

# Das Photonenmodell des Lichts - eine Lerneinheit mit Lernzirkeln und einem Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H.-J. Jodl

## 1 Einführung

In der Schule werden obligatorisch das Strahlenmodell in der Sekundarstufe I und das Wellen- und Photonenmodell in der Sekundarstufe II behandelt. Einem qualitativ guten Unterricht zum Photonenmodell kommt aus inhaltlicher und historischer Sicht besondere Bedeutung zu, da die Schüler mit der Vorstellung von Licht als Photonenströmung die Schule verlassen und das Modell die Schnittstelle zwischen klassischer Physik und Quantenphysik markiert. Allerdings treten bei der Vermittlung des Photonenmodells didaktische Probleme auf:

- Experimente zum Photonenmodell (qualitative Vorversuche zum Photoeffekt, quantitative Untersuchung des Photoeffekts) müssen bedingt durch die apparativen Voraussetzungen in Lehrerdemonstrationsexperimenten erarbeitet werden. Nur einzelne Schüler können in eingeschränkter Weise an den Experimenten aktiv beteiligt werden.
- Die über einen längeren Zeitraum erworbenen Kenntnisse und Vorstellungen aus der Wellenoptik müssen zur Entwicklung des Photonenmodells zu den neuen experimentellen Ergebnissen des Photoeffekts in Beziehung gesetzt werden. Aufgrund dieser anspruchsvollen Aufgabe oder aus Zeitmangel werden häufig geschlossene Unterrichtsformen angewendet.
- Schülern fällt es nicht leicht, angemessene Modelle der Realität zu entwickeln: So besitzt zwar schon fast die Hälfte aller Schüler vor der Behandlung der Quantenphysik im Unterricht eine dualistische Welle-Teilchen-Vorstellung vom Licht, allerdings mit einer eher mechanistischen Teilchenvorstellung im Sinne Newtons [1]. Weiterhin wird der Welle-Teilchen-Dualismus vereinfachend in der Weise verstanden, dass Licht entweder als Welle oder als Teilchen beschrieben werden kann, und dass sich das Licht in Experimenten entweder als Welle oder als Teilchen zeigt [2].

Den Vermittlungsschwierigkeiten wird in der folgend beschriebenen, für einen Leistungskurs konzipierten Lerneinheit in mehrerer Weise Beachtung geschenkt:

- Inhaltlich ist die Lerneinheit zum Einen eine Anwendung der im bisherigen Unterricht vermittelten Fachkenntnisse (Energiesatz, Auf- und Entladen eines Kondensators, Licht als Welle und Energieträger). Zum Anderen ist die Lerneinheit im Leistungskurs der Klasse 12 eine Übung und Vertiefung der in [3] genannten Fachmethoden (Modelle bilden, analoges Übertragen) und Arbeitsmethoden (Protokollieren und Auswerten von Messergebnissen, Texte erschließen, in Gruppen zusammenarbeiten, Sachverhalte mediengerecht präsentieren).
- Methodisch wird durch den Prozesscharakter und die weitgehende Wahlfreiheit der Lernzeiten bei Lernzirkeln [4] die eigenständige Erarbeitung des Photonenmodells unterstützt. Schüler brauchen Zeit und individuelle Lernmöglichkeiten, um angemessene Modelle in Bezug auf ihre eigenen Modellvorstellungen vom Licht zu entwickeln. In stärker lehrerzentrierten Unterrichtsszenarien ist dies vor allem wegen der einseitigen 1:n-Kommunikation schwerer realisierbar. In den Lernzirkeln wird die von Schülern häufig monierte zeitliche Aneinanderreihung von Lerninhalten in ein Nebeneinander von Lerninhalten umgewandelt: Experimentieren und Modellentwicklung sollen sich in intensiver Wechselwirkung quasi zeitgleich vollziehen.
- Mediendidaktisch werden klassische Lehrerdemonstrationsexperimente als Schülerexperimente durchgeführt. Eine Möglichkeit bietet ein über das Internet fernbedienbares Realexperiment - ein Remotely Controlled Laboratory (RCL).

## 2 Struktur der Lerneinheit

Hauptelement der Lerneinheit sind zwei offene Lernzirkel mit jeweils vier Pflichtstationen (Abb. 1), die von allen Schülern durchlaufen werden. Im ersten Zirkel wird durch Experimente, Aufgaben und Texte das Photonenmodell erarbeitet, im zweiten wird durch Berechnungen das Photonenmodell vertieft. Der Lerneinstieg bereitet die Lerneinheit und den ersten Lernzirkel, die "Tafelrunde" den zweiten Lernzirkel als Einführungsstation vor. Eine Kontrolle der Lernergebnisse der Lernzirkel erfolgt oberstufengemäß durch eine Präsentation. Abschluss bildet ein Test zum Photonenmodell des Lichts. Rechnet man mit ca. 1 Stunde/Station dann umfasst die Lerneinheit ca. 13 Unterrichtsstunden.

Die Offenheit des ersten Lernzirkels bedingt zur Sicherung der Unabhängigkeit der Stationen Wiederholungen der Stationsinhalte, die gegenüber dem Gewinn an zeitlicher Flexibilität zu vernachlässigen sind. Andererseits sind Wiederholungen für lernschwächere Schüler auch eine Lernhilfe. Darüber hinaus machen Wiederholungen im Lernzirkel die Vernetzung der Stationsinhalte erkennbar.

Eine Durchführung der Lernzirkel mit festen, zwischen den Stationen wechselnden Dreiergruppen ist am sinnvollsten, weil

- bei Zweiergruppen häufig der schneller Lernende dominiert und in Vierergruppen selten mehr als zwei arbeiten,
- sich zu dritt noch gut experimentieren lässt,
- die ständig verfügbare Kommunikationsmöglichkeit innerhalb der Gruppe eine ausreichende Verarbeitung des vielfältigen Informationsangebots bietet,
- innerhalb der Gruppe auch Einzel- und Partnerarbeit möglich sind,
- Gruppenarbeit eine für die Oberstufe angemessene Sozialform ist,
- die Gruppenarbeit zusammen mit der Einzelarbeit im Test und dem Austausch im Kurs bei den Präsentationen ein breites Spektrum an Sozialformen bietet.

