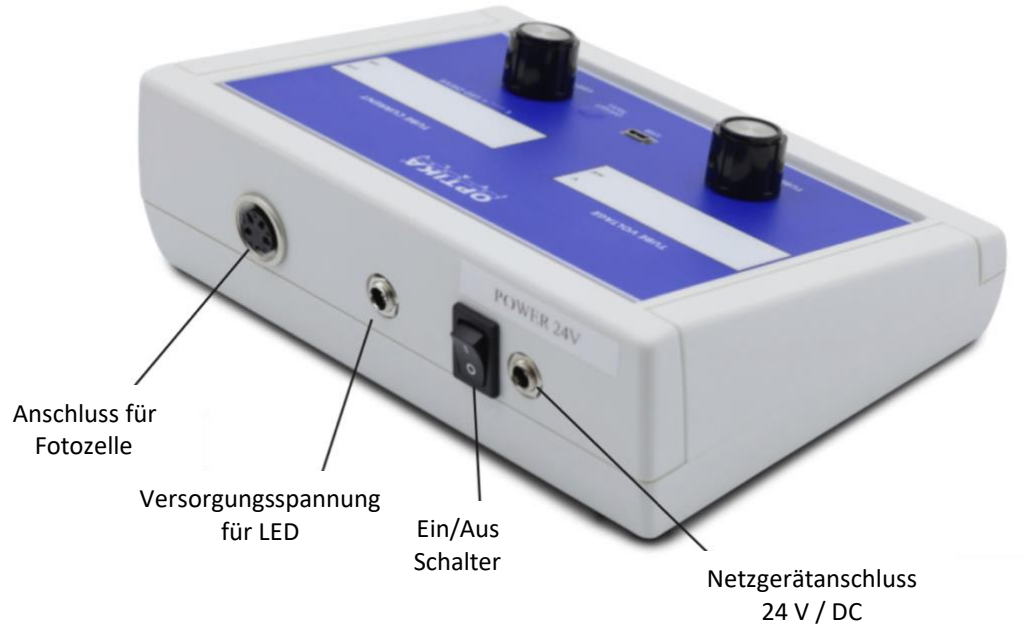
***Abmessungen***: Betriebsgerät: 190 x135 x 60 mm
Photozellengehäuse: 130 x 180 x 155 mm

***Gewicht:*** Betriebsgerät: 370 g
Photozellengehäuse: 560 g

## Das Betriebsgerät

Die untenstehende Abbildung zeigt die Bedienelemente auf der Frontplatte des Betriebsgerätes.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Rückseite des Betriebsgerätes:



### Hinweise: Bevor Sie beginnen ...

Verbinden Sie die Fotozelle mit der rückwärtigen Buchse des Betriebsgerätes. Schließen Sie anschließend eine der drei LEDs an den Ausgang des Betriebsgerätes an. Schalten sie nun das Betriebsgerät ein und betätigen den Regler zur Einstellung der Intensität der LED. In der rechten Anzeige erscheint der Buchstabe ***L*** gefolgt von einem Zahlenwert, der die Intensität in % anzeigt. (z.B. ***L050*** bedeutet eine Intensität von 50 % vom Maximalwert). Beachten Sie, dass die LED ca. 5 Minuten leuchtet, bevor Sie mit einer Messung beginnen, damit sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Wird diese Aufwärmphase nicht berücksichtigt, so kann das Messergebnis fehlerbehaftet sein.

### Hinweis zur Offset-Einstellung

Bevor sie mit der eigentlichen Messung beginnen, ist es notwendig, evtl. auftretende interne parasitäre Anodenströme zu kompensieren. Ist auf der Fotozelle die LED- Abdeckkappe aufgesteckt, stellen Sie die Anodenspannung auf $\boldsymbol{V_a = 0V}$ und betätigen die ***Offset-Taste***. Das Drücken der Taste bewirkt ein Abschalten der LED und ein Nullen des Ampèremeters. Ein sehr kleiner Restwert des Anodenstromes ($10^{-9}$ nA) ist normal, er entsteht durch externe Einflüsse. Wenn Sie das Amperemeter auf Null stellen wollen, wenn die Photokathode beleuchtet ist und die Anodenspannung 0 V beträgt, können Sie durch Drücken der ***Offset-Taste*** eine mehr oder weniger starke Spannungsschwankung - in Abhängigkeit von der Lichtstärke der verwendeten LED - feststellen.

Dies ist normal bei geringen auftretenden Strömen und hat keinen Einfluß auf das Messergebnis. Der Effekt resultiert daraus, dass nach Abschalten der LED kein Strom in der Fotozelle fließt. Die angezeigte Spannung ergibt sich aufgrund der Hochohmigkeit der Stromversorgung.

## Geschichtliches über die Natur des Lichts

Eines der größten Rätsel für Physiker in allen Zeiten betrifft die Natur des Lichtes. Licht hat verschiedene Eigenschaften, betreffend Farbe usw. Was ist Licht? Was ist sein Wesen? Wie wird es erzeugt, wie verbreitet sich Licht?

Um all diese Fragen zu beantworten, wurden im 17. bis 18. Jahrhundert zwei unterschiedliche Theorien über die Natur des Lichtes entwickelt: ***Das Teilchenmodell und die Wellentheorie***. Gemäß des Teilchenmodells, dessen maßgeblicher Vertreter Isaac Newton war, emittiert jede Lichtquelle einen Strom von Teilchen (als Korpuskel bezeichnet) in alle Richtungen. Die Vorstellung war, dass diese Teilchen im Auge leuchten.

Das Wellenmodell beruht auf der Vorstellung, dass sich Energie in Wellenform ausbreitet. Hauptvertreter der Wellentheorie waren zunächst der Niederländer Christian Huygens (1629- 1685) und später der Engländer Thomas Young (1773-1829) sowie der französische Wissenschaftler Augustin-Jean Fresnel (1788-1827). Letztere befassten sich schwerpunktmäßig mit den Phänomenen Beugung, Interferenz und Polarisation des Lichtes. Beide Theorien wurden über einen langen Zeitraum kontrovers diskutiert.

Im Jahre 1850 wies der französische Physiker Leon Foucault experimentell nach, dass die Lichtgeschwindigkeit in transparenten Medien geringer ist als in Luft. Dies war der Grund, dass das Teilchenmodell endgültig aufgegeben wurde. Im 19. Jahrhundert ging man davon aus, dass Wellen ein elastisches Medium zur Ausbreitung benötigen. Die Wissenschaft beschäftigte deshalb die Frage, ***wie sich Licht von der Sonne durch den luftleeren Raum fortpflanzen kann***. Es wurde deshalb vermutet, dass in allen Räumen, auch die, die anscheinend leer sind, eine Substanz vorhanden sein müsste, die

von unseren Sinnen nicht wahrgenommen werden können. Diese Substanz wurde als ***Äther*** bezeichnet.

## Elektromagnetische Wellen

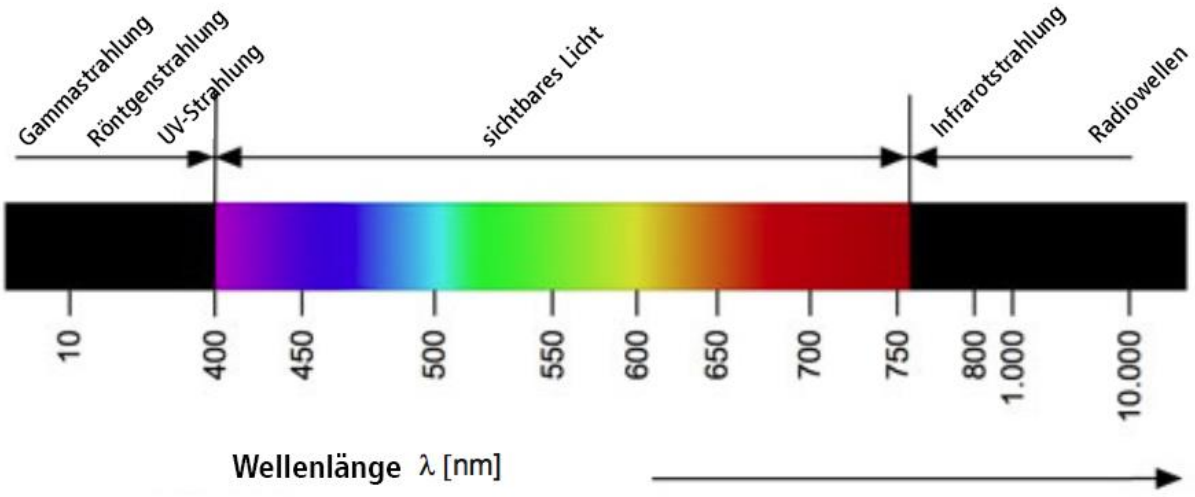
Seit dem 18. Jahrhundert war bekannt: Schwingt ein elastischer Körper, dann erzeugt er in seiner Umgebung Wellen mit denen mechanische Energie durch den Raum übertragen wird. Etwa um das Jahr 1864 zeigte der schottische Physiker James Clerk Maxwell mathematisch, dass bewegte elektrische Ladungen elektromagnetische Wellen erzeugen. Insbesondere entdeckte er, dass die Strahlung der elektromagnetischen Energie eine Folge der beschleunigten Bewegung der elektrischen Ladungen ist.

