

2 Licht als Wellen- und Teilchenerscheinung

2.1 Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

1. wissen, was man unter elektromagnetischen Wellen versteht und nach welchen Kriterien sie eingeteilt werden.
2. verstehen, wie ein Beugungsbild zustande kommt.
3. kennen Experimente, welche zu folgenden Modellvorstellungen geführt haben: Wellennatur von Licht bzw. Teilchennatur von Licht.

2.2 Die Beugung von Licht; Licht als Wellenerscheinung

Betrachtet man eine brennende Kerze durch einen von Zeige- und Mittelfinger der Hand gebildeten Spalt, so sind waagrecht dazu viele kleine Kerzenflämmchen zu sehen. Unterbrochen werden sie jeweils von dunklen Stellen. Ein ähnliches Bild lässt sich mithilfe eines Laserstrahls erzeugen, der durch einen schmalen Spalt auf einen dahinter liegenden Schirm fällt. Helle und dunkle Stellen wechseln sich ab, wobei die Helligkeit (Intensität) nach den Seiten zu abnimmt (Abb. 2.1). Ersetzt man den Spalt durch eine kreisrunde Öffnung, so sind helle und dunkle konzentrische Kreise zu beobachten, wobei die Lichtintensität ebenfalls mit zunehmendem Abstand vom Zentrum der Kreise geringer wird (Abb. 2.2).

Wie lassen sich derartige Beugungsbilder erklären? Helle und dunkle Stellen können nur dann entstehen, wenn sich Licht, das durch den Spalt bzw. die kreisrunde Öffnung fällt, verstärkt oder auslöscht. Dieses Phänomen erinnert an Wellen (Abschnitt 1.3), die sich konstruktiv bzw. destruktiv überlagern. Es ist also sinnvoll, Licht mit einem Wellenmodell zu beschreiben.

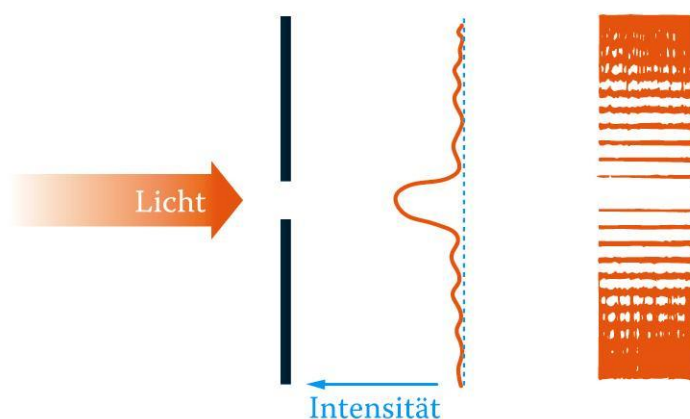


Abb. 2.1 Beugungsbild eines Laserstrahls an einem Spalt



Abb. 2.2 Beugungsbild eines Laserstrahls an einer runden Öffnung

Die Lichtwellen dringen in den geometrischen Schattenraum ein und weichen damit von der geradlinigen Ausbreitung ab. Dieses Phänomen, das man auch bei Wasserwellen beobachten kann, wird als Beugung bezeichnet. Beugungserscheinungen hängen von der Breite des Spalts bzw. der Grösse der runden Öffnung ab. Je grösser die Öffnung, desto schwächer werden die Beugungsmuster. Schliesslich sind nur noch scharf begrenzte Schattenräume erkennbar. Beugung kann nur dann stattfinden, wenn die Grösse der Öffnung in etwa der Länge der Wellen entspricht, die vom Erreger ausgehen.

-
- Treffen Wellen (z. B. Licht- oder Wasserwellen) auf eine kleine Öffnung, so breiten sie sich nicht geradlinig aus, sondern dringen in den geometrischen Schattenraum ein. Die Wellen werden gebeugt.
 - Symmetrisch zur ursprünglichen Fortpflanzungsrichtung liegen Intensitätsmaxima und Intensitätsminima (Beugungsbild).
-

Beugung kommt dadurch zustande, dass an jedem Punkt einer kleinen Öffnung neue Wellen (sogenannte Elementarwellen) entstehen. Sie breiten sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die ursprünglichen Wellen aus. Entsprechend dem Beugungswinkel muss das Licht bis zum Auftreffpunkt unterschiedlich lange Strecken zurücklegen. Haben zwei Wellen sich genau um eine Wellenlänge λ oder das n-fache davon verschoben, dann überlagern sich zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler. Es entsteht ein Intensitätsmaximum. Der Auftreffpunkt liegt im Bereich eines hellen Streifens. Haben die beiden Wellen sich um eine halbe Wellenlänge $\lambda/2$ oder das n-fache ($n = 3, 5, 7, \dots$) gegeneinander verschoben, so überlagern sich Wellenberg und Wellental. Es entsteht ein Intensitätsminimum. Der Auftreffpunkt liegt im Bereich eines dunklen Streifens. In Abb. 2.3 sind jeweils zwei aus der grossen Schar der neu am Spalt gebildeten Wellen dargestellt, die sich verstärken, bzw. auslöschen.