In den Präsentationen trägt jede Gruppe längs ca. 15 min die Lernergebnisse einer ihr zugeordneten Station, z. B. mit PowerPoint, vor. Der potenziell gleiche Wissensstand der Schüler stellt sicher, dass alle die Korrektheit und die Qualität der Präsentation einschätzen und an der Diskussion teilnehmen können. Während der Präsentation protokollieren die beiden anderen Schüler der vortragenden Gruppe Fehler, Ergänzungen und Verbesserungsvorschläge mit. Diese fließen dann in die vom Lehrer zu korrigierende Ausarbeitung für den Kurs mit ein.

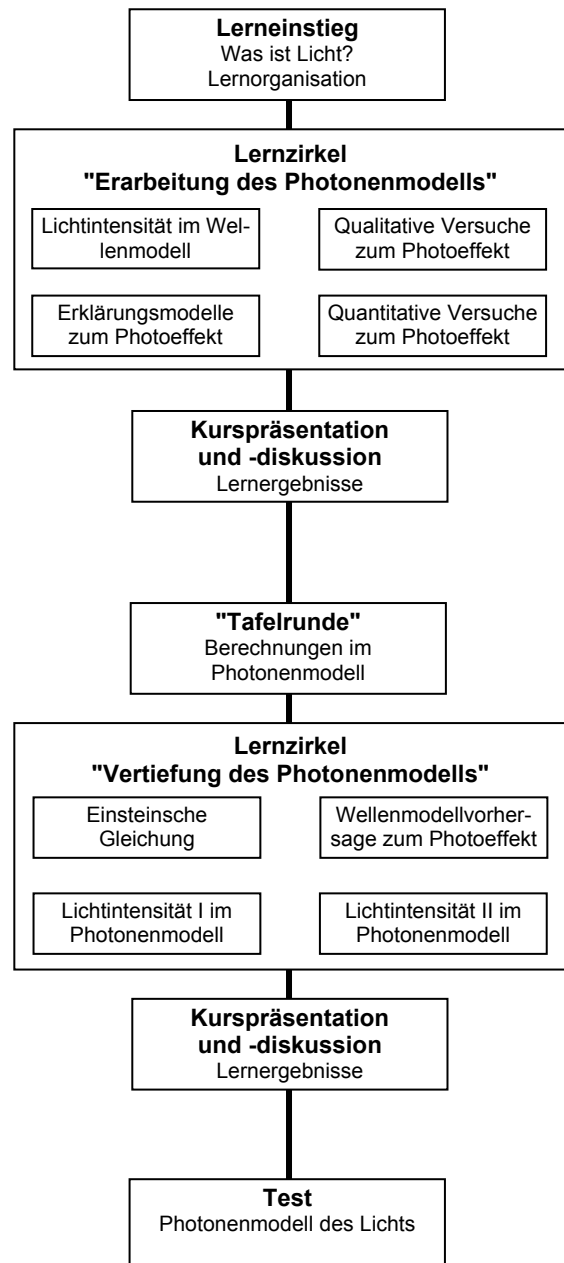


Abb. 1: Struktur der Lerneinheit "Photonenmodell des Lichts".

Der Wissenserwerb des netzwerkartigen Wissens zur Erklärung des Photoeffekts wird mit einer Tabelle (Tab. 1) organisiert. Im Laufe der Lerneinheit wird die mit Überschriften versehene Tabelle von den Schülern vervollständigt. Dabei wird die Fülle der Informationen bereits beim Lernen reduziert. Weitere in den Lernzirkeln nicht erarbeitbare experimentelle Befunde (Zeile 5 und Zeile 6) können ergänzt und die Erklärbarkeit im Wellen- und Photonenmodell miteinander verglichen werden. Vor dem Test stehen die Tabelleninhalte dann als Wissensplan zur Verfügung [5].

<b>Erklärung des Photoeffekts</b>		
<p><b>Beschreibung des Photonenmodells</b> Licht besteht aus kleinen in Raumpunkten konzentrierten Energiepaketen (Lichtquanten, Photonen) mit der Energie <math>E_{ph} = hf</math>. Ihre Geschwindigkeit ist im Vakuum die Lichtgeschwindigkeit und ihre Energie ist umso größer, je größer die Frequenz bzw. je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist. Die Photonendichte von Licht ist umso größer, je größer die Lichtintensität ist.</p> <p><b>Größen</b> Lichtfrequenz <math>f</math>, Grenzfrequenz <math>f_g</math>, Plancksches Wirkungsquantum <math>h</math>, Photonenenergie <math>E_{ph}</math>, Auslöseenergie <math>E_A</math>, kinetische Elektronenenergie <math>E_{kin}</math>, Lichtintensität <math>I</math>, Photostrom <math>I_e</math>, Photonendichte <math>n</math>.</p> <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> erklärbar, <input type="checkbox"/> nicht erklärbar</p>		
Experimentelles Ergebnis	Erklärbarkeit im Wellenmodell	Erklärbarkeit im Photonenmodell
Für $f > f_g$ werden Elektronen ohne zeitliche Verzögerung nach dem Auftreffen des Lichts ausgelöst.	<input type="checkbox"/> Die Energie einer elektromagnetischen Welle ist über dem Raum verteilt. Es braucht daher Zeit bis mindestens die Energie $E_A$ eingestrahlt ist. Eine rechnerische Abschätzung ergibt zu große Auslösezeiten.	<input checked="" type="checkbox"/> Ein Photon kann seine in einem Raumpunkt konzentrierte Energie ohne Zeitverlust an ein Elektron abgeben.
Für $f = \text{konst.}$ hängt $E_{kin}$ nicht von $I$ ab.	<input type="checkbox"/> Eine größere $I$ (größere Amplitude und Energie der Welle) müsste zu größerem $E_{kin}$ führen.	<input checked="" type="checkbox"/> Nach $E_{kin} = hf - E_A$ ist $E_{kin}$ unabhängig von $I$ .
Je größer $f$ , desto größer $E_{kin}$ der ausgelösten Elektronen.	<input type="checkbox"/> Die Intensität einer elektromagnetischen Welle ist unabhängig von $f$ . Daher dürfte $E_{kin}$ auch nicht von $f$ abhängen.	<input checked="" type="checkbox"/> Für $E_A = \text{konst.}$ nimmt nach $E_{kin} = hf - E_A$ $E_{kin}$ mit $f$ zu.
Unabhängig von $I$ werden für $f < f_g$ keine Elektronen ausgelöst.	<input type="checkbox"/> $I$ einer elektromagnetischen Welle ist unabhängig von $f$ . Daher müssten unabhängig von $f$ Elektronen ausgelöst werden.	<input checked="" type="checkbox"/> Für $hf > E_A$ bzw. $f > E_A/h = f_g$ ist $E_{kin} > 0$ .
Für $f = \text{konst.}$ nimmt $I_e$ mit $I$ zu.	<input checked="" type="checkbox"/> Ein größeres $I$ bedeutet im Wellenmodell eine größere Amplitude der Welle. Es werden daher mehr Elektronen ausgelöst.	<input checked="" type="checkbox"/> Ein größeres $I$ bedeutet größeres $n$ .
Die meisten Elektronen werden senkrecht zur Einfallrichtung des Lichts emittiert.	<input checked="" type="checkbox"/> Der Feldstärkevektor einer elektromagnetischen Welle steht senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung. Die Elektronen werden daher in Feldstärke-richtung beschleunigt.	<input type="checkbox"/> Die meisten Elektronen sollten in Richtung der einfallenden Photonenströmung emittiert werden.