Nachdem nachgewiesen wurde, dass sich elektromagnetische Wellen auch im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von c = 300.000 km / s ausbreiten (Lichtgeschwindigkeit), konnte er ableiten, dass Licht elektromagnetische Wellen einer bestimmten Wellenlänge sind. Der experimentelle Nachweis von elektromagnetischen Wellen – auch Strahlung genannt – erfolgte erstmals 1888 von dem deutschen Physiker Heinrich Hertz. Heute wissen wir, dass es verschiedene elektromagnetische Wellen gibt, deren Eigenschaften von der Wellenlänge abhängt (vgl. nachfolgende Abb.) und deren Frequenz der nachfolgenden Relation entspricht.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

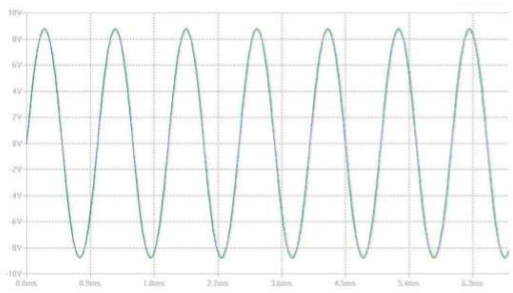
| | | | |
|---|---|---|---|
| ***Radiowellen*** | **:** | ($\lambda$ > 1m) | verwendet in Radio / TV- Kommunikation |
| ***Mikrowellen*** | **:** | (1m < $\lambda$ < 1 mm) | verwendet in Radarsystemen und in der Luftfahrtnavigation. |
| ***Infrarotstrahlung*** | **:** | (1mm < $\lambda$ < 750 nm) | abgestrahlt von warmen Körpern |
| ***Optische Strahlung*** | **:** | (750 nm < $\lambda$ < 380 nm) | sichtbares Licht |
| ***UV-Strahlung*** | **:** | (380 nm < $\lambda$ < 10 nm) | kurzwelliger Bereich des Sonnenlichts |
| ***Röntgenstrahlung*** | **:** | (10 nm < $\lambda$ < 1 pm) | verwendet in Medizin und Metallurgie |
| ***Gammastrahlung*** | **:** | (1 pm < $\lambda$) | abgestrahlt von radioaktiven Nukliden |

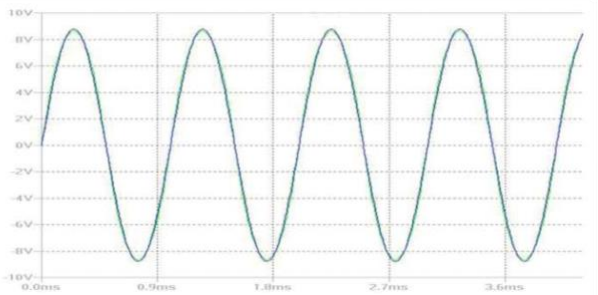
1 nm = $10^{-9}$ m, 1 pm = $10^{-12}$ m



## Stärke von elektromagnetischen Wellen

Nach der klassisschen Wellentheorie verhält sich die Energie einer elektromagnetischen Welle proportional zu Ihrer Intensität, d.h. proportional zum Quadrat ihrer Amplitude. Dies bedeutet, dass sie nicht von ihrer Frequenz abhängt. So sollten Wellen unterschiedlicher Frequenz und gleicher Amplitude dieselbe Energie haben (vgl. nachfolgende Abb.).





Wenn wir mit ***E*** die in einem Zeitintervall Δ***t*** auf eine Fläche ***S*** abgegebene Energie bezeichnen, so definieren wir als ***Intensität der Strahlung***, die auf eine Flächeneinheit in einer Zeiteinheit einfallende Energiemenge.

d.h.
$$I = \frac{E}{S\ \Delta t} \qquad (1)$$

Es gilt auch : ***E = P*** Δ***t***, mit ***P*** ist die Strahlungsleistung. Hieraus folgt:

$$I = \frac{P}{S} \quad (W / m^2) \qquad (2)$$

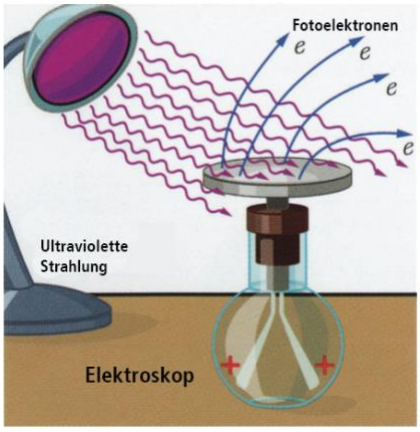
## Der photoelektrische Effekt

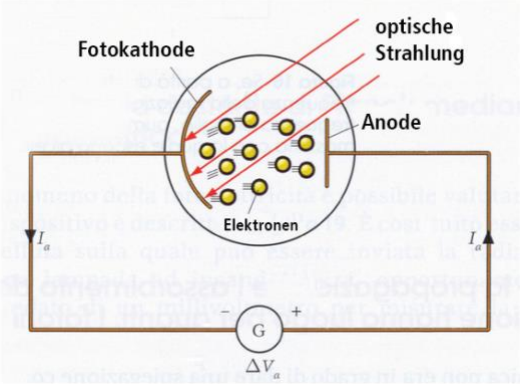
Bei Experimenten von Heinrich Hertz um das Jahr 1887 zum Nachweis der elektromagnetischen Wellen, die theoretisch von Maxwell postuliert wurden, zeigten, dass einige Metalle positiv geladen wurden, wenn sie mit Licht bestrahlt wurden (vgl. nachfolgende linke Abb.). Weitere Experimente führten hierzu der deutsche Physiker P. Lenard und der Italiener A. Righi durch, der dieses Phänomen ***photoelektrischen Effekt*** nannte.

Die Entdeckung des Elektrons im Jahre 1895 durch den Engländer J.J. Thompson überzeugte die Physiker weltweit davon, dass dieser Effekt auf die Emission von Elektronen zurückzuführen ist, deren Ladung negativ sind.

In der Praxis wird der photoelektrische Effekt mithilfe spezieller Bauteile erzeugt, die im Wesendlichen aus einem evakuierten Glaskolben mit einer Kathode aus einer speziellen Legierung bestehen. Sie werden als ***Fotozelle*** oder ***Fotodiode*** bezeichnet (vgl. nachfolgende rechte Abb.). Eine gekrümmte Platte, die vorzugsweise aus einem Alkalimetall besteht wirkt als Elektronenemitter und wird als ***Fotokathode*** bezeichnet. Ein Platindraht – als ***Anode*** bezeichnet – ist vor der Fotokathode positioniert und fängt die von der Kathode ausgesendeten Elektronen ein, wenn sie bestrahlt wird.

Den photoelektrischen Effekt können Sie mit folgendem Versuch untersuchen.




## Versuch 1

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 blaue LED

Um sich mit dem Gerät vertraut zu machen, bereiten Sie den Aufbau wie in der untenstehenden linken Abbildung vor. Decken Sie die LED-Aufnahmeöffnung der Fotozelle mit der Abdeckkappe ab und verbinden Sie das Betriebsgerät mit der Fotozelle. Schließen Sie das Netzgerät an die dafür vorgesehene Buchse des Betriebsgerätes an und schalten das Gerät ein. Stellen Sie die Anodenspannung auf 0V und drücken anschließend die Offset-Taste. Es bewirkt einen Anodenstrom von Null, unabhängig von der Anodenspannung. Wenn Sie die Abdeckkappe entfernen und die angeschlossene LED in die dafür vorgesehene Öffnung einstecken (LED-Intensität mindestens 20%) zeigt das Ampèremeter einen Stromfluss an, dessen Wert mit Anstieg mit der Anodenspannung zunimmt.

Da kein direkter Kontakt zwischen Kathode und Anode besteht, ist offensichtlich, dass ***die Bestrahlung der Kathode eine Emission von Elektronen verursacht, die von der Anode aufgenommen werden. Erreicht keine Strahlungsenergie die Kathode, werden keine Elektronen ausgesendet.***

Netzgerätanschluss

## Arbeitsweise

Leitungselektronen innerhalb eines Metalls besitzen sowohl eine ***kinetische Energie K*** als auch eine ***potentielle Energie U*** (U ist immer größer als K). Wird ein elektrisches Feld zwischen Elektronen und Metall wirksam, so entsteht ein negatives Potential, das mit zunehmender Distanz zunimmt. Im Unendlichen ist das Potential Null. Es gilt: Um Elektronen aus dem Metall herauszulösen muss Arbeit verrichtet werden.