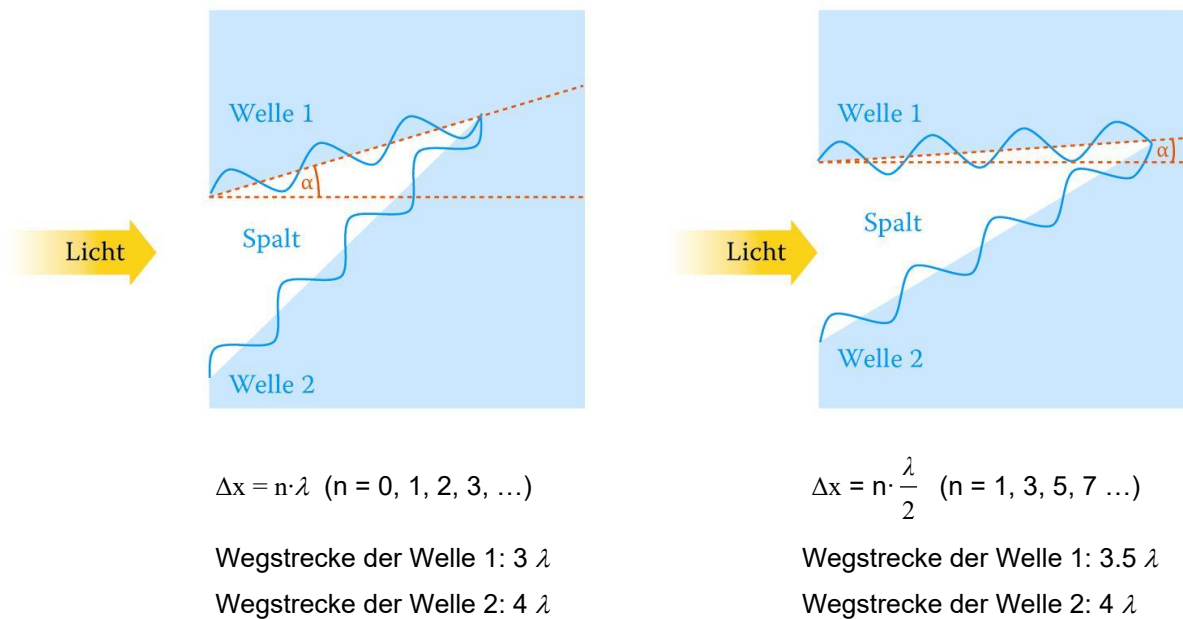


Abb. 2.3 Bildung heller und dunkler Stellen eines Beugungsbilds

- Eine Wellenfront erzeugt in jedem Punkt einer kleinen Öffnung neue Elementarwellen. Da diese mit unterschiedlichen Richtungen weiterlaufen, kommt es zu konstruktiver und destruktiver Interferenz. Die Elementarwellen löschen sich aus oder verstärken sich. Das Ergebnis ist ein Beugungsbild, in dem sich helle und dunkle Stellen abwechseln.
- Helle Stellen eines Beugungsbilds entstehen dann, wenn zwei Elementarwellen um die Strecke $\Delta x = n \cdot \lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) gegeneinander verschoben sind.
- Dunkle Stellen sind dann zu beobachten, wenn zwei Elementarwellen um den Betrag $\Delta x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($n = 1, 3, 5, 7, \dots$) gegeneinander verschoben sind.
- Beugungsbilder lassen sich nur mit einem Wellenmodell verstehen.

Sichtbares Licht ist ein Teil der elektromagnetischen Wellen (elektromagnetische Strahlung; kurz auch als „Licht“ bezeichnet), zu denen u.a. die Radiowellen, Mikrowellen und Röntgenstrahlen gehören (Abb. 2.5). Bei den elektromagnetischen Wellen handelt es sich um wandernde elektrische und magnetische Felder, deren Stärke periodisch ändert (Abb. 2.4). Diese Felder stehen senkrecht aufeinander und pflanzen sich (im Vakuum) mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) fort. Elektromagnetische Wellen (Transversalwellen) benötigen keinen materiellen Träger, im Gegensatz zu den mechanischen Wellen.

