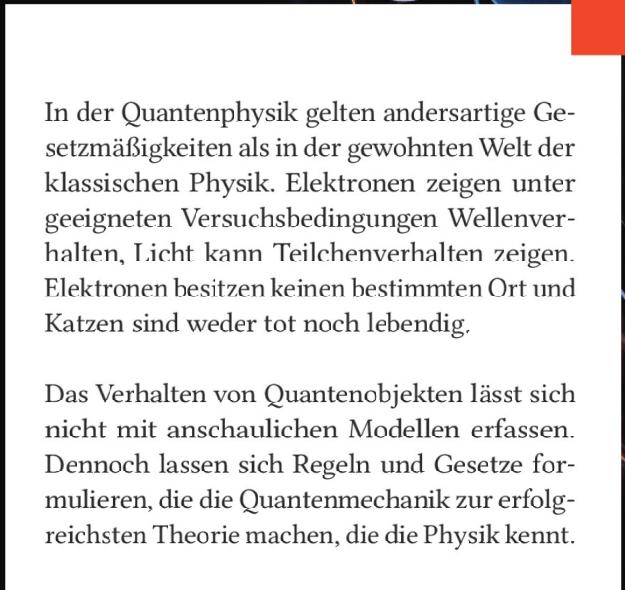


# Quantenphysik

In der Quantenphysik gelten andersartige Gesetzmäßigkeiten als in der gewohnten Welt der klassischen Physik. Elektronen zeigen unter geeigneten Versuchsbedingungen Wellenverhalten, Licht kann Teilchenverhalten zeigen. Elektronen besitzen keinen bestimmten Ort und Katzen sind weder tot noch lebendig.

Das Verhalten von Quantenobjekten lässt sich nicht mit anschaulichen Modellen erfassen. Dennoch lassen sich Regeln und Gesetze formulieren, die die Quantenmechanik zur erfolgreichsten Theorie machen, die die Physik kennt.



# 8

**Das können Sie in diesem Kapitel erreichen:**

- Sie lernen den Photoeffekt als Experiment mit weitreichenden Folgen für die Physik kennen.
- Sie führen Experimente durch, die teilchenhaftes Verhalten von Licht zeigen.
- Sie untersuchen die Interferenz einzelner Quantenobjekte.
- Sie erörtern die Anwendbarkeit klassischer Modellvorstellungen in der Quantenphysik.
- Sie diskutieren die Frage von Zufall und Vorhersagbarkeit in der Quantenphysik.
- Sie erfahren, worum es beim Paradoxon von Schrödingers Katze geht.
- Sie erfahren, dass Elektronen und Atome nicht immer einen bestimmten Ort haben.
- Sie wenden die heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation an.

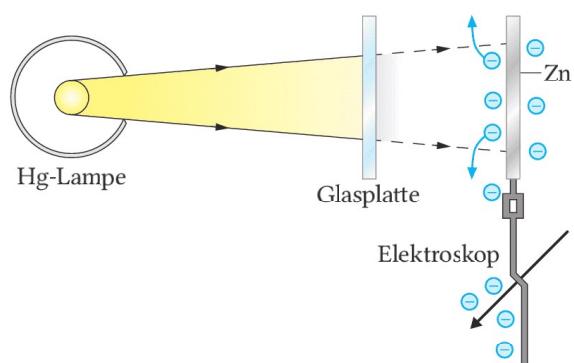
## 8.1 Der Photoeffekt

**Eine neue Physik –** Im Jahre 1900 läutete der Physiker Max PLANCK (Nobelpreis 1918) eine neue Ära der Physik ein. Er fand Gesetze, die grundlegenden Prinzipien der damaligen sogenannten **klassischen Physik** widersprachen. 30 Jahre vorher hatte man ihm noch abgeraten, Physik zu studieren: Der Energiesatz sei entdeckt, die Physik an ihrem Ende angelangt, man könne höchstens noch das eine oder andere „Stäubchen“ abwischen.