**Tab. 1: Im Laufe der Lerneinheit zu vervollständigende Tabelle zur Erklärung des Photoeffekts.**

Eine Anpassung der Lerneinheit an die Kursgröße und die verfügbare Unterrichtszeit ist möglich, indem

- nichtexperimentelle Stationen verdoppelt werden,
- Stationsaufgaben als Hausaufgabe weitergeführt werden,
- bei einer blockierten Station die Schüler sich anhand des Stationsblattes auf diese vorbereiten oder mit der Ausarbeitung der Präsentation beginnen,
- Wahlstationen angeboten werden.

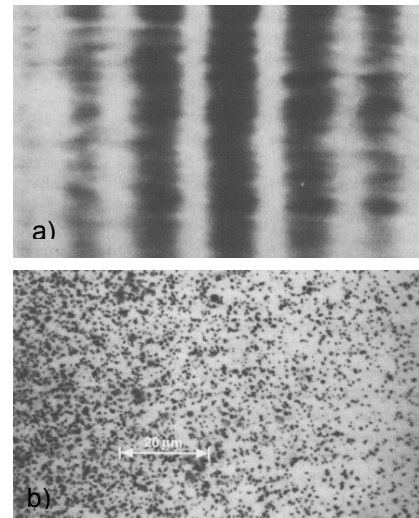
Im Folgenden werden einige Aspekte der Lerneinheit näher beschrieben.

## 2.1 Lerneinstieg

Im Lerneinstieg "Was ist Licht?" soll das Vorwissen der Schüler zu Lichtmodellen aktiviert und die Lichtquantenhypothese aufgestellt werden. Im Hinblick auf die Lerneinheit sollen

die Schüler eine forschende Haltung zum Wesen des Lichts einnehmen. Folgende Inhalte und Vorgehensweisen bieten sich an:

- Modellverständnis: In einer Nebeneinanderstellung der bisher unterrichteten Modelle (Strahlen-, Wellen- und Teilchenmodell nach Newton) werden die Wege zu den Modellen, die Unterschiede und der Gegenstandsbereich der Modelle betrachtet [6].
- Historischer Kontext des Photonenmodells: In einem Lehrervortrag werden die an der Entwicklung des Photonenmodells beteiligten Physiker (Lenard, Hallwachs, Planck, Maxwell, Einstein) und ihre Arbeitsgebiete vorgestellt.
- Photonenhypothese: In einem Realexperiment wird die Intensitätsverteilung des an einem Doppelspalt gebeugten Laserlichts bei geringer Lichtintensität auf Film festgehalten. Zur Überprüfung der Schüler-Hypothesen zum Versuchsergebnis – wobei nur klar ist, dass ein Interferenzmuster zu sehen sein wird – werden die Bilder aus Abb. 2 gezeigt. Die Vorgehensweise hat folgende Vorteile:
  - Teilchen im mechanistischen Sinne Newtons können kaum durch Stoß die Schwärzungspunkte erzeugt haben. Im Allgemeinen ist den Schülern aber bekannt, dass chemische Reaktionen unter Energieaufnahme (z.B. Absorption von Licht) ablaufen können. Dies und eine Diskussion um den Einfluss der Körnigkeit des Films auf das Versuchsergebnis legen die Formulierung einer Energieteilchenhypothese nahe.
  - Zusammen mit dem Photoeffekt und der Deutung der Schwarzkörperstrahlung nach Planck (Text zur Station „Erklärungsmodelle zum Photoeffekt“) können also bereits drei Versuche im Photonenmodell gedeutet werden. Man ist dann nicht mehr so zwingend auf eine experimentelle Behandlung des Compton-Effektes angewiesen.
  - Die Schüler sehen, dass beim Doppelspaltversuch Wellen- und Teilchenaspekt des Lichts gemeinsam auftreten können.



**Abb. 2: Photographische Aufnahme der Intensitätsverteilung hinter einem Doppelspalt (a), ca. 500-fach vergrößerte Betrachtung der Aufnahme unter einem Mikroskop (b), aus [7].**

Ziel der Lernorganisation ist es, das Lernfeld offen zu legen und eine langfristige, über den Stundenrhythmus hinausgehende Lernperspektive durch folgende Aspekte zu schaffen:

- Ablauf der Lerneinheit: Lerneinheit mit Strukturdiagramm vorstellen, Kleingruppen einteilen, Stationsmappen mit den Stationsarbeitsblättern ausgeben, experimentelle Stationen vorstellen, zeitlichen Rahmen vorgeben.
- Eigenverantwortung für den Lernprozess: Lernmöglichkeiten vorstellen (Lehrer als Lernberater, Lernen in der Gruppe und von anderen Gruppen, Möglichkeit auch weitere Informationsmaterialien wie Schulbuch und Internet zu nutzen, individuelles Lerntempo), Test zur Umsetzung des Lernangebots in einen individuellen Wissenszuwachs (für die Angemessenheit des Tests zur Lernmethode sollte jede Gruppe 1 - 2 Testfragen beim Lehrer einreichen können).
- Lernvorstellungen: Das Lernen in der Schule ist immer noch stark durch eine lineare, wohl proportionierte Informationsaufnahme und -verarbeitung geprägt. Den Schülern sollte verständlich gemacht werden, dass auf ein Gesamtziel „Besseres Verstehen der Natur von Licht“ hingearbeitet wird und nicht immer alle Fragen sofort geklärt werden können. Dazu tragen auch die Stationsmappen bei, in denen während der Lerneinheit alle Unterlagen und erarbeiteten Materialien gesammelt werden [4].