Die Energie dieser Wellen ist abhängig von der Wellenlänge (bzw. Frequenz). Nach diesem Kriterium teilt man die elektromagnetischen Wellen in verschiedene Bereiche ein. Zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Lichtgeschwindigkeit c besteht die Beziehung:

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

Im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung (400 bis 800 nm) entspricht eine bestimmte Frequenz (eine bestimmte Wellenlänge) einer bestimmten Farbe.

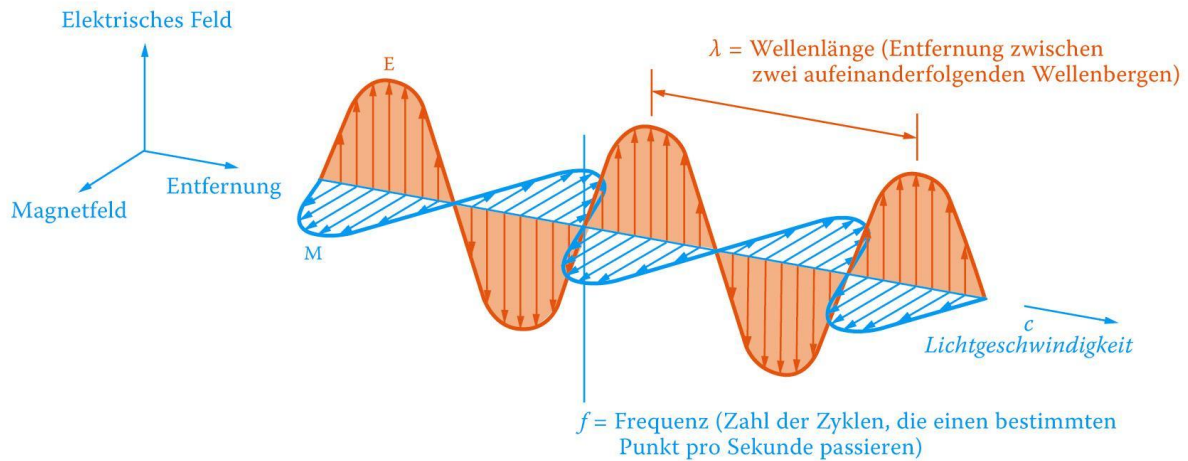


Abb. 2.4 Elektromagnetische Wellen; M: Magnetische Flussdichte; E: Elektrische Feldstärke [entspricht der Amplitude der Welle bzw. der Intensität (Helligkeit) des Lichts]