**Hallwachs-Effekt –** Als ein „Stäubchen“ sahen viele den Versuch von W. HALLWACHS an (1888; Versuch **V1**). Dort wird eine negativ geladene Zinkplatte entladen, wenn sie mit dem Licht einer Quecksilberdampflampe bestrahlt wird (Versuch **V1a**). Eine Erklärung liefert die Annahme, dass Licht Elektronen aus der Zinkplatte „herausschlagen“ kann, so dass diese das Metall verlassen. Versuch **V1b** bestätigt dies, denn bei einer positiv geladenen Platte tritt keine Entladung auf. Die Auslösung von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Licht wird als **Photoeffekt** oder auch **Hallwachs-Effekt** bezeichnet.

Überraschend ist hingegen das Versuchsergebnis, das sich beim Einführen einer Glasplatte ergibt (Versuch **V1c**). Die Glasplatte absorbiert den UV-Anteil des Lichts, ist aber durchlässig für sichtbares Licht.

### V1 Hallwachs-Versuch



- a) Das Licht einer Quecksilberdampf-Lampe entlädt die frisch geschmirgelte, negativ geladene Zinkplatte (Zn), erkennbar am Elektroskop. b) Ist die Platte positiv geladen, findet hingegen keine Entladung statt. c) Bringt man eine Glasplatte in den Strahlengang, so wird auch die negative Platte nicht mehr entladen. d) Bei der Bestrahlung mit dem Licht einer Glühlampe bleibt die Ladung der Platte ebenfalls erhalten.

In Anwesenheit der Glasplatte entlädt sich das Elektroskop nicht. Das bedeutet: Sichtbares Licht kann keine Elektronen aus der Zinkplatte herauslösen (Versuch **V1d**), selbst wenn die Lichtquelle heller scheint oder näher an die Platte gebracht wird. Nur UV-Licht ist dazu in der Lage. Beim Photoeffekt kommt es demnach auf die *Art* des Lichts an, d.h. auf dessen Frequenz  $f$ , nicht aber auf die Intensität, also die Helligkeit.

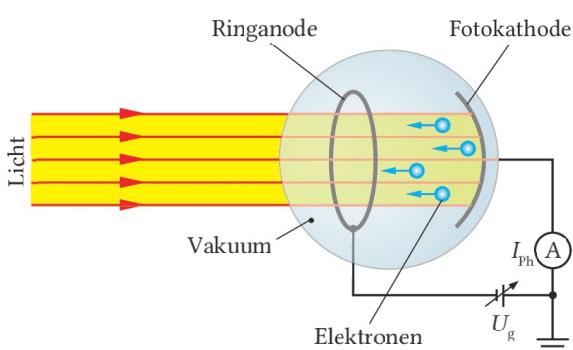
**Energie der Elektronen –** Um dieses Phänomen genauer zu betrachten, soll die kinetische Energie der von Licht ausgelösten Elektronen (auch **Photoelektronen** genannt) untersucht werden. Dazu wird der Photoeffekt im Vakuum einer Photozelle mit der sog. **Gegenfeldmethode** durchgeführt (Versuch **V2**). Bestimmt wird die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  der schnellsten Photoelektronen, die Licht aus Caesium (Cs) freisetzt. Der Effekt setzt hier auch bei sichtbarem Licht ein.

Bei blauem Licht fällt der Photostrom bei der Gegenspannung  $U_g = 0,8 \text{ V}$  auf null, d.h. die Energie der schnellsten Photoelektronen ist  $E_{\text{kin}} = e \cdot U_g = 0,8 \text{ eV}$  ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Elektronen mit weniger Energie erreichen die Anode schon früher nicht mehr. Bei gelbem Licht wird dasselbe schon bei  $U_g = 0,13 \text{ V}$  beobachtet. Für die Energie der schnellsten Elektronen erhält man dann  $E_{\text{kin}} = 0,13 \text{ eV}$  (Versuch **V2a**). Tabelle **T1** zeigt die bei der Lichtfrequenz  $f$  bestimmte kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  auch für andere Farben.