Die Arbeit $W_e$ entspricht der Energie, die Sie benötigen, um ein Ladungselektron aus dem Metall herauszulösen und in einen unendlichen Abstand zu bringen. Dort ist die potentielle Energie Null. Da es sich um einen Leiter handelt, verbleibt - nachdem das Elektron die Metalloberfläche verlassen hat – eine positive „Lücke“. Deshalb ist $W_e$ die minimale Energiemenge, die einem Elektron zugeführt werden muss, damit es das Kathodenmaterial verlassen kann.

Da die verrichtete Arbeit (Austrittsarbeit) vom Energiepotential abhängt, verändert sie sich mit dem elektrischen Feld, in welches das Elektron eintaucht. Sie ist von Metall zu Metall unterschiedlich.
In der nachfolgenden Tabelle sind Werte für die Austrittsarbeit bei unterschiedlichen Metallen angegeben.

Bezogen auf das klassische Gesetz, dass die Arbeit ***L*** mit dem Potential ***V*** verbindet, d.h. ***L = e V***, wobei ***e*** die Elementarladung eines Elektrons ist, spricht man gelegentlich auch vom Extraktionspotential. Erinnern Sie sich, dass gilt: 1 eV = 1,602 * $10^{-19}$ J

| Element | Chem. Symbol | Austrittsarbeit (eV) |
|---|---|---|
| Kalium | K | 2,25 |
| Natrium | Na | 2,28 |
| Kalzium | Ca | 3,20 |
| Thorium | Th | 3,47 |
| Zink | Zn | 4,27 |
| Kupfer | Cu | 4,48 |
| Eisen | Fe | 4,63 |
| Silber | Ag | 4,70 |
| Nickel | Ni | 4,91 |

## Die fotoelektrische Schwellenenergie

In den Jahren um 1900 führte der deutsche Physiker Lenard (1862 – 1947) eine Reihe von Experimenten zum fotoelektrischen Effekt durch und entdeckte, dass die Emission von Elektronen aus Metallen je nach Wellenlänge von Metall zu Metall variiert. Er fand folgendes heraus: Jedes Metall ist durch eine Wellenlänge gekennzeichnet für die folgende Gesetzmäßigkeit gilt:

**Ein Metall emittiert nur Elektronen, wenn die einfallende Strahlung eine Wellenlänge hat, die kürzer als eine charakteristische Wellenlänge ist. $\lambda_0$ wird auch als *fotoelektrische Schwelle* bezeichnet.** Die Schwellenfrequenz für ein Metall ist definiert durch:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \qquad (3)$$

wobei ***c*** die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Schwellenfrequenzen für verschiedene Metalle aufgeführt.

| **Metall** | **Frequenz ($f_0$)** | **Wellenlänge ($\lambda_0$)** | **Strahlung** |
|---|---|---|---|
| Kalium (K) | 5,43 x $10^{14}$ Hz | 552 x $10^{-9}$ m = 552 nm | grünes Licht |
| Natrium (Na) | 5,51 x $10^{14}$ Hz | 544 x $10^{-9}$ m = 544 nm | grünes Licht |
| Kalzium (Ca) | 7,74 x $10^{14}$ Hz | 388 x $10^{-9}$ m = 388 nm | violettes Licht |
| Thorium (Th) | 8,39 x $10^{14}$ Hz | 357 x $10^{-9}$ m = 357 nm | UV-Strahlung |
| Zink (Zn) | 1,03 x $10^{14}$ Hz | 291 x $10^{-9}$ m = 291 nm | UV-Strahlung |
| Kupfer (Cu) | 1,08 x $10^{14}$ Hz | 278 x $10^{-9}$ m = 278 nm | UV-Strahlung |
| Eisen (Fe) | 1,12 x $10^{14}$ Hz | 268 x $10^{-9}$ m = 268 nm | UV-Strahlung |
| Silber (Ag) | 1,14 x $10^{14}$ Hz | 263 x $10^{-9}$ m = 263 nm | UV-Strahlung |
| Nickel (Ni) | 1,19 x $10^{14}$ Hz | 252 x $10^{-9}$ m = 252 nm | UV-Strahlung |

Unter Verwendung anderer monochromatischer Strahlungsquellen würden Sie folgende Eigenschaft der Fotozellenkathode feststellen:

**Die Fotozelle emittiert Elektronen nur, wenn die einfallende Strahlung eine Wellenlänge hat, die kürzer als etwa 650 nm, d.h. eine höhere Frequenz als 4,62 x $10^{14}$ Hz besitzt.**

Die Strahlung einer solchen Lichtquelle ist im roten sichtbaren Bereich.

## Die charakteristische Kurve einer Fotozelle

Sobald die Schwellenfrequenz einer Fotozelle bekannt ist, ist es interessant zu untersuchen, wie sich der Anodenstrom ***i*** in Abhängigkeit von der Potentialdifferenz $\Delta V$ zwischen Anode und Kathode ändert, bei einer Strahlungsfrequenz größer als die Schwellenfrequenz.

Dies können Sie mit nachfolgendem Versuch mit einer grünen LED durchführen, deren Wellenläng $\lambda = (533 \pm 10)$ nm beträgt.

### Versuch 2

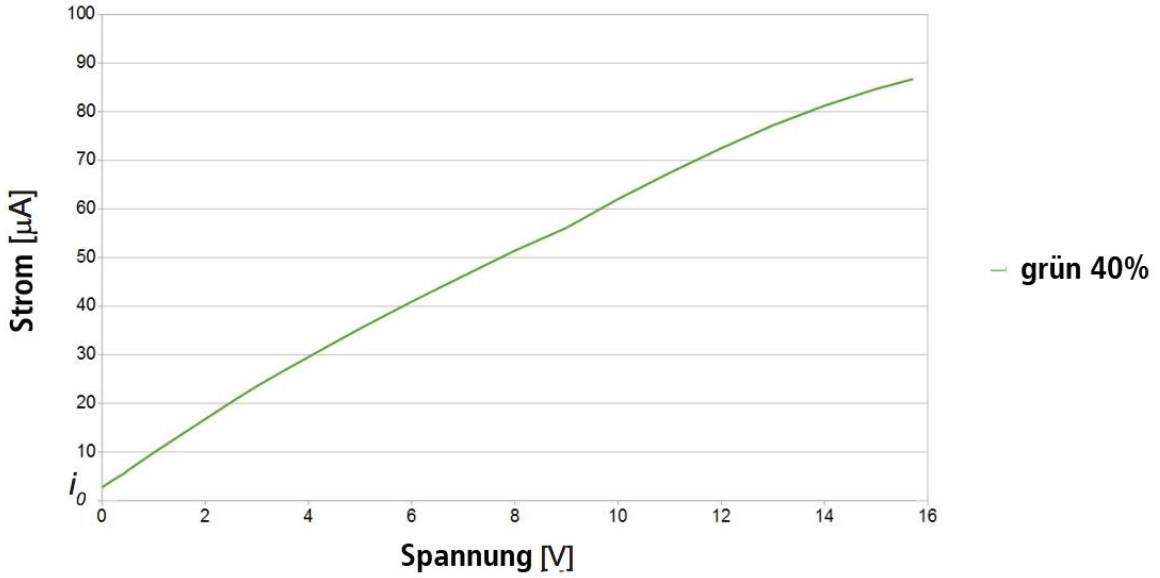
***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 grüne LED

Bauen Sie den Versuchsaufbau wie in nebenstehender Abb. gezeigt mit der grünen LED auf. Betätigen Sie den Offset-Knopf. Stellen sie anschließend die Intensität der LED auf 40% und halten diese während des gesamten Versuchs konstant. Sei $I_1$ die aktuelle Lichtstärke der LED.

Setzen sie nun die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode auf $\Delta V = 0$ V.

Erhöhen Sie nun die Anodenspannung in 1 V-Schritten und notieren Sie jedes Mal den korrespondierenden Anodenstrom ***i***.

Tragen sie nun die Werte in ein kartesisches Koordinatessystem ein. Sie sollten eine grafische Darstellung ähnlich der nachfolgende Abb. erhalten.




Die wichtigsten Aspekte, die aus dem Graphen folgen, sind:

- Steigt die Anodenspannung an, wächst der Anodenstrom im ersten Segment nahezu linear. Bei weiterem Anstieg der Anodenspannung neigt der Strom sich zu sättigen. **Die Erklärung ist, dass alle von der Kathode emittierten Elektronen von der Anode aufgenommen werden.**
- Der zweite interessante Aspekt ist die Tatsache, dass bei Anodenspannung = 0 der Anodenstrom = $i_0$ ungleich null ist. **Dies bedeutet, dass die Strahlungsenergie hoch genug ist, um Austrittsarbeit für einige Elektronen zu verrichten, auch wenn ihr Potential = 0 ist**.