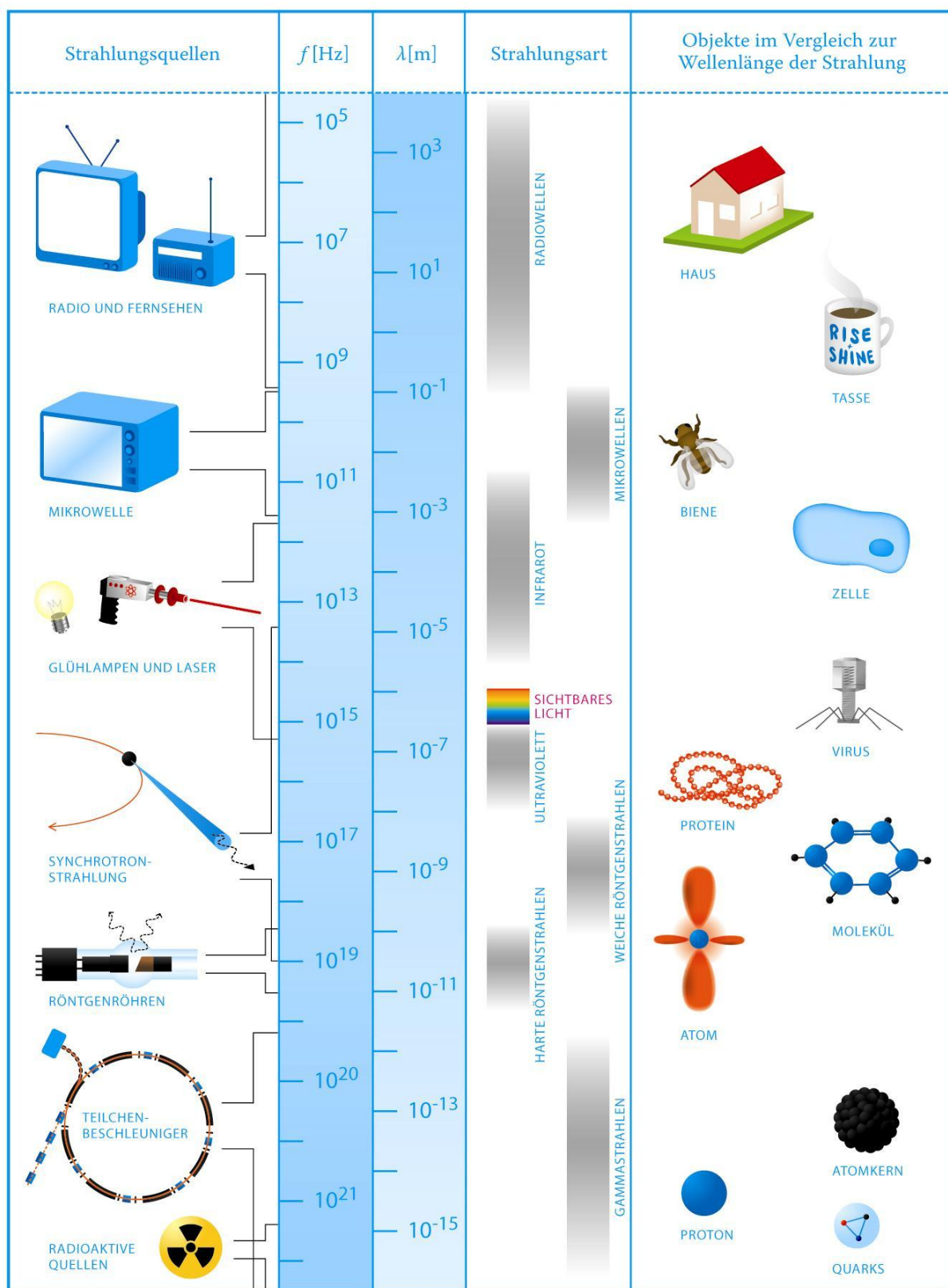


Abb. 2.5 Einteilung der elektromagnetischen Strahlung (Wellen). Je grösser die Frequenz f bzw. je kürzer die Wellenlänge λ , desto energiereicher ist die Strahlung

2.3 Der Fotoelektrische Effekt; Licht als Teilchenstrahl

Beugung und Interferenz machen es notwendig, die Gesamtheit der elektromagnetischen Strahlen mit einem Wellenmodell zu beschreiben (Abschnitt 2.1). Um 1900 entdeckte man jedoch Phänomene, auf die sich die Wellenvorstellung nicht mehr anwenden liess. So verliert z. B. ein negativ geladener Zinkstab, der auf einem Elektroskop aufgesetzt ist, seine Ladung, wenn er mit Licht bestrahlt wird. Hält man eine Glasplatte zwischen Lichtquelle und Zinkstab, so findet hingegen keine Entladung statt. Der Ausschlag des Elektroskops ändert sich ebenfalls nicht, wenn das Zink eine positive Ladung trägt.¹



Abb. 2.6 Versuchsanordnung zur Demonstration des Fotoelektrischen Effekts (UV-Lampe, Glasplatte, Kunststoff- und Glasstab, Elektroskop mit aufgesetzter Zinkelektrode)

Die Versuchsergebnisse zeigen zum einen, dass der Zinkstab bei der Bestrahlung Elektronen abspaltet (das Elektroskop entlädt sich). Zum andern lässt sich erkennen, dass nicht das sichtbare Licht, sondern UV-Strahlung für das Freisetzen der Elektronen verantwortlich ist (einfaches Glas absorbiert UV-Strahlung). Eine positive Ladung hindert die Elektronen am Verlassen des Metallstabs (anziehende Kräfte).

Die Fähigkeit von UV-Licht, aus Metalloberflächen Elektronen freizusetzen, bezeichnet man als „Fotoelektrischen Effekt“. Der dabei erzeugte Stromfluss dient u. a. für elektronische Schaltkreise (Abb. 2.7).

¹ Der Zinkstab wird negativ geladen, wenn man ihn mit einem Kunststoffstab berührt, der vorher mit einem Seidentuch gerieben wurde. Eine positive Ladung erhält man mit einem Glasstab.