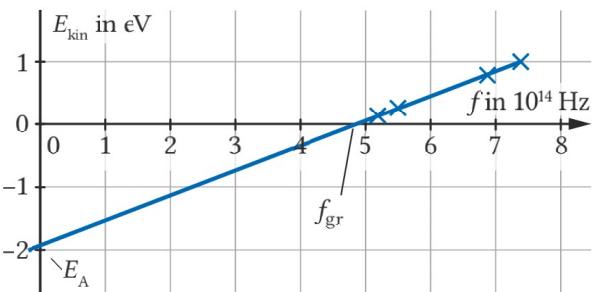
In Bild **B1** sind die Daten aus Tabelle **T1** grafisch veranschaulicht. Es liefert folgende Erkenntnisse:

- Die Energie  $E_{\text{kin}}$  der schnellsten Photoelektronen steigt linear mit der Frequenz  $f$  des Lichts, das sie aus dem Metall abgelöst hat. Je größer die Frequenz des Lichts, desto mehr Energie liefert es also.
- Die Gerade besitzt eine Nullstelle. Nur für Frequenzwerte größer als die dort befindliche **Grenzfrequenz**  $f_{\text{gr}}$  besitzen die Photoelektronen kinetische Energie. Das verwendete Licht muss also eine gewisse Energie menge besitzen, um den Photoeffekt zu ermöglichen.
- Im Bereich kleinerer Frequenzen verläuft die Gerade im negativen Bereich. Elektronen können keine negative Energie besitzen, also kann man dies so verstehen, dass ihnen der Betrag dieses Energiewertes fehlt, um das Metall zu verlassen. Der negative Achsenabschnitt der Geraden ist dann die Energiemenge, die mindestens nötig ist, um Elektronen aus dem Metall zu lösen. Sie wird als **Austrittsenergie**  $E_A$  bezeichnet.

## V2 Gegenfeldmethode



- a) Die Photozelle ist eine evakuierte Röhre, in der sich eine Ringanode und eine mit dem Metall Cäsium (Cs) beschichtete Kathode befinden. Fällt Licht auf die Kathode, lösen sich Elektronen aus der Cs-Schicht und werden von der Anode aufgefangen. Das Amperemeter zeigt einen Photostrom  $I_{\text{ph}}$  an. Zwischen Cs und dem Ring liegt eine veränderliche Gegenspannung  $U_g$  an, die die Elektronen überwinden müssen, um die Anode zu erreichen. Der Photostrom wird null, wenn die Gegenspannung  $U_g$  gerade so weit erhöht wird, dass dies auch den schnellsten Elektronen nicht mehr gelingt.
- b) Mit Hilfe einer Blende wird das einfallende Lichtbündel kleiner und der Lichtfleck auf dem Metall dunkler. Trotzdem sinken die Spannung  $U_g$  und damit auch die Energie  $E_{\text{kin}} = e \cdot U_g$  der schnellsten Photoelektronen nicht.



**B1** Auswertung von Versuch V2. Die Energie  $E_{\text{kin}} = e U_g$  der schnellsten Photoelektronen steigt mit größerer Frequenz  $f$  linear an.

Die damals führenden Physiker standen einigen Problemen gegenüber, denn folgende Widersprüche können mit den Versuchsergebnissen formuliert werden:

- Nach der Wellentheorie ist die Intensität einer elektromagnetischen Welle proportional zu ihrem Amplitudenquadrat. Die von einer Welle übertragene Energie ist wiederum proportional zu ihrer Amplitude. Sie würde die Elektronen zu stärkeren Schwingungen anregen. Eine heller leuchtende Lichtquelle müsste also zu einer höheren Energie der ausgelösten Elektronen führen, da die Welle ihnen mehr Energie liefert. Dies ist jedoch nicht der Fall (Versuch V2b).
- Ebenso müssten die Elektronen durch eine größere Beleuchtungsdauer mehr Energie erhalten. Ein Auslösen der Elektronen sollte also mit jeder Lichtquelle möglich sein, wenn man nur lange genug wartet. Der Photoeffekt ist jedoch bei manchen Wellenlängen gar nicht und bei anderen sofort zu beobachten.

Die Frequenzabhängigkeit des Effektes, also die Existenz einer Grenzfrequenz  $f_{\text{gr}}$  (Bild B1), unterhalb der keine Auslösung von Elektronen stattfindet, ist aus den beiden genannten Gründen daher nicht zu erklären.

### ! Merksatz

Der Photoeffekt (Hallwachs-Effekt) beschreibt die Auslösung von Elektronen aus einer Metalloberfläche bei der Bestrahlung mit Licht. Ob der Effekt auftritt, ist abhängig von der Frequenz des verwendeten Lichts, nicht jedoch von seiner Intensität.

Diese Beobachtungen sind mit dem Wellenmodell des Lichts nicht erklärbar.