## 2.2 Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells"

Der Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells" besteht aus vier Stationen, die alle Realexperimente beinhalten. Die Stationsmaterialien (Stationsblätter siehe Anhang) sind nach dem Schema Materialien-Experimente-Aufgaben strukturiert und bieten vielfältige Möglichkeiten zum Lernen mit allen Sinnen und unterschiedlichen Kodierungen. Die Inhalte der Stationen sind:

- Lichtintensität im Wellenmodell: Experiment zur Wiederholung des Wellenmodells, Messung der Lichtintensität [8], Licht als kontinuierliche Energieströmung.
- Qualitative Versuche zum Photoeffekt: Entdeckung und Erklärung des Photoeffekts, Abhängigkeit des Photoeffekts von der Wellenlänge, dem Kathodenmaterial und der Lichtintensität, Messmethode für die kinetische Energie der Elektronen.
- Quantitative Versuche zum Photoeffekt: Einsteinsche Gleichung ( $h$ -Bestimmung), Unabhängigkeit der kinetischen Energie der Elektronen von der Lichtintensität (siehe 2.3), Universalität von  $h$ , Bestimmung von Auslösearbeiten.
- Erklärungsmodelle zum Photoeffekt: Experiment zur sofortigen Auslösung der Elektronen<sup>1</sup> [9], Erarbeitung des Photonenmodells und der Erklärung des Photoeffekts mit Texterschließungsverfahren [10] anhand zweier didaktisch aufbereiteter Texte [11].

An der zuletzt genannten Station sollten zu Beginn des Lernzirkels eher theoretisch interessierte Schüler arbeiten.

## 2.3 Quantitative Untersuchung des Photoeffekts mit einem RCL

Mit einem Remotely Controlled Laboratory (RCL) kann ein Nutzer (Client) über das Internet ein an einem beliebigen Ort aufgestelltes Realexperiment durchführen (Abb. 3). Zur Steuerung des Experiments und für Messungen wird zwischen Webserver und Experiment ein Interface eingesetzt. Eine oder zwei Webcams erlauben dem Nutzer das Experiment quasi in Echtzeit zu verfolgen und zu kontrollieren [12].

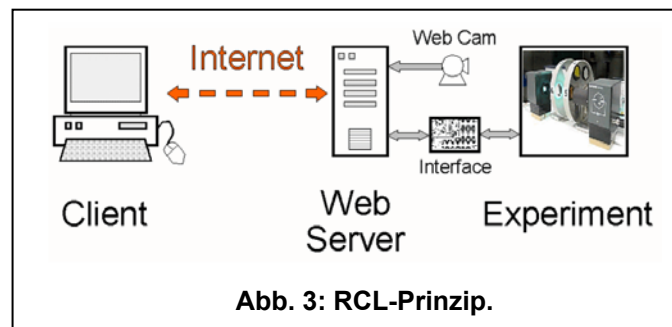


Abb. 3: RCL-Prinzip.

Beim RCL Photoeffekt [13] wurde der Versuch des Herstellers [14] um einen Revolver mit Graufiltern zur Variation der Lichtintensität ergänzt. Ein weiteren Revolver mit passenden Farbfiltern für die Hg-Spektrallinien erlaubt die Variation der Wellenlänge (Abb. 3a). Über das Bedienfeld (Abb. 3b) lassen sich die Motoren der Revolver ansteuern sowie Intensität und Wellenlänge variieren. Aus den Messwerten lassen sich die Diagramme  $E_{\text{kin}}(f)$  (Abb. 3c) und  $E_{\text{kin}}(T)$  (Abb. 3d) erstellen.

Durch den Einsatz des RCLs ergeben sich folgende Vorteile:

- der je nach Versuchsversion zeitaufwendige Versuchsaufbau entfällt,
- die Fernsteuerung und die Methode der direkten Spannungsmessung (die etwas diffizile Einstellung einer Gegenspannung entfällt) erlauben die – gerade für einen Lernzirkel wichtige – zügige Versuchsdurchführung und sichere Messwertaufnahme,
- ein typisches Lehrerexperiment wird zu einem Schülerexperiment, das alle Schüler in der Schule oder sogar von zu Hause aus durchführen können,

<sup>1</sup> Der Versuch zeigt lediglich, dass die Auslösezeit der Elektronen kleiner ist als die Summe von Lichtlaufzeit, Signallaufzeit zwischen Photozelle und Lautsprecher und Schallaufzeit.

- die für das Photonenmodell sprechende Unabhängigkeit der Elektronenenergie von der Lichtintensität kann experimentell überzeugend nachgewiesen werden.

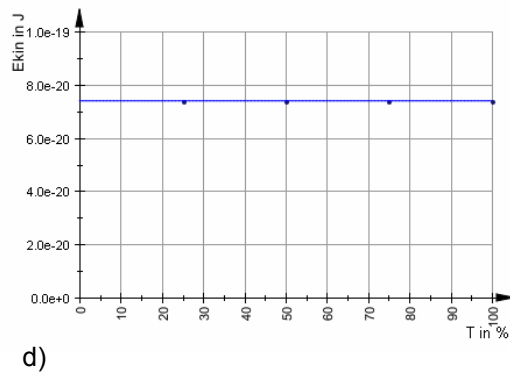
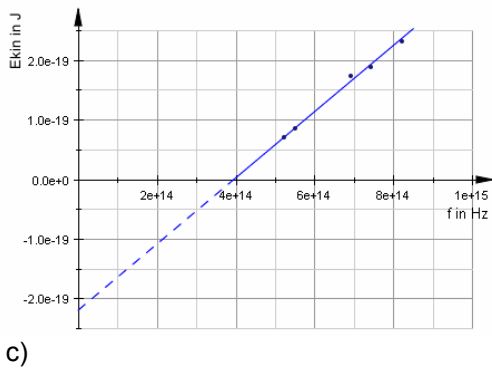


**RCL - Fotoeffekt**  
**Labor**

Sie haben noch  Sekunden Zeit das Experiment zu bedienen.

Status: Lampe eingeschaltet.