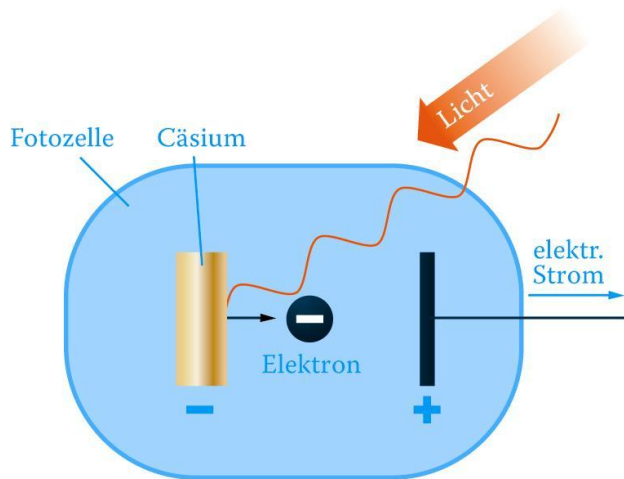


Abb. 2.7 Wirkungsweise einer Fotozelle (schematisch)

Als Fotoelektrischen Effekt (Fotoeffekt) bezeichnet man die Ablösung von Elektronen aus Metalloberflächen durch die Einwirkung elektromagnetischer Strahlung, die dabei frei werdenden Elektronen als Fotoelektronen.

Mit einer geeigneten Versuchsanordnung ist es möglich, die maximale kinetische Energie $T_{\max}$ der freigesetzten Fotoelektronen in Abhängigkeit von der Frequenz (bzw. Wellenlänge) und der Intensität des eingestrahlt Lichts zu bestimmen. Die Besonderheit des Experiments besteht darin, dass man das Metall schwach positiv auflädt und als Gegenpol eine negative Punktladung (ein kleines Metallkugeln) als Kathode verwendet (Abb. 2.8).

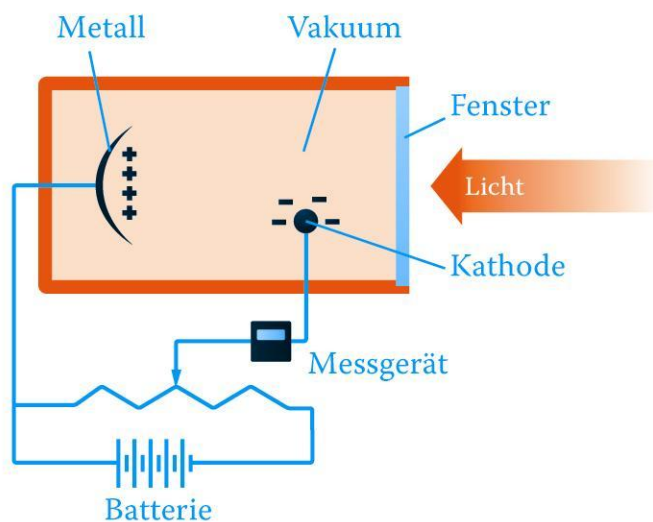


Abb. 2.8 Versuchsanordnung zur Bestimmung der maximalen kinetischen Energie von Fotoelektronen

Die Metalloberfläche ist leicht gebogen, damit sich die Fotoelektronen auf die Kathode zu bewegen. Bei einer geringen Spannung (kleine positive und negative Ladung des Metalls und der Kathode) beobachtet man bei Lichteinfall (genügend hohe Energie vorausgesetzt) sofort einen Stromfluss im Messgerät (Ampèremeter). Die kinetische Energie der Fotoelektronen ist genügend groß, um die abstossende Kraft des negativ geladenen Metallkugeln zu kompensieren. Wird die Spannung erhöht, so verringert sich der Elektronenfluss, da nur die energiereichsten Elektro-

nen die abstossende Kraft der Kathode überwinden können. Auf diese Weise lässt sich die maximale Spannung U_0 ermitteln, bei der keine Fotoelektronen die Kathode erreichen. Mithilfe dieser Spannung kann man die maximale kinetische Energie $T_{\max}$ der Fotoelektronen bestimmen, da das Produkt aus Spannung und Elektronenladung gleich der kinetischen Energie der Elektronen ist.

$$U_0 \cdot e = \frac{m_e \cdot v_{\max}^2}{2} = T_{\max}$$

m_e : Masse Elektron; v : Geschwindigkeit des Elektrons; e : Elektronenladung; U_0 : maximale Spannung