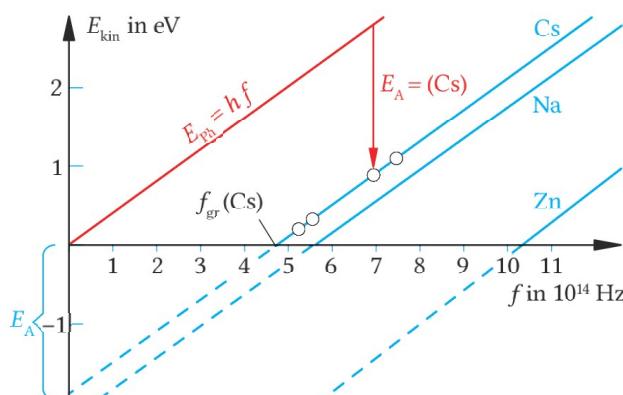
Farbe	$\lambda$ in nm	$f$ in $10^{14}$ Hz	$U_{\text{max}}$ in V	$E_{\text{kin}}$ in eV
gelb	578	5,19	0,13	0,13
grün	546	5,50	0,27	0,27
blau	436	6,88	0,81	0,81
violett	405	7,41	1,02	1,02

**T1** Kinetische Energie  $E_{\text{kin}} = e U_g$  der schnellsten Photoelektronen bei Cäsium

**Deutung des Photoeffekts –** Da die Wellentheorie nicht ausreichte, um den Photoeffekt zu erklären, mussten andere Ansätze gefunden werden, die zu einem schlüssigen Ergebnis führen. Es dauerte fast 20 Jahre, bis Albert EINSTEIN (Nobelpreis 1921) 1905 eine revolutionäre Erklärung fand, die den Grundstein für eine neue Physik legen sollte.

Wird die Gegenfeldmethode (Versuch **V2** auf S. 237) mit verschiedenen Metallen durchgeführt, so erhält man wiederum ein Diagramm, in dem die Ergebnisse veranschaulicht werden (Bild **B1**). Es fällt zum einen auf, dass der Achsenabschnitt für jede Gerade, und damit jedes Metall, ein anderer ist. Die vorangegangene Deutung als Austrittsenergie  $E_A$ , die Elektronen benötigen, um das Metall verlassen zu können, wird dadurch unterstützt. In jedem Metall sind die Elektronen unterschiedlich stark gebunden und brauchen deswegen unterschiedlich viel Energie, um abgelöst zu werden. Zum anderen ist zu erkennen, dass alle Geraden dieselbe Steigung besitzen. Die kinetische Energie der Photoelektronen wächst also mit steigender Frequenz des einstrahlenden Lichts immer auf gleiche Weise und ist damit unabhängig vom verwendeten Metall. Alle Geraden können demnach mit der Gleichung  $E_{\text{kin}} = hf - E_A$  beschrieben werden, wo bei  $h$  die für alle Geraden gleiche Steigung ist.

Da nun  $E_{\text{kin}}$  und  $E_A$  Energiewerte darstellen, muss auch  $hf$  eine Energiemenge bezeichnen. Das bedeutet wiederum, dass die Lichtenergie nicht von der Intensität der Lichtwelle abhängt, wie es die Wellentheorie besagt, sondern von der Frequenz des verwendeten Lichts. Blaues Licht mit großer Frequenz ist demnach energiereicher als rotes Licht mit kleiner Frequenz.



**B1** Metalle werden mit Spektrallinien verschiedener Frequenzen  $f$  bestrahlt. Die Steigung aller ermittelten Geraden ist für jedes Metall gleich.

**Energieportionen –** Der Faktor  $h$  ist für alle Versuchsreihen gleich, also eine Konstante. EINSTEIN folgerte daraus, dass die vom Licht übertragene Energie nicht kontinuierlich, sondern nur in kleinsten Portionen – Vielfachen von  $h$  – auftreten kann. Er bezeichnete diese Portionen  $E_{\text{ph}} = hf$  als **Lichtquanten**, später auch **Photonen** genannt.