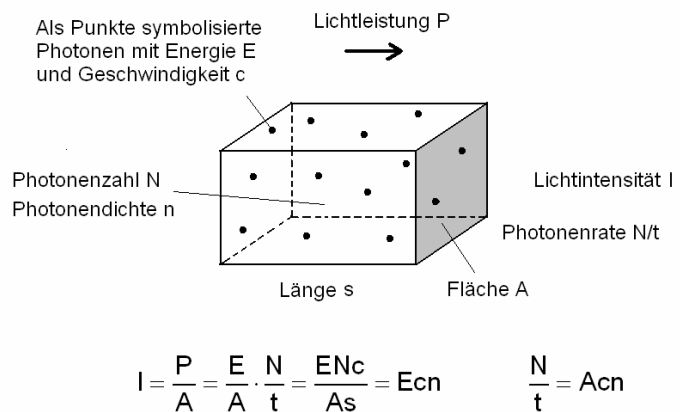
<a href="#">A: offen T = 100%</a>	<a href="#">Filter 1 - 366nm</a>
<a href="#">B: Graufilter T = 75%</a>	<a href="#">Filter 2 - 405nm</a>
<a href="#">C: Graufilter T = 50%</a>	<a href="#">Filter 3 - 436nm</a>
<a href="#">D: Graufilter T = 25%</a>	<a href="#">Filter 4 - 546nm</a>
<a href="#">E: geschlossen T = 0%</a>	<a href="#">Filter 5 - 578nm</a>
	<a href="#">Filter schliessen</a>



**Abb. 4: RCL Photoeffekt.** (a) Bild der Webcam mit Drossel, Hg-Lampe, Photozelle, Messverstärker und Voltmeter sowie Revolvern zum Einstellen der Transmission (Lichtintensität) mit 4 Graufiltern und der Wellenlänge mit 5 Farbfilttern. (b) Bedienungsfeld zum Ein- und Ausschalten der Lampe und zur Wahl der Filter. (c) Messergebnis  $E_{kin}(f)$ -Diagramm mit  $h = 5,6 \cdot 10^{-34}$  Js und  $W_A = 2,2 \cdot 10^{-19}$  J = 1,4 eV von PbS. (d) Messergebnis  $E_{kin}(T)$ -Diagramm mit von der Lichtintensität  $I$  unabhängiger Elektronenenergie  $E_{kin}$  für die Wellenlänge  $\lambda = 578$  nm.

## 2.4 Lernzirkel "Vertiefung des Photonenmodells"

Im zweiten Lernzirkel "Vertiefung des Photonenmodells" werden an den zwei Stationen "Einsteinsche Gleichung" und "Wellenmodellvorhersage zum Photoeffekt" (Stationsblätter siehe Anhang) theoretische Vorhersagen nach dem Teilchen- und Wellenmodell zum Photoeffekt diskutiert. Eine wichtige Funktion von Modellen – hier: experimentelle Ergebnisse vorherzusagen – wird betont. Die Aufgaben können eigenständig mit den Kenntnissen aus dem ersten Lernzirkel gelöst werden und vertieft damit das bereits erworbene Wissen.



**Abb. 5: Tafelbildvorlage zur Berechnung der Photonenströmung.**

Die zwei weiteren Stationen "Lichtintensität I und Lichtintensität II im Photonenmodell" müssen in einer „Tafelrunde“ (vgl. Abb. 1) mit den Schülern gemeinsam vorbereitet werden. Es wird ein quantitativer Blick auf die Photonenströmung geworfen, und die wichtigen Zusammenhänge Lichtintensität  $I \sim$  Photonendichte  $n$  und Lichtintensität  $I \sim$  Photonenrate  $N/t$  hergeleitet (Abb. 5). Analoge Betrachtungen sind den Schülern von der Behandlung der Lorentzkraft und des Halleffekts her bekannt (Zusammenhang Stromstärke – Geschwindigkeit - Ladungsträgerdichte); solche Betrachtungen sind exemplarisch für die Berechnung makroskopischer Größen aus mikroskopischen.

Einen Einstieg in die Tafelrunde bilden ein mit etwas Kreidestaub sichtbar gemachter Laserstrahl, der auf eine weiße Fläche fällt, und die Frage, welche quantitativen Aussagen über die Photonenströmung gemacht werden können. Im Laufe der Diskussion gibt der Lehrer den Raum vor der Tafel frei und setzt sich zum Kurs. Wer etwas zur Diskussion beitragen möchte tritt vor die Gruppe und kann die Tafel für seinen Beitrag als Medium nutzen. Betrachtungen, welche Größen gegeben sind, welche Größen die Photonenströmung beschreiben und wie diese zusammenhängen, strukturieren die Diskussion.

### 3 Fazit

Die vorgestellte Lerneinheit legt konsequent ein wichtiges Thema des Oberstufenunterrichts in Physik in die Hände der Schüler. Die höheren fachlichen Anforderungen eigenständig bereits erworbenes Wissen anzuwenden und ein "neues", angemessenes Modell des Lichts zu entwickeln werden für Schüler durch die Beachtung der Schülervorstellungen, die Durchführung von Lehrer- als Schülerexperimente, die Lernzirkel, die Strukturierung des Wissenserwerbs anhand einer Tabelle, das Vortragen der Lernergebnisse und nicht zuletzt durch den Abschluss der Lerneinheit mit einem Test erfüllbar. Die Lerneinheit bietet darüber hinaus mit ihren zwei Lernzirkeln für Lehrer wie auch für Schüler die Möglichkeit, die Methode Lernzirkel einzuführen und einzuüben.

### Literatur

- [1] Lichtfeldt, M. (1992): Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht. Westarp, Essen.
- [2] Fischler, H. (1992): Quantenphysik in der Schule - Anschaulich oder richtig? PhiS 30, 3, 98-102.
- [3] Lehrplan Physik Sekundarstufe II, Rheinland-Pfalz. <http://alt.bildung-rp.de/lehrplaene/alleplaene/physik-gym-oberstufe.pdf>
- [4] van der Gieth, H. - J. (2004): Lernzirkel - Die neue Form des Unterrichts. Buch Verlag Kempen, Kempen, 23 ff.
- [5] Friedrich, F. (2003): Lerntheorien und selbstgesteuertes Lernen. Universität Rostock, Zentrale Verwaltung, Dezernat Studium und Lehre, 21-24.
- [6] Horn, M. E., Leisner, A. & Mikelskis, H. F. (2002): Probleme der Modellbildung in der Optik. Tagungs-CD der DPG-Frühjahrstagung Leipzig 2002. [http://www.uni-potsdam.de/u/physik/didaktik/horn/dpg\\_leipzig\\_b.pdf](http://www.uni-potsdam.de/u/physik/didaktik/horn/dpg_leipzig_b.pdf).
- [7] Grehn, J. & Krause, J. (1998): Metzler Physik. Schroedel, Hannover, 383.
- [8] Kircher, E. & Schneider, W. B. (2003): Physikdidaktik in der Praxis. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 212-228.
- [9] Leitner, E. & Finckh, U. (2007): Leifi - Trägheitsloses Einsetzen des Photostromes. [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph12/versuche/09fotoeff/traegheit.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/09fotoeff/traegheit.htm)
- [10] Leisen, J.: Strategien im Umgang mit Sachtexten - Texterschließungsstrategien. <http://www.uni-koblenz.de/~odsleis/lesekompetenz/3%20Texterschliessungsstrategien.pdf>.