## Das Gegen-Potential (Gegenspannung)

Der im letzten Punkt des vorhergehenden Versuchs ausgedrückte Aspekt ähnelt einem mechanischen Phänomen: Wirft man ein Objekt nach oben, erlaubt die kinetische Energie, für eine gewisse Zeit die Anziehungskraft des Gravitationsfeldes zu überwinden. Die erreichte maximale Höhe entspricht der potentiellen Energie (bezogen auf die Gravitation), die der kinetischen Energie bei Abwurf des Körpers entspricht.
Ähnlich dazu, **muss zum Verlassen des Atomverbundes ein Elektron genügend kinetische Energie besitzen, um von der Kathode aus die Anode zu erreichen.**

Die maximale kinetische Energie $\boldsymbol{K_{max}}$ des emittierten Elektrons kann bestimmt werden, indem an die Anode ein negatives elekrisches Potential $\boldsymbol{-\Delta V_a}$ angelegt wird, um ein abstoßendes elektrisches Feld zu erzeugen, das in der Lage ist, die Elektronen zu stoppen, auch solche, mit der maximalen kinetischen Energie.

Aus diesem Grund wird $\boldsymbol{-\Delta V_a}$ auch ***Gegen-Potential oder Gegensppannung*** genannt.

In diesem Fall muss die maximale kinetische Energie, mit der die Elektronen die Kathode verlassen, gleich ihrer elektrischen potentiellen Energie sein. Das bedeutet:

$$K_{max} = e\Delta V_a \qquad (4)$$

Wobei $e$ die Ladung eines Elektrons ist.

Das Gegen-Potential für grünes Licht können sie mit nachfolgendem Versuch bestimmen.

## Versuch 3

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 grüne LED

Bauen Sie den Versuchsaufbau wie in nebenstehender Abb. gezeigt mit der grünen LED auf. Betätigen Sie den Offset-Knopf. Stellen sie anschließend die Intensität der LED auf 40% und halten diese während des gesamten Versuchs konstant. Sei $I_1$ die aktuelle Lichtstärke der LED.

Stellen sie die Anodenspannung auf 0V und betätigen sie den Offset-Knopf. Das Ampèremeter zeigt den Wert $i_0$ an. Es erreicht langsam zunehmende (negative) Werte, bis der Anodenstrom auf Null fällt. Wenn der Wert nahezu null ist, drücken Sie die Offset-Taste erneut, um sicher zu stellen, dass keine parasitären Ströme auftreten.

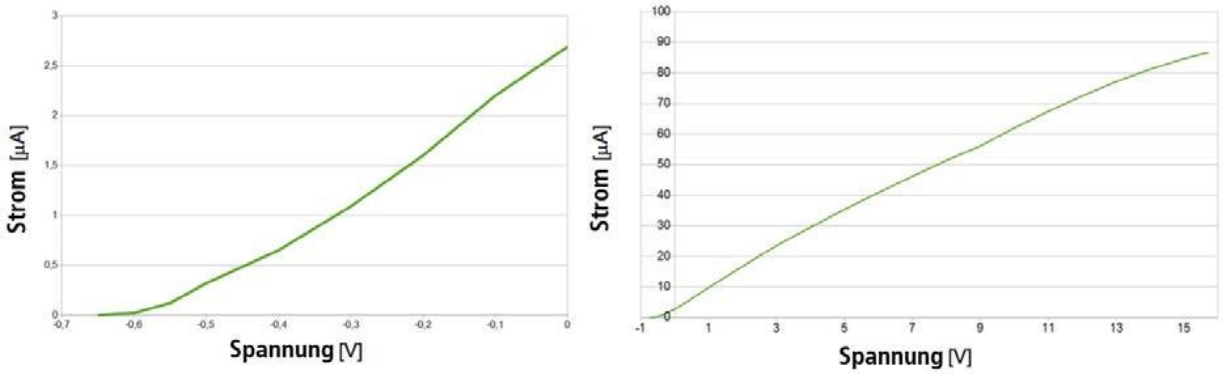
Der Anodenstrom kann nun als Null betrachtet werden, wenn das Ampèremeter – auch nur für kurze Zeit – den Wert 0,000 mA anzeigt. Geringe Schwankungen sind normal und sind für die Messung unkritisch.

Wir definieren: $\Delta V_{aV}$ = Cutoff-Spannung f. grüne LED (5)

Sie entspricht einer maximalen kinetischen Energie

$$K_{max} = e\Delta V_{aV} \qquad (6)$$

Dieser Kurvenausschnitt ist in der nachfolgenden Abbildung links dargestellt. Rechts ist die komplette Kurve dargestellt, bei einer Lichtintensität der grünen LED von 40%.




## Die Kinetische Energie eines Elektrons ist unabhängig von der Strahlungsstärke

In Kapitel 4 wurde bereits darauf hingewiesen, dass gemäß der klassischen Wellentheorie, die von einer Strahlung abgegebenen Energie proportional zu ihrer Intensität ist. Infolgedessen sollte eine intensivere Strahlung den Elektronen eine höhere maximale kinetische Energie zuführen. Das heißt, bezogen auf die Gleichung (4), sollte $|\Delta \mathbf{V_a}|$ bei steigender Strahlung ansteigen. Ob dies tatsächlich so ist, können Sie mit dem nachfolgendem Versuch überprüfen. Wiederholen Sie nun den Versuch 3 mit der geänderten Strahlungsintensität von 60%.

### Versuch 4

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 grüne LED

Der Versuchsaufbau entspricht dem in Versuch 3. Stellen Sie die Intensität nun jedoch auf 60%, um zu überprüfen, wie sich das Verhalten in der Fotozelle ändert, wenn sich die auf die Kathode treffende Strahlungsintensität ändert. Nach der klassischen Theorie erwarten wir, dass die Strahlungsintensität und das Gegen-Potential direkt proportional zueinander sind. Sie stellen fest, dass während all dieser Operationen ***das Gegen-Potential gleich bleibt***. D.h. ***die maximale kinetische Energie der von der Kathode emittierten Elektronen ist unabhängig von der Strahlungsintensität.***

⇒ Die Eigenschaft des photoelektrischen Effektes ist also nicht mit der klassischen Strahlentheorie vereinbar.

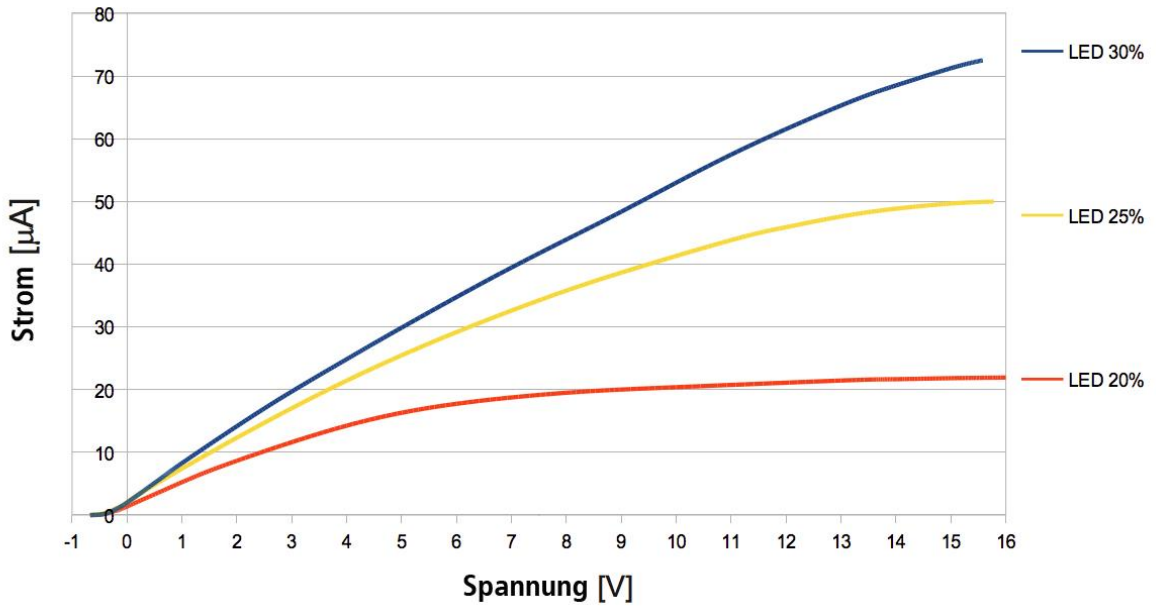
## Der Anodenstrom steigt mit der Strahlungsstärke

Im letzten Versuch hatten sie die Möglichkeit zu überprüfen, dass die kinetische Energie der Elektronen nicht von der einfallenden Strahlungsintensität abhängig ist. Die Strahlungsintensität bestimmt lediglich die Stärke des Photostroms.

## Versuch 5

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 grüne LED

Wiederholen Sie Versuch 2 und 3 mit LED-Intensitäten von 20%, 25% und 30%. Verstellen sie die Anaodenspannung von 0 bis zum Maximalwert, der am Betriebsgerät eingestellt werden kann. Tragen Sie die Kennlinien der grünen LED mit unterschiedlichen Intensitäten in einen Graphen ein. Es ergibt sich eine Darstellung wie nachfolgend abgebildet.