Mit den Messwerten für violettes (v) und gelbes (g) Licht (Tabelle **T1** auf S. 237) kann  $h$  berechnet werden. Das Steigungs dreieck der Geraden in Bild **B1** liefert die Frequenzdifferenz  $\Delta f = f(v) - f(g)$  und die zugehörige Energiedifferenz  $\Delta E_{\text{kin}}$ :

$$\Delta E_{\text{kin}} = E_{\text{kin}}(v) - E_{\text{kin}}(g) = (1,02 - 0,13) \text{ eV} = 0,89 \text{ eV},$$

$$\Delta f = f(v) - f(g) = (7,41 - 5,19) \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 2,22 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$$

$$\text{Man erhält als Geradensteigung } h = \frac{\Delta E_{\text{kin}}}{\Delta f} = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

$h$  wird als **Planck-Konstante** bezeichnet und besitzt den genauen Wert  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ . Die Austrittsenergie kann dann aus  $E_{\text{kin}} = hf - E_A$  zu  $E_A = hf - E_{\text{kin}}$  bestimmt werden. Für Caesium erhält man aus den Werten für violettes Licht die Austrittsenergie  $E_{A,Cs} = hf(v) - E_A(v) = 1,93 \text{ eV}$ . Für Licht mit der Grenzfrequenz  $f_{\text{gr}}$  gilt:

$$E_{\text{kin}} = hf_{\text{gr}} - E_A = 0 \text{ und damit } f_{\text{gr}} = \frac{E_A}{h}.$$

Für Caesium ergibt sich so  $f_{\text{gr}} = 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ . Das entspricht orangefarbenem Licht. Tabelle **T1** zeigt Austrittsenergien und Grenzfrequenzen anderer Stoffe.

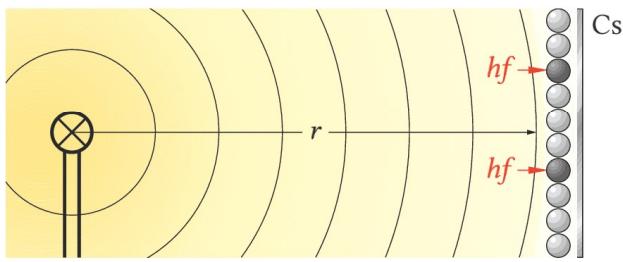
### ! Merksatz

Licht der Frequenz  $f$  gibt an ein Elektron die Energie  $E_{\text{ph}} = hf$  ab (ein Photon), wobei  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  die Planck-Konstante ist.  $E_{\text{ph}}$  hängt nicht von der Intensität des Lichts ab.

Die Austrittsenergie  $E_A$  ist nötig, um ein Elektron vom Metall zu lösen. Die kinetische Energie eines Photoelektrons ist die Differenz  $E_{\text{kin}} = hf - E_A$ .

Stoff	$f_{\text{gr}}$ in $10^{14} \text{ Hz}$	$E_A$ in eV
AgCsO	2,5 (IR)	1,04
Caesium	4,7 (orange)	1,93
Natrium	5,5 (grün)	2,28
Zink	10,3 (UV)	4,27
Platin	13,0 (UV)	5,36

**T1** Grenzfrequenz  $f_{\text{gr}}$  des Lichts und Ablöseenergie  $E_A$  verschiedener Stoffe. AgCsO spricht auf IR an und wird in Nachtsichtgeräten benutzt



**B2** Wellenfronten eines 2-W-Lämpchens mit gleichmäßig darüber verteilter Lichtenergie treffen auf eine Caesium-Schicht.

**Licht mit Teilchencharakter –** EINSTEINS Idee war zunächst umstritten. Beispielsweise könnte die Energie der Lichtwelle auch kontinuierlich verteilt sein und erst beim Photoeffekt, direkt am Elektron, quantisiert auftreten. Eine Beispielrechnung lieferte ihm allerdings Argumente für seine Quantendeutung:

Ein 2-W-Lämpchen (4 V; 0,5 A) gibt nur 5% seiner Leistung als Licht ab (Bild **B2**), in 1 s also  $\Delta E_L = P \cdot t = 0,1 \text{ J}$ . Die vom Lämpchen ausgehende Lichtenergie müsste sich dann gleichmäßig auf die Wellenfronten und dadurch auf die Cs-Atome verteilen. Im Abstand  $r = 1 \text{ m}$  ist das eine kugelförmige Wellenfront der Fläche  $O = 4\pi r^2 \approx 10^5 \text{ cm}^2$ . Ein einzelnes Atom mit der Fläche  $A = 10^{-17} \text{ cm}^2$  erhält dann in 1 s von der insgesamt ausgesandten Lichtenergie  $\Delta E_L = 0,1 \text{ J}$  nur

$$\Delta E_{Cs} = \Delta E_L \cdot \frac{A}{O} = 0,1 \text{ J} \cdot \frac{10^{-17} \text{ cm}^2}{10^5 \text{ cm}^2} = 10^{-23} \text{ J}.$$