- [11] Flachsel, E. (1985): Hundertfünfzig Physik-Rätsel. Klett, Stuttgart, 102-104.
- [12] Altherr, S., Vetter, M., Eckert, B. & Jodl, H.-J. (2005): Experimentieren aus der Ferne – Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory – RCL). PdN-PhiS 6, 40-46.
- [13] RCL-Portal: <http://rcl.physik.uni-kl.de>.
- [14] Phywe: Betriebsanleitung Fotozelle zur h-Bestimmung. <http://www.phywe.de/download/products/0677800D.pdf>.

### **Anschrift der Verfasser**

OStR Sebastian Gröber, Martin Vetter, OStR Dr. Bodo Eckert und Prof. Dr. Hans-Jörg Jodl, AG Optische Festkörperspektroskopie und Didaktik der Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße, 67663 Kaiserslautern, E-Mail: [sebastian.groeber@lmz.rlp.de](mailto:sebastian.groeber@lmz.rlp.de).

### **Kurzfassung**

#### **Das Photonenmodell des Lichts - eine Lerneinheit mit Lernzirkeln und einem Remotely Controlled Laboratory (RCL)**

*S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H.-J. Jodl*

Es wird eine Lerneinheit vorgestellt, in der sich Leistungskursschüler eigenständig das Photonenmodell des Lichts erarbeiten können. Die Hauptelemente sind zwei Lernzirkel, ein erster zur Erarbeitung des Photonenmodells mit dem Photoeffekt und ein zweiter zur Vertiefung des Photonenmodells durch Berechnungen der Photonenströmung. An den Lernstationen werden traditionelle Lehrerexperimente zum Photoeffekt als Schülerexperimente durchgeführt. Die quantitative Untersuchung des Photoeffekts erfolgt mit einem über das Internet bedienbaren Realexperiment, einem Remotely Controlled Laboratory (RCL). In der Lerneinheit werden die Vorstellungen der Schüler zum Photonenmodell und zum Welle-Teilchen-Dualismus berücksichtigt.



# Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells"

## Station: Lichtintensität im Wellenmodell

### Materialien

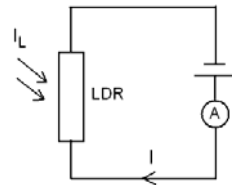
- Laserpointer ( $P < 0,1 \text{ mW}$  (Laserklasse II),  $640 \text{ nm} < \lambda < 660 \text{ nm}$ )
- Glühlampe mit Netzgerät
- Doppelspalt mit  $d = 0,3 \text{ mm}$
- LDR (Light Detectable Resistor - Lichtempfindlicher Widerstand), Batterie und Amperemeter
- Sammel- und Zerstreuungslinse, graue Transparentfolie
- Gliedermaßstab
- Diverses Stativ- und Verbindungsmaterial

### Experimente

1. Beleuchtet den Doppelspalt senkrecht mit Laserlicht:
  - a) Erklärt die Entstehung der Lichtverteilung hinter dem Doppelspalt.
  - b) Überprüft die Wellenlänge des Laserpointers.

2. In der Messschaltung mit einem LDR ist die Stromstärke  $I$  umso größer, je höher die Lichtintensität  $I_L$  ist:

- a) Untersucht den Zusammenhang von Lichtintensität und Lichtquellenabstand beim Laserlicht und beim Glühlampenlicht.
- b) Untersucht die Wirkung der Sammel- und Zerstreuungslinse.



3. Die Lichtintensität ist definiert durch  $I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t}$  (Lichtleistung  $P$  in  $\text{W}$ : von der Lichtquelle abgegebene Leistung - auch als Strahlungsfluß bezeichnet, Fläche  $A$  in  $\text{m}^2$ : Fläche auf die sich die abgestrahlte Leistung verteilt, Lichtenergie  $E$  in  $\text{J}$ , Zeit  $t$  in  $\text{s}$ : Zeit in der  $E$  abgegeben wird):

- a) Bestimmt die Lichtintensität des Laserlichtes in  $\text{W/m}^2$ .
- b) Bestimmt die Lichtintensität des Glühlampenlichts in  $1 \text{ m}$  Abstand in  $\text{W/m}^2$ .
- c) Bestimmt die Transmission  $T$  der grauen Transparentfolie in  $\%$ .

### Aufgaben

1. Berechnet die Lichtintensität der Sonne ( $P = 3,86 \cdot 10^{26} \text{ W}$ ) an der Erdoberfläche (Einfluß der Erdatmosphäre soll unberücksichtigt bleiben, der berechnete Wert heißt Solarkonstante).
2. Gewebe kann schon ab einer Lichtintensität von  $1 \text{ W/m}^2$  koagulieren ("schmelzen"). Gefährdet der Blick ins Laserlicht oder in die Sonne wirklich unsere Netzhaut?
3. Das Applet unter <http://www.goethe.lb.bw.schule.de/faecher/physik/physik/physik-13/0366-elektromagn-welle/index.htm> zeigt die Ausbreitung einer harmonischen ebenen elektromagnetischen Welle:

Nennt Merkmale einer ebenen elektromagnetischen Welle.

Berechnet die Amplitude  $\hat{E}$  des elektrischen Feldstärkevektors nach  $I = \frac{\epsilon_0 c \hat{E}^2}{2}$  für das Laserlicht. Wovon hängt die Lichtintensität nicht ab? Vergleicht die Amplitude mit der Feldstärke eines Plattenkondensators mit  $U = 3 \text{ kV}$  und  $d = 3 \text{ cm}$ .

# Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells"

## Station: Qualitative Versuche zum Photoeffekt

### Materialien

- Quecksilberdampfampe mit Trafo
- 3 Interferenzfilter, Glasscheibe, Zinksulfidschirm (leuchtet bei Bestrahlung mit UV-Licht)
- Elektroskop und Hochspannungsnetzgerät (alternativ PVC-Stab, Hartgummistab und Katzenfell)
- Schleifpapier, Metallplatten aus Aluminium, Eisen und Zink
- Diverses Stativ- und Verbindungsmaterial

### Experimente

1. Untersucht mit dem Zinksulfidschirm den Einfluß der Glasplatte auf das Licht der Quecksilberdampfampe.
2. Steckt die Zinkplatte auf das Elektroskop und ladet sie mit dem Hochspannungsnetzgerät positiv und negativ auf. Entladet sie mit der Hand oder einem Erdkabel.
3. Diskutiert, ob die zuvor geschmirgelte Zinkplatte auch durch Licht auf- oder entladen werden könnte. Notiert Eure begründeten Vermutungen und startet dann den Versuch.
4. Untersucht ob der beobachtete Effekt material-, wellenlängen- oder intensitätsabhängig ist. Hinweis: Einmaliges Schmirgeln der Metallplatten nicht vergessen!

### Aufgaben

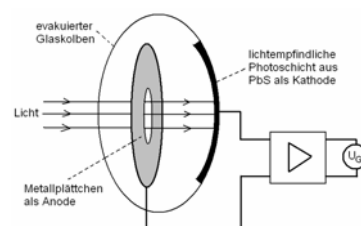
1. Stellt die Versuchsergebnisse in geeigneter Form zusammen.
2. Erklärt die Versuchsergebnisse von Nr. 3. Welche Erscheinung bezeichnet man als Photoeffekt?
3. Wie erklärt ihr Euch die Versuchsergebnisse aus Nr. 4? Warum müssen die Metallplatten vorher geschmirgelt werden?
4. Was erwartet ihr, wenn direkt gegenüber der beleuchteten Zinkplatte eine zweite nicht photoelektrisch wirksame Metallplatte aufgestellt wird? Wie könnte man damit die Energie der Photoelektronen bestimmen?

# Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells"

## Station: Quantitative Versuche zum Photoeffekt

### Materialien

- Kurzinformation zu Photozelle und Photoeffekt auf diesem Arbeitsblatt
- Über das Internet ferngesteuertes Realexperiment - Remotely Controlled Laboratory (RCL) unter <http://rcl.physik.uni-kl.de> im Menüpunkt Labs/Photoeffekt/Labor



### Experimente

In einem evakuierten Glaskolben befindet sich eine Photoschicht aus einem lichtempfindlichen Stoff z. B. PbS (Bleisulfid). Fällt Licht auf diese Schicht, so verlassen Elektronen die Schicht (Photoeffekt) mit der kinetischen Energie  $E_{kin}$  und laden das gegenüberliegende Metallplättchen auf. Ist der Aufladevorgang beendet, dann beobachtet man eine konstante Gegenspannung  $U_G$  zwischen den "Platten". Für die kinetische Energie  $E_{kin}$  mit der die Elektronen die Kathode verlassen gilt  $E_{kin} = eU_G$ .

1. Untersucht den Zusammenhang zwischen der Frequenz  $f$  des eingestrahlt Lichts und der kinetischen Energie  $E_{kin}$  der ausgelösten Elektronen.
2. Untersucht den Zusammenhang zwischen der Intensität des eingestrahlt Lichts und der kinetischen Energie  $E_{kin}$  der ausgelösten Elektronen.



### Aufgaben

1. Welche Versuchsbestandteile in der Tabelle gehören zur Lichterzeugung, welche zur Lichtpräparation, welche zur Lichtumwandlung und welche zur Messung der kinetischen Energie der Elektronen? Ordnet den Versuchsbestandteilen ihre Funktion durch Pfeile zu.
2. Stellt den untersuchten Zusammenhang aus 1. in geeigneter Form mit Excel dar. Nähert die Werte durch eine geeignete Ausgleichsfunktion an und gebt den Zusammenhang an.

Versuchsbestandteil	Funktion
Messverstärker	Spannungs-/Stromerzeugung
Intensitätsrevolver	Gegenspannungsmessung
Photozelle	Lichterzeugung diskreter Wellenlängen
Trafo	Lichtintensitätsregelung
Wellenlängenrevolver	Lichtenergiewandler
Digitalvoltmeter	Wellenlängenfilterung
Quecksilberdampfampe	Stromlose Spannungsmessung

3. Tragt zusätzlich die Messwerte für eine Photozelle aus Kalium (K) und Caesium (Cs) in die Darstellung aus 1. ein: Was haben die Graphen gemeinsam und worin unterscheiden Sie sich? Welche Größen sind Variablen, welche Parameter?
4. Notiert eine alle drei Graphen gemeinsam beschreibende Gleichung. Interpretiert die auftretenden Terme bzw. Größen physikalisch (Lernhilfe: Während der Verdampfung von Wasser wird Wärmeenergie zum Herauslösen der Moleküle aus dem Flüssigkeitsverband benötigt).

Wellenlänge $\lambda/nm$	Gegenspannung $U_G/V$ für K	Gegenspannung $U_G/V$ für Cs
578	0,00	0,52
546	0,03	0,60
436	0,62	0,90
405	0,81	1,12
366	1,41	1,44

5. Wie ist der Spannungswert 0 V für 578 nm bei Kalium zu interpretieren? Bei welcher Frequenz (Wellenlänge) ist bei Frequenzverminderung  $U_G$  zum ersten mal Null? Was geschieht in der Photozelle bei Beleuchtung mit Licht unterhalb dieser Frequenz?

# Lernzirkel "Erarbeitung des Photonenmodells"

## Station: Erklärungsmodelle zum Photoeffekt

### Materialien

- Text "Energiepaketchen"
- Text "Die Sammelbüchsentheorie"
- Photozelle (gasgefüllt)
- Lichtquelle
- Verstärker
- Lautsprecher
- Kabel

### Experimente

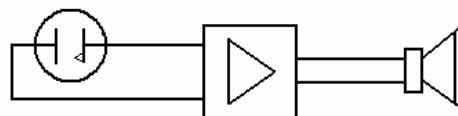
1. Baut den durch das Schaltbild gegebenen Versuch auf:



a) Wie kommt das Knacken im Lautsprecher zustande?

b) Hat der Lichtquellenabstand einen Einfluß auf den Versuch?

Lampe



Photozelle Verstärker Lautsprecher

### Aufgaben

#### 1. Photonen in der Quantentheorie

Erschließt euch den Text „Energiepaketchen“ auf folgende Weisen:

- Fragen: Wann hat Max Planck gelebt? Welche Abhängigkeit beschreibt das Plancksche Strahlungsgesetz? Welche Auffassung Plancks zur Emission und Absorption von Licht stand im Gegensatz zu den damals herrschenden Vorstellungen?
- Unklarheiten: Markiere alle Stellen die unklar sind oder zu denen du Fragen hast. Versucht die Fragen in der Gruppe zu klären.
- Blockung: Teilt den Text in sinnvolle Abschnitte ein und gebt ihnen Überschriften
- Rechenaufgaben: Wieviel J sind 1 eV, wieviel eV sind 1 J? Tragt für sichtbares Licht Wellenlänge, Farbe, Frequenz und Photonenenergie in J und eV auf übereinander angeordneten horizontalen Achsen auf. Löst die Aufgaben a) – c) zum Text.