Beim Vergleich der Kurven fallen zwei Dinge auf: **die Anodenspannung ist gleich, die Stromstärke i nimmt mit steigender Intensität I zu.**

Die Energie von einem Elektron, die notwendig ist, um die Kathode zu verlassen wird durch die Arbeitsfunktion ***L*** gemessen. Bezeichnet ***E*** die auf die Kathode auftreffende Strahlungsenergie im Zeitintervall Δ***t***, so beträgt die Anzahl N von der Kathode emittierten Elektronen im Zeitintervall Δ***t***:

$$N = \frac{E}{L}$$

Und die gesamte elektrische Ladung, die von der Kathode in demselben Zeitintervall emittiert werden:

$$Q = N\,e \qquad \text{mit } e = \text{Ladung eines Elektrons}$$

Die Stärke des elektrischen Photostromes ist somit:

$$i = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{N\,e}{\Delta t} = \frac{E\,e}{L\,\Delta t}$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) folgt:

$$i = \frac{I\ S\ e}{L} \qquad (7)$$

Hieraus folgt, dass der elektrische Photostrom ***i*** proportional zur Strahlungsintensität ***I*** ist.

Ein zweites Ergebnis ist: ***Variiert die Strahlungsintensität, das Gegen-Potential nicht, so wird hierdurch bestätigt, dass die Kinetische Energie der Elektronen von der Strahlungsintensität unabhängig ist.***

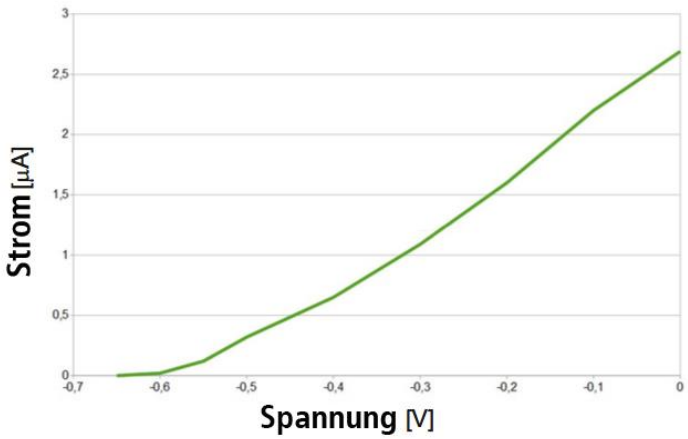
## Die kinetische Energie eines Elektrons steigt mit der Strahlungsfrequenz

Zusammenfassend aus dem bisherig gezeigten ist festzustellen, dass die kinetische Energie der emittierten Elektronen nicht von der einfallenden Strahlungsintensität abhängt. Eine elektromagnetische Welle zeichnet sich jedoch durch zwei Größen aus: der Intensität und der Frequenz. Die Vermutung liegt nahe, dass die Frequenz der einfallenden Strahlung einen Einfluss auf die kinetische Energie der ausgesendeten Elektronen hat. Dies weisen wir im nachfolgenden Versuch nach.

### Versuch 6

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 blaue LED

Gleichen sie, wie in den vergangenen Versuchen den Offset ab und nehmen die Kurve analog zu Versuch 3 auf (für die grüne LED ist sie nebenstehend noch einmal abgebildet).




Verwenden Sie dazu diese Mal die blaue LED und setzen die Intensität auf 40% wie bei der grünen LED. Stellen sie eine Anodenspannung von 0V ein. Regeln Sie anschließend das Gegenspannung der Anode solange, bis der Stom annähernd null ist. Betätigen Sie nun den Offset-Knopf, um sicherzustellen, dass keine parasitären Ströme auftreten.

Sei $\Delta V_{aB}$ die Cutoff-Spannung der blauen LED, die der maximalen kinetischen Energie

$$K_{max} = e\Delta V_{aB} \qquad (8)$$

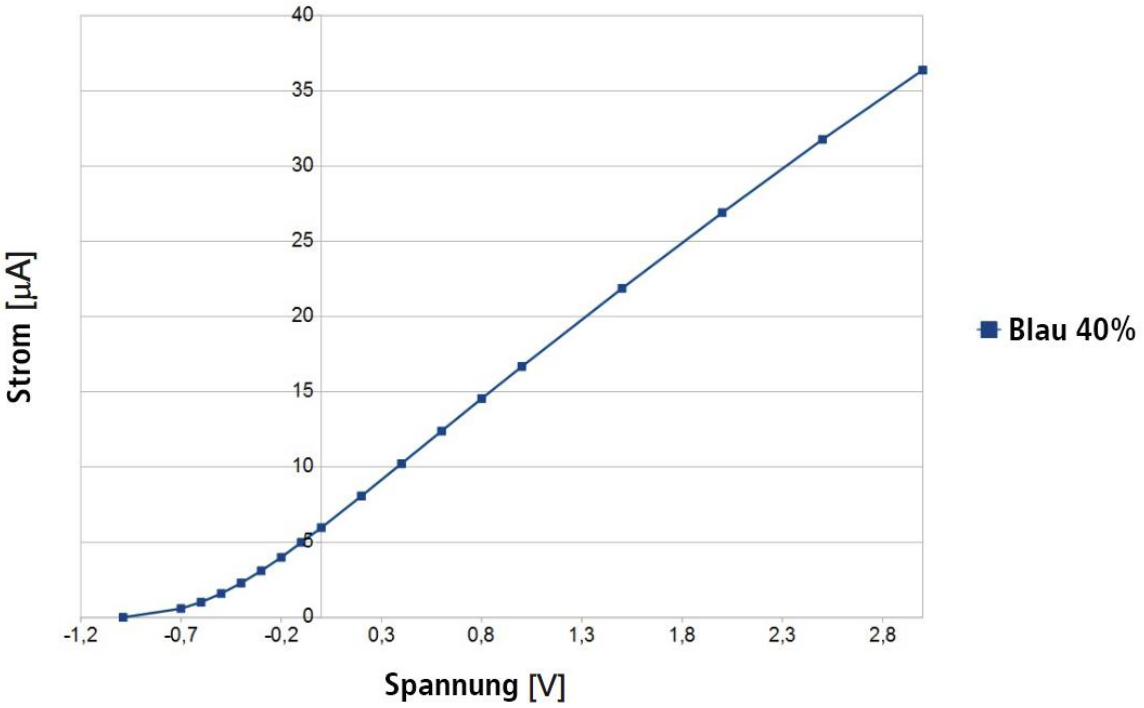
zugeordnet ist.

Es ist offensichtlich, dass der absolute Wert des Gegen-Potentials bei der blauen LED viel höher liegt, als bei der grünen. Die Frequenz von blauem Lichts ist höher, als die die des grünen Lichts. Hierauf basierend stellen wir fest, dass dass der Betrag der Cutoff-Spannung mit zunehmender Frequenz ebenfalls zunimmt. Es gilt somit:

wenn. $f_2 > f_1$ dann $|\Delta V_{a2}| > |\Delta V_{a1}|$

nach Gleichung (4) gilt auch $K_{max\ a2} > K_{max\ a1}$ . Hieraus folgt unmittelbar:

Die maximale kinetische Energie der aus der Kathode emittierten Elektronen hängt nicht von der einfallenden Strahlungsintensität, sondern von ihrer Frequenz ab (vgl. nachfolgende Abb.).



## Zusammenfassung

- Aus den Erkenntnissen der bisherigen Versuche lassen sich nachfolgende Eigenschaften des photoelektrischen Effektes zusammenfassen.
- Das Herauslösen von Elektronen aus Metall erfordert Arbeit von außen, auch ***Arbeitsfunktion*** genannt.
- Bei einigen Metallen kann das Herauslösen von Elektronen durch elektromagnetische Strahlung erreicht werden.
- Strahlung kann bei einem Metall Elektronen herauslösen, wenn die Frequenz der Strahlung nicht niedriger als eine bestimmte Frequenz, ***Schwellenfrequenz*** genannt, ist.
- Ist die Energie der einfallenden Strahlung größer als die Arbeitsleistung, verlassen Elektronen das Metall mit einer gewissen kinetischen Energie.
- Nach der klassischen Wellentheorie hängt die Energie einer Welle von ihrer Intensität, nicht von ihrer Frequenz ab.
- Die Erfahrung zeigt jedoch, dass eine Erhöhung der Intensität der einfallenden Welle die Zahl der Elektronen erhöht, nicht jedoch ihre kinetische Energie.
- Die Erfahrung zeigt, dass die kinetische Energie der Elektronen nur dann zunimmt, wenn die Frequenz der einfallenden Strahlung zunimmt.