Um ein Elektron abzulösen, braucht das Cs-Atom die Energie  $E_A \approx 2 \text{ eV} \approx 3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , also das  $3 \cdot 10^4$ -Fache von  $10^{-23} \text{ J}$ . Man müsste ca.  $3 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 8 \text{ h}$  auf das erste Photoelektron warten, doch man findet es sofort.

Die **Quantisierung** der Energie in EINSTEINS Deutung war deshalb so revolutionär, weil Licht die Eigenchaften eines Teilchens zugeschrieben werden. Nach seiner Idee wird die Energie eines Photons  $E_{ph} = hf$  auf ein Elektron im Metall übertragen. Ein Teil wird dabei für die Austrittsenergie  $E_A$  aufgewendet, den Rest erhält das Elektron als kinetische Energie. Besitzt ein Photon jedoch weniger Energie als zum Auslösen erforderlich ist, so kann kein Elektron abgelöst werden und der Photoeffekt tritt nicht auf. Ein Anhäufen der Energien mehrerer Photonen ist nicht möglich. EINSTEIN nutzte also die Vorstellung eines Teilchenstoßes, um den Photoeffekt schlüssig zu erklären. Daraus folgt auch die Unabhängigkeit der Intensität: Licht höherer Intensität liefert mehr Photonen gleicher Energie, wodurch mehr Elektronen freigesetzt werden können. Deren kinetische Energie bleibt dabei aber gleich.

Das anfangs erwähnte „Stäubchen“, der Hallwachs-Versuch, machte also ein Umdenken der Betrachtung von Licht notwendig. EINSTEINS **Lichtquantenhypothese** und Max PLANCKS schon 1900 entwickeltes Strahlungsgesetz, das eine ähnliche Idee enthielt, sollten Grundsteine für die Entwicklung eines komplett neuen Denkansatzes, der **Quantenphysik**, sein (siehe **Exkurs** auf S. 240).

### ! Merksatz

Die Energie elektromagnetischer Strahlung ist quantisiert, verfügbar nur in Quanten mit der Energie  $E_{ph} = hf$ , den Photonen. Deren Energie hängt nur von der Frequenz  $f$ , nicht von der Intensität ab: Helles Licht hat mehr Quanten, nicht Quanten größerer Energie.

### Lösen Sie selbst

- 1** a) Berechnen Sie die Energie und Geschwindigkeit der schnellsten Photoelektronen aus mit UV bestrahltem Natrium ( $\lambda = 100 \text{ nm}$ ). Wie groß wäre ihre Energie bei der halben Wellenlänge?  
b) Bestimmen Sie die Grenzfrequenz  $f_{gr}$ . Begründen Sie!
- 2** Man möchte Elektronen mit  $v = 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  haben. Erklären Sie, wie Platin dazu bestrahlt werden muss. Kommt es auf die Intensität des Lichts an?
- 3** Die Intensität des auf eine Metallplatte fallenden Lichts wird verdoppelt. Diskutieren Sie, ob sich hierbei auch die kinetische Energie der ausgelösten Photoelektronen verdoppelt.
- 4** a) Bei Sonnenbrand wird die Haut von Lichtquanten beschädigt. Erklären Sie, warum man im Auto oder bei sehr starken Glühlampen davor geschützt ist.  
b) Erläutern Sie, warum die Gefahr für Sonnenbrand in großer Höhe besonders groß ist.
- 5** a) In Bild **B2** falle Licht der Leistung  $P_L = 0,1 \text{ mW}$  auf Cs. Berechnen Sie die Energie, die in 1 s auf das Metall trifft. Wie viele Photonen sind das bei  $\lambda = 800 \text{ nm}$  (400 nm)?  
b) Bestimmen Sie, wie viele Elektronen bei der Quantenausbeute 0,1% frei werden.