#### 2. Erklärung des Photoeffekts

Erschließt euch den Text „Die Sammelbüchsentheorie“ auf folgende Weisen:

- Fragen: In welchem Jahr veröffentlichte Einstein seine Arbeit zur Lichtquantentheorie? Welcher Erscheinung bezeichnet man als Photoeffekt? Welche andere Bezeichnung wird noch verwendet? Weshalb können Elektronen ohne Energiezufuhr ein Metall nicht verlassen? Wozu wird die eingestrahlte Lichtenergie beim Photoeffekt verwendet?
- Unklarheiten: Markiere alle Stellen die unklar sind oder zu denen du Fragen hast. Versucht die Fragen in der Gruppe zu klären.
- Blockung: Teilt den Text in sinnvolle Abschnitte ein und gebt ihnen Überschriften
- Transformieren: Füllt zwei Zeilen der Tabelle „Erklärung des Photoeffekts“ aus.
- Beziehungen: Im Text steht ein Wort das die Beziehung zu Eurem Experiment herstellt. Findet es und füllt eine weitere Zeile der Tabelle aus. Findet im Text den Satz der eine falsche Aussage macht.
- Rechenaufgaben: Löst die Aufgaben zum Text.

# Lernzirkel „Vertiefung des Photonenmodells“

## Station: Einsteinsche Gleichung

Beim Photoeffekt wurde für  $\lambda = 405 \text{ nm}$  eine Gegenspannung von  $0,81 \text{ V}$  und für  $\lambda = 546 \text{ nm}$  eine Gegenspannung von  $0,03 \text{ V}$  gemessen:

Material	Auslöseenergie $E_A$ in eV
Bleisulfid (PbS)	1,70
Kalium (K)	2,25
Cäsium (Cs)	1,95

- Erklärt wie die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  der Photoelektronen ermittelt werden kann.
- Stellt die Messdaten in einem  $E_{\text{kin}}(f)$  - Diagramm dar. Bestimmt rein rechnerisch und graphisch/rechnerisch das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ , die Grenzfrequenz  $f_g$  und das Material der Photoschicht.
- Zeigt, dass auch für  $\lambda = 492 \text{ nm}$  Elektronen ausgelöst werden. Leitet eine Formel für die Geschwindigkeit dieser Photoelektronen her und berechnet diese.
- Welche Gegenspannung  $U_G$  zeigt der Spannungsmesser für Laserlicht mit  $\lambda = 633 \text{ nm}$  und für Licht der Quecksilberdampfampe mit  $\lambda = 366 \text{ nm}$  an?

## Station: Wellenmodellvorhersage zum Photoeffekt

Eine Fläche von  $0,5 \text{ cm}^2$  der Photoschicht einer Kaliumphotozelle ( $W_A = 2,25 \text{ eV}$ ) wird mit Licht der Wellenlänge  $\lambda = 500 \text{ nm}$  und der Intensität  $I = 20 \text{ W/m}^2$  bestrahlt ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ). 90 % der auftreffenden Lichtenergie werden von der Kaliumphotoschicht reflektiert, lediglich die restlichen 10 % werden von den Kaliumatomen mit einem quasifreien Elektron (Kaliumatomdichte  $n = 1,3 \cdot 10^{22} \text{ Kaliumatome/cm}^3$ ) bis in eine Tiefe von  $0,1 \cdot \lambda$  absorbiert:

- Wie lange würde es nach diesen Daten dauern bis Elektronen ausgelöst werden, wenn man annimmt, dass sich die absorbierte Lichtenergie gleichmäßig auf die Kaliumatome verteilt? Welche Schlussfolgerung zieht ihr aus diesem Ergebnis?
- Welche veränderten Voraussetzungen führen zu einer verkürzten Auslösezeit? Begründet mit qualitativen Argumentationen.

## Station: Lichtintensität im Photonenmodell I

Die Photoschicht einer Cäsium-Photozelle ( $W_A = 1,95 \text{ eV}$ ) wird mit dem parallelen Licht eines He-Ne-Lasers (Wellenlänge  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , Strahldurchmesser  $d = 4 \text{ mm}$ , Lichtleistung  $P_L = 3 \text{ mW}$ ) senkrecht bestrahlt:

- Bestimmt die Photonendichte, die Photonenrate und den Abstand zwischen den Photonen.
- Bestimmt unter der Annahme, dass jedes 10. Photon ein senkrecht aus der Photoschicht austretendes Elektron auslöst, die Anzahl der pro Sekunde ausgelösten Elektronen, den Photostrom  $I_{\text{ph}}$  und die Elektronendichte  $n$  vor der Photoschicht.
- Der Durchmesser  $d$  des parallelen Laserlichtes werde durch eine Aufweitungsoptik ohne Lichtverlust von  $4 \text{ mm}$  auf  $8 \text{ mm}$  verdoppelt: Gebt begründet an, welche Größen in b) ihren Wert nicht verändern und welche ihren Wert verändern. Berechnet deren neuen Werte.

## Station: Lichtintensität im Photonenmodell II

Ein Fahrradrücklicht strahlt rotes Licht der Wellenlänge  $\lambda = 600 \text{ nm}$  mit einer Lichtleistung  $P_L = 6 \cdot 10^{-5} \text{ W}$  gleichmäßig verteilt in alle Richtungen ab. Ein Fußgänger sieht mit seinem Auge (Pupillendurchmesser  $d = 4 \text{ mm}$ ) das Rücklicht aus  $100 \text{ m}$  Entfernung:

- Wie groß ist die Lichtintensität  $I$  des Rücklichts am Ort des Fußgängers?
- Welche Lichtleistung  $P_{\text{Auge}}$  fällt in sein Auge?
- Wieviel Photonen/s passieren die Pupille des Fußgängers?
- Aus welcher Entfernung könnte der Fußgänger das Rücklicht noch sehen, wenn dazu unser Auge mindestens eine Leistung von  $1,7 \cdot 10^{-18} \text{ W}$  benötigt. Begründe, ob das Ergebnis realistisch ist.