***Wir erkennen, dass der klassische Elektromagnetismus nicht in der Lage ist, diesen speziellen Aspekt des photoelektrischen Effekts zu erklären.***

## Einsteins Quantentheorie

In einem Aufsatz veröffentlichte Albert Einstein 1905 seine Theorie zur Erklärung des photoelektrischen Effektes, für die ihm 1921 der Nobelpreis überreicht wurde. Er verallgemeinerte darin die 1900 von Max Planck formulierte Theorie zur Emission von Strahlung schwarzer Körper. Planck hatte vermutet, dass Energie elektromagnetischer Strahlung von Materie nur in ganzzahligen Vielfachen kleiner Mengen, später als „**Quanten**“ bezeichnet, emittiert werden können. Die Energie, die von einem einzelnen Quantum beträgt

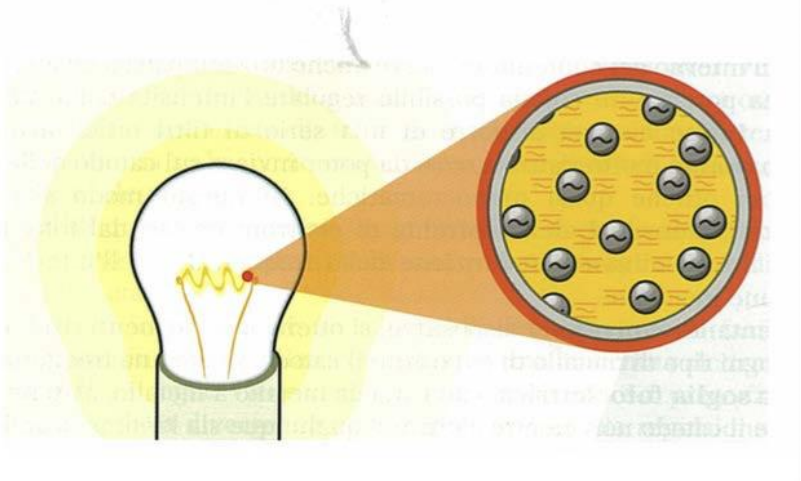
$$E=hf \qquad (9)$$

wobei ***f*** die Strahlungsfrequenz und ***h*** eine Konstante mit der Einheit Energie x Zeit ist. Der Wert von ***h*** wurde von Planck bestimmt mit

$$h=6{,}626*10^{-34}\ Js \qquad (10)$$

Einsteins Hypothese besagte, ***dass elektromagnetische Energie nicht nur von Quanten der Materie emittiert werden, sondern sich auch von Quanten selbst ausbreiten***.

***Er vermutete, dass das elektromagnetische Feld aus Strahlungsquanten besteht, die als Photonen bezeichnet werden*** (vgl. nachfolgende Abb.).



## Erklärung experimenteller Ergebnisse durch Einsteins Theorie

Um ein Elektron aus einem Material herauszulösen, wie es in Kapitel 6 beschrieben wurde, ist es notwendig eine bestimmte Arbeit ***L*** an der Oberfläche zu verrichten. Der Aufwand für diese Arbeit hängt materialabhängig von der Position der Elektronen ab. Sie ist minimal für Elektronen auf der Oberfläche und höher für die meisten inneren Elektronen.

Die Energie zur Verrichtung dieser Arbeit wird durch die Strahlung abgegeben.

Der unregelmäßige Charakter der Strahlung hat nach Einstein zur Folge, dass die ***Wechselwirkung zwischen Strahlung und Elektronen nicht kontinuierlich, sondern durch diskrete Ereignisse erfolgt. Das bedeutet, dass jedes einzelne Elektron die Energie eines einzelnen Photons absorbieren kann.***

Die Schwellenfrequenz $f_0$, die jedes Material charakterisiert, stellt die minimale Frequenz dar, bei der ein einfallendes Photon genügend Energie besitzt, um die Arbeit *L* zu verrichten. Das heißt:

$$h f_0 = W_e \qquad (11)$$

Einsteins Meinung nach ist die kinetische Energie maximal für Elektronen, deren Arbeit ***L*** minimal ist und umgekehrt. Hieraus folgt für die Energiebilanz jeder einzelnen Wechselwirkung:

$$K_{max} = hf - L_{min} \qquad (12)$$

Wobei $f > f_0$ gilt.

Somit gilt:

***Die maximale kinetische Energie eines Elektrons entspricht der Differenz zwischen der vom Photon gelieferten Energie und der korrespondierenden Arbeit L, die zum Herauslösen des Elektrons erforderlich ist.***

Andererseits, mit $K_{max} = e\,\Delta V_a$, kann der Ausdruck wie folgt umgeformt werden:

$$e\Delta V_a = hf - hf_0$$

oder

$$e\Delta V_a = h(f - f_0) \qquad (13)$$

***Dies erklärt, warum sich das Gegen-Potential $\Delta V_a$ nur mit der Strahlungsfrequenz und nicht mit der Strahlungsintensität ändert.***
***Eine höhere Strahlungsintensität erzeugt mehr Photonen und damit mehr emittierte Elektronen, sie kann deren maximale kinetische Energie jedoch nicht verändern.***

## Ermittlung der Schwellenfrequenz bei einer Fotozelle

Jede Fotozelle ist, wie in Kapitel 7 erwähnt, durch eine bestimmte Frequenz $f_0$ charakterisiert, die als Schwellenfrequenz definiert und wie folgt charakterisiert wird: Ist die Frequenz einer Strahlung kleiner als $f_0$, emittiert die Fotozelle keine Elektronen, unabhängig von der Strahlungsintensität.

Mit nachfolgendem Versuch kann die Schwellenfrequenz der verwendeten Fotozelle ermittelt werden.

### Versuch 7

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 Abdeckung, 1 grüne LED, 1 optische Bank

Löst man Gleichung (13) nach $f_0$ auf, ergibt sich:

$$f_0 = f - \frac{e\,\Delta V_a}{h}$$

Wobei. $f = 5{,}63*10^{14}$ Hz, $e = -1{,}6*10^{-19}$ V; $h = 6{,}626*10^{-34}$ Js und $\Delta V_{aV}$ der Messwert ist.

Hersteller von Fotozellen geben die Schwellenfrequenz an:

$$f_0 = 4{,}62 * 10^{14}\ \text{Hz}$$

## Ermittlung der Planck-Konstante

Gleichung (13) bezieht die Schwellenfrequenz auf die Planck-Konstante. Im vorigen Absatz haben wir den (bekannten) Wert der Planck-Konstante verwendet, um die Schwellenfrequenz zu bestimmen. Dieselbe Gleichung können wir auch für die Bestimmung der Planck-Konstante verwenden.

Unter Anwendung des Ausdrucks (13) für zwei verschiedene Strahlungen unterschiedlicher Frequenz ***I*** und ***J*** erhalten wir:

$$e\,\Delta V_{aI} = hf_I - hf_0 \qquad (14)$$

und

$$e\,\Delta V_{aJ} = hf_J - hf_0 \qquad (15)$$

berechnen wir die Differenz zwischen beiden Gleichungen (14) und (15), dann ergibt sich:

$$h\,(f_I - f_J) = e\,(\Delta V_{aI} - \Delta V_{aJ})$$

hieraus folgt:

$$h = \frac{e\,(\Delta V_{aI} - \Delta V_{aJ})}{(f_I - f_J)} \qquad (16)$$

### Versuch 8

***Benötigtes Material:*** 1 Halter mit Fotozelle, 1 Betriebsgerät, 1 blaue LED, 1 rote LED

Nach der Einstellung des Offsets, müssen Sie den Potentialausgleich bestimmen. Sie kennen die Schwellenfrequenzen für die rote und blaue LED:

$$f_R = 4{,}85 \cdot 10^{14}\ \text{Hz und } f_B = 6{,}49 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$$

Nun berechnen Sie die Planck-Konstante nach folgenden Formel:

$$h = \frac{e\,(\Delta V_{aB} - \Delta V_{aR})}{(f_B - f_R)} = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s}$$

Auf der folgenden Seite finden Sie Informationen und Überlegungen bezgl. Messfehler.

Betrachten wir die Darstellung der drei Cutoff-Spannungen bei den drei LEDS (rot, grün und blau) in einer grafischen Darstellung bezogen auf die Frequenzen zueinander. Die Linearität kann aufgrund von Fehlern bei der Messung etwas abweichen. Die Werte für die Frequenzen ergeben sich aus der Gleichung:

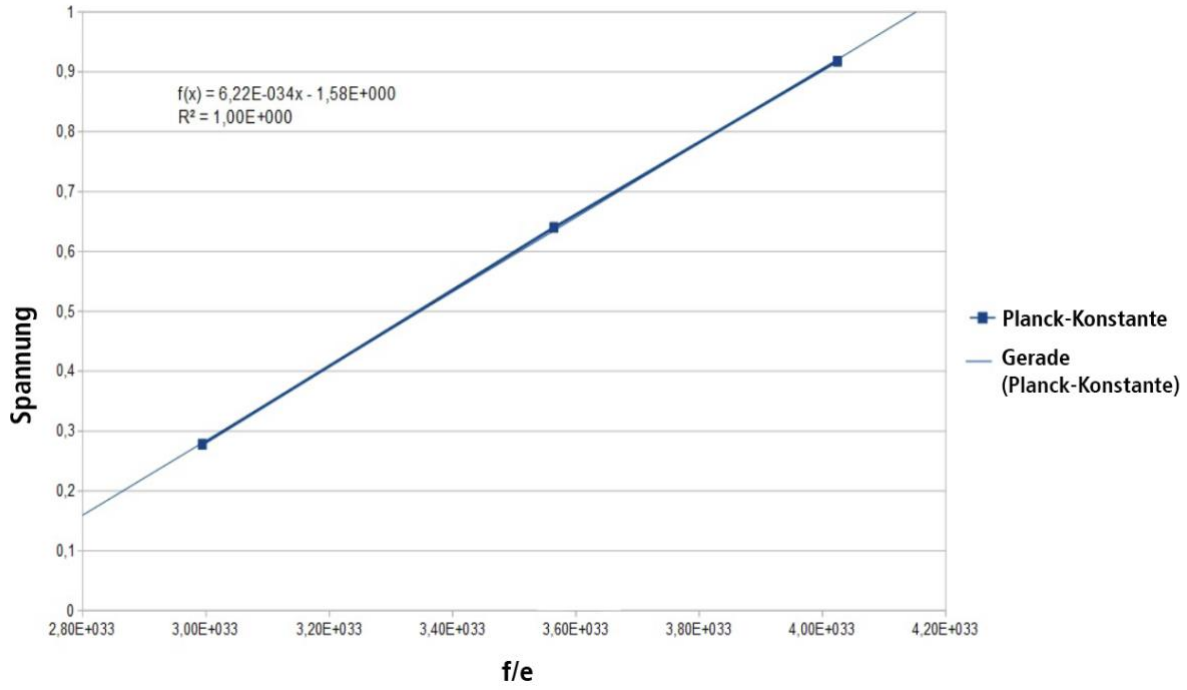
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Wobei ***c*** die Lichtgeschwindigkeit (unter der Annahme, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und Luft gleich sei) und ***λ*** die Wellenlänge. Nun berechnen wir die Frequenz der drei LEDs und bereiten eine Tabelle vor, in die jeweils die Cutoff-Spannungen gegenüber den Frequenzen eingetragen werden. Geben Sie die Werte wie in untenstehenden Graph ein und berechnen die lineare Funktion.

In unserem Fall ergibt sich eine Gerade wie diese

$$\Delta V_a = \frac{h}{e} f,$$

Wobei ***h/e*** die Steigung der Geraden ist.




***<u>Hinweis:</u>***

Die Wellenlängenwerte der Filter beziehen sich auf den Mittelwert des Bandpasses. Dabei ist zu beachten, dass die Wellenlänge einer LED je nach Temperatur geringfügig variiert, der Fehler jedoch nie 5% überschreitet. Diese Werte wurden mit einer LED-Intensität von 40% erreicht. Wir empfehlen, diese Intensität bei der Messung der Planck-Konstante nicht zu überschreiten, da sich die LED zu stark erwärmt und die Verschiebung zu groß ist, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen. Nicht zu vergessen ist auch die Ausbreitung von Fehlern, sowie die unvollkommene Symmetrie um den Mittelwert der LED-Emissionsbanden: Eine Variation der Differenz ($f_B$ - $f_R$) in der Größenordnung von 10 nm bewirkt eine Änderung der Schätzung der Plank-Konstante um mehr als 5%. Während der Messung der Planck- Konstante, wenn Sie sich in der Nähe des Stopppotentials befinden, drücken Sie den Offset- Knopf (mindestens 5 Sekunden), um sicherzustellen, dass auch nach wenigen Minuten kein Offset des im Fototubus fließenden Stroms gegenüber dem gemessenen Strom des Amperemeters auftritt. Wir empfehlen außerdem, das Gerät nur so lange wie notwendig eingeschaltet zu lassen, wie Sie die Messung durchführen, um eine Erwärmung des der Elektronik zu verhindern.

# Anhang

## Hinweise und Tipps für die Lehrkraft

Eine detailliertere Betrachtung des photoelektrischen Effekts kann erst mit Kenntnis der Quantentheorie erfolgen. Nur dank der Quantenmechanik kann man die experimentell beobachtbaren Abweichungen von der Einstein'schen Beschreibung erklären.

### Das Modell mit freien Elektronen

Die klassische Statistik sieht vor, dass die Elektronen in Metallen bei Umgebungstemperatur eine durchschnittliche kinetische Energie von etwa $2x10^{-2}$ eV aufweisen und um diesen Wert herum statistisch verteilt sind, entsprechend einer Funktion, die mit zunehmender Energie im Mittelwert allmählich abnimmt. Dem steht die Tatsache der Existenz einer bestimmten photoelektrischen Schwelle entgegen. Zur Erklärung kann die klassische Statistik nicht herangezogen werden. Hierzu muss die physikalische Quantenstatistik nach Femi-Dirac hinzugezogen werden:

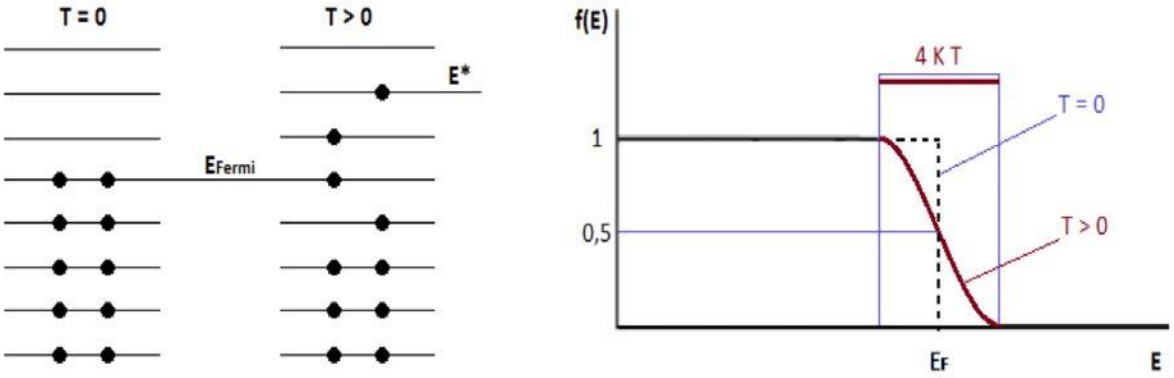
Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation ist es nicht möglich, den mikroskopischen Zustand eines Quantenteilchensystems durch Zuordnung von Positionen und Geschwindigkeiten aller Teilchen zu bestimmen. Das heißt, wir können uns einen Mikrozustand nicht mehr als eine Menge von Positions-Impulspunkten vorstellen, sondern als eine Menge Volumen, die das Produkt zwischen den Positionen und den Impuls- Intervallen angibt:

$\Delta V = (Ax\ Ay\ \Delta z)\ (\Delta p_X\ \Delta p_Y\ \Delta p_Z)$ (in der Größenordnung von $h^3$, nach dem Unschärferelations- prinzip).

Alle Partikel mit Position und Impuls in diesem Bereich befinden sich also im selben Mikrozustand. Bei einem gegebenen makroskopischen Zustand wird der Phasenraum also in Zellen mit einem Mindestvolumen aufgeteilt, von dem die Anzahl der zugänglichen Mikrozustände abhängt. Da es nicht mehr möglich ist, gleichzeitig die Position und Geschwindigkeit jedes Teilchens zu bestimmen, wählen wir auch die Energie als dynamische Größe, weil wir wissen, dass sie die Quantenzustände charakterisiert.
Angenommen, wir haben ein System bestehend aus N identischen Partikeln, ununterscheidbar und frei. In einem räumlich begrenzten System kann die Energie einzelner Teilchen aufgrund der Randbedingungen nur diskrete Werte annehmen, in einem System von makroskopischer Größe liegen diese Werte aber sehr nahe beieinander. Der mikroskopische Zustand des Systems wird durch die Zuweisung der Anzahl der Partikel definiert, die sich auf jeder Energieebene befinden. Wir teilen dann den gesamten Energiebereich in kleine, aber endliche Ebenen auf, bezeichnen wir durch $\boldsymbol{g_i}$ die Anzahl der Energie- ebenen in der i-ten Zelle und definieren den makroskopischen Zustand durch die mittleren Teilchenzahlen in jeder Zelle $\boldsymbol{n_i}$. Weiterhin definieren wir die Verteilungsfunktion $\boldsymbol{f(e_i)}$ als Verhältnis $n_i/g_i$. Der makroskopische Zustand wird dann durch die ***Verteilungsfunktion f(E)*** beschrieben, die Wahrscheinlichkeitscharakter hat.
Die Form der Funktion f (E) ist abhängig von der Art der betrachteten Partikel. Da es sich um Elektronen handelt, müssen wir das Paulisches-Ausschließungsprinzip berücksichtigen, das es maximal zwei Fermionen erlaubt, die gleiche Energiemenge $e_i$ zu besitzen. Im Idealfall, also bis zum absoluten Nullpunkt, werden die Energieniveaus daher von unseren Elektronen ab der untersten Ebene aus gefüllt. Die höchste belegte Energieebene wird als ***Fermienergie*** $\boldsymbol{E_F}$ bezeichnet.
Für T > 0 K dürfen Fermi-Teilchen, die sich in den untersten Energiestufen befinden, in keiner Weise Energie gewinnen, da ein Energiegewinn dem Sprung in eine höhere Ebene entspricht, die, da sie bereits von zwei Elektronen besetzt sind, die keine weitere Besetzung zulassen. Die einzigen Teilchen,

die Energie gewinnen, sind diejenigen in der Nähe der Fermi-Energie, die unmittelbar darüber zugänglich sind. Im System werden wir dann Elektronen mit einer Energie größer als der Fermi-Pegel haben, bis zu einer maximalen Energie E*, abhängig von der Temperatur.

Die Leitungselektronen eines Metalls folgen in guter Näherung der Fermi-Dirac-Statistik.




Allerdings ist klar, dass die Lichtschwelle der Photokathode, die der Fermi-Energie entspricht, nur für genau T = 0 K definiert werden kann. Für T > 0 K gibt es Elektronen, deren Energien um die Fermi-Energie verteilt sind und die Photonen absorbieren können, die mit Wellen unterschiedlicher Frequenz assoziiert sind. Die Amplitude des Energiebereichs variiert von Material zu Material und liegt bei ca. $4K_BT$ (wobei $K_B$ die Boltzmann-Konstante ist). Bei T = 300 K haben Sie $4K_BT$ = 0,1 eV, was einer Frequenz von ca. 0,24 $10^{14}$ Hz (entsprechend der Beziehung E = h f) entspricht (ca. 5% der von uns verwendeten LED- Frequenzen)

**Wechselwirkungen zwischen Elektronen**

Die Elektronen eines Metalls können nicht als völlig frei betrachtet werden: Das kristalline Gitter, das aus den Atomkernen gebildet wird, interagiert mit ihnen. Wenn wir die Bindungsenergie von Elektronen in Metallen mit Potentialoberflächen darstellen, haben wir ein internes Potential an periodischen Löchern (von denen Periode und Tiefe durch die Kerne und ihre Verteilung im Raum bestimmt wird) und ein Barrierepotential an der Oberfläche. Wenn wir eine hohe Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode verwenden, müssen wir berücksichtigen, dass ein Anlegen eines externen elektrischen Feldes die Potentialbarriere senkt, was es einfacher macht, das gleiche Elektron auch für den Tunneleffekt zu nutzen. Man spricht in diesem Fall von Feldemission.

Mit diesem Modell können Sie das Elektron beschreiben, das sich sowohl auf die Oberflächen-potentialbarriere als auch auf das interne periodische Potential bezieht; es wird also zwei photoelektrische Effekte geben: einen Volumen- und einen Oberflächeneffekt, und Studien zeigen, dass unter bestimmten experimentellen Bedingungen auch der Volumeneffekt dominieren kann: die Art des Materials, aber auch externe Felder und T > 0 K sind signifikant wirkend.

Mit steigender Temperatur ist es immer einfacher, die Elektronen aus dem Metall zu extrahieren. In erster Näherung ist der photoelektrische Strom proportional zum Quadrat der Temperatur, so dass bei recht hohen Temperaturen Elektronen aus dem Metall entweichen, auch wenn es nicht durch elektromagnetische Wellen beeinflusst wird. Mit anderen Worten, Materialien mit einem niedrigen Arbeitsfunktionswert unterliegen leicht thermionischen Effekten.

Bei einem Leiter bei T > 0 K ist auch zu beachten, dass die stoßenergetischen Freiheitsgrade durch

Gitteranregungen beeinflusst werden. Wir können diese Energien, die auch quantisiert werden, mit dem Konzept der Phononen modellieren, dank denen es möglich ist, die Quantenbeschreibung der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit zu entwerfen, in der Elektronen an Kollisionen mit solchen Phononen teilnehmen. Bei einem klassischeren Ansatz kann man sagen, dass die Verschiebungen aus den Gleichgewichtspositionen der Kerne die Periodizität des Potentials verändern und elektrischen Widerstand erzeugen (theoretisch nicht in einem symmetrischen Potential). Ähnlich wirken auch Materialverunreinigungen und Defekte in der Gitterstruktur. Elektronen tauchen also in ein nicht symmetrisches, sondern vor allem zeitlich zufällig veränderliches Potential in Abhängigkeit von der Temperatur ein. Auch Kollisionen zwischen Elektronen werden unter diesen Umständen wahrscheinlicher, was zu Energie- und Impulsausfällen als Funktion der Streuung führt.

Thermische Schwankungen, Gitterunregelmäßigkeiten, Kollisionen zwischen Elektronen bestimmen eine zeitliche Dynamik der Energieniveaus und damit eine schwankende Austrittsarbeit, was zu einer Änderung der maximalen kinetischen Energie der emittierten Elektronen führt.

**Der Auger-Effekt**

Angenommen, wir haben eine Wechselwirkung zwischen Elektronen und Photonen, die Wellen mit $f < f_0$ zugeordnet sind, d. h. mit Energien, die ausreichen, um Photoemission zu verursachen. Die Energie des Photons kann jedoch ausreichen, um ein internes Elektron zu stimulieren und es auf eine äußere Schale zu bringen, vielleicht verbleibt es aus thermischen Gründen im Verbund oder wird emittiert.
Bleibt die äußere Schale unbesetzt, kann diese Lücke mit einem Elektron besetzt werden, das weniger stark mit dem vorigen verbunden ist; die so freigesetzte Energie in Form von Photonen kann wiederum die Emission von Elektronen aus anderen Ebenen erzeugen. Die innere Ebene kann auf viele verschiedene Weisen gefüllt werden, was dem Energiespektrum nach Auger eine große Komplexität verleiht.

***Wir können feststellen, dass die Messgröße, die sich am stärksten auf die Messung auswirkt, die Temperatur ist, sowohl was den Mittelwert als auch die Schwankungen betrifft. Um Schwankungen und einen übermäßigen Temperaturanstieg zu begrenzen, ist die Außenseite des gelieferten Rohres aus Aluminium gefertigt, um die Wärmeübertragung an die Umgebung zu maximieren. Bedenken Sie jedoch, dass der Wert der Temperatur, obwohl stabiler, bei etwa 300 K liegt und mit zunehmender Einschalt- zeit des Gerätes tendenziell ansteigt. Es ist damit zu rechnen, dass das Amperemeter bei gleicher Spannung und Beleuchtung erstmals einen steigenden Strom registriert. Bei längeren Zeiten erhöht die Erwärmung des Stromkreises nach der Photokathode den Widerstand und senkt den Wert des gemessenen Stroms. Zur Minimierung von Fehlern empfiehlt es sich daher, die Messungen unter Berücksichtigung der thermischen und damit der zeitlichen Größe durchzuführen.***

## Sicherheitshinweise

Unsere Produkte wurden speziell für die Anwendung im Schulunterricht entwickelt und sind ausschließlich für diesen Einsatz bestimmt. Medizinische und kommerzielle Anwendungen in industriellen oder industrie-ähnlichen Umgebungen sind nicht bestimmungsgemäß. Schüler dürfen mit den Geräten nur dann unbeaufsichtigt arbeiten, wenn dies ausdrücklich in dieser Dokumentation erlaubt ist.

Beachten Sie stets die Hinweise in dieser Anleitung und vergewissern Sie sich, dass Sie die Hinweise verstanden haben. Wenden Sie sich im Zweifelsfall an unseren Kundenservice.

Unsere Produkte werden ständig weiterentwickelt. Die tatsächliche Ausstattung des Gerätes und des mitgelieferten Zubehörs kann deshalb von der Beschreibung in dieser Dokumentation leicht abweichen.

versuchen Sie nicht, Geräte selbst zu reparieren. Wenden Sie sich im Zweifelsfalle an unseren Kundenservice.

### Wenn einmal etwas nicht funktioniert...

Verwenden Sie immer das mitgelieferte Originalzubehör. Überprüfen Sie bei Problemen die Spannungsversorgung und kontrollieren Sie, wenn möglich die Versorgungsspannung. Bei batteriebetriebenen Geräten ersetzen Sie bitte die Batterien durch neue, hochwertige Batterien. Achten Sie beim Einsetzen auf die korrekte Polung. Verwenden Sie statt Batterien nur wiederaufladbare Akkus, wenn dies in der Anleitung ausdrücklich empfohlen wird.

Manche Geräte sind mit irreversiblen Feinsicherungen ausgestattet. Ersetzen Sie diese nur durch Typen mit der identischen Charakteristik. Verwenden Sie niemals Sicherungen mit einem höheren Auslösestrom oder einer geringeren Einsatzspannung. Überbrücken Sie Sicherungen niemals, wenn Sie keine passende Ersatzsicherung zur Hand haben.

Bei technischen Fragen wenden Sie sich bitte an den Kundenservice von Techni Science.

**Techni Science**
Brüsseler Straße 1a
D- 49124 Georgsmarienhütte

T +49 322 11 00 13 18
Email: info@techniscience.com
www.tecniscience.com/de