Werden neben der Spannung auch die Frequenz (Wellenlänge) und Intensität der einfallenden elektromagnetischen Strahlung verändert und die dabei auftretenden maximalen kinetischen Energien der Fotoelektronen bestimmt, so erhält man folgende Ergebnisse:

1. Der Fotoelektronenstrom ist sofort nach dem Eintreffen des Lichts (bei genügend hoher Frequenz) auf der Metalloberfläche zu beobachten.
2. Unterhalb einer bestimmten Lichtfrequenz f werden keine Fotoelektronen freigesetzt, ganz egal, wie hoch die Intensität des Lichts ist. Daraus folgt, dass für ein bestimmtes Metall die maximale Spannung und damit die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen nur von der Frequenz des eingestrahlteten Lichts beeinflusst wird, nicht aber von der Lichtintensität. Die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen ist folglich nur von der Lichtfrequenz abhängig.
3. Die Anzahl der Fotoelektronen ist, bei konstanter Frequenz, direkt proportional zur Intensität des eingestrahlteten Lichts, wobei sich die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen nicht ändert.

Die Aussagen 1., 2. und 3. lassen sich mit dem Wellenmodell des Lichts nicht verstehen. Nach diesem Modell sollten die Elektronen des Metalls durch das in seiner Stärke periodisch wechselnde elektrische Feld des Lichts in immer stärkere Schwingungen versetzt werden. Schliesslich würden die Elektronen genügend Energie besitzen, um das Metall verlassen zu können. Auch bei sehr niedrigen Lichtfrequenzen (sehr grossen Wellenlängen) müsste der Photoeffekt nach einiger Zeit zu beobachten sein. Die Zunahme der Lichtintensität (Zunahme der elektrischen Feldstärke E , die der Amplitude der „Lichtwelle“ entspricht), würde nach dem Wellenmodell eine höhere kinetische Energie der Fotoelektronen nach sich ziehen. Die experimentellen Ergebnisse („die Elektronen lösen sich sofort oder überhaupt nicht“; „ihre kinetische Energie ist unabhängig von der Intensität“) widersprechen jedoch diesen Überlegungen. Eine neue Erklärung, ein neues Modell war nötig.

Albert Einstein deutete 1905 diese Unstimmigkeiten dadurch, dass er die scheinbar stetigen elektromagnetischen Wellen als gequantelt annahm, d. h. aus komprimierten diskreten Energieeinheiten („Teilchen“) bestehend, die als Photonen bezeichnet werden. Jedes dieser Photonen besitzt eine Energie E , die nur von der Frequenz f (und damit von der Wellenlänge λ) abhängig ist:

Photonenenergie $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ [J] h : Plancksches Wirkungsquantum; c : Lichtgeschwindigkeit

In seiner Schrift "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen² Gesichtspunkt" schreibt A. Einstein:

Nach der Auffassung, dass das einfallende Licht aus Photonen von der Energie $h \cdot f$ bestehe, lässt sich die Erzeugung von Elektronen durch Licht folgendermassen auffassen: In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Photonen ein und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, dass ein Photon seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt. Ausserdem muss jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit W verrichten. Die maximale kinetische Energie $T_{\max}$ der austretenden Elektronen beträgt daher

$$T_{\max} = \frac{m_e \cdot v^2}{2} = h \cdot f - W \text{ [J]}$$

$\frac{m_e \cdot v^2}{2}$: kinetische Energie; $h \cdot f$: Photonenenergie; W : Austrittsarbeit eines Elektrons

Ein Photon muss also die zur Ablösung eines Elektrons von der Metalloberfläche nötige Energie (Frequenz, Wellenlänge) aufweisen. Ist dies nicht der Fall, so wird kein Elektron losgelöst, egal, wie viele Photonen das Metall treffen (wie gross die Intensität der elektromagnetischen Strahlung ist). Die Photonenenergie ist, entsprechend den Versuchsergebnissen, mit der Lichtfrequenz f (der Wellenlänge) verknüpft:

$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$. Gemäss der **Teilchenvorstellung** über die elektromagnetische Strahlung bedeutet eine Zunahme der Strahlungsintensität [die Intensität I ist die Energie E der Anzahl Photonen pro Fläche A und Zeit t und entspricht der physikalisch nicht eindeutig definierten „Helligkeit“] bei konstanter Frequenz, dass sich die Anzahl der Photonen (gleicher Energie) erhöht. Dies entspricht einer Zunahme der Anzahl Fotoelektronen mit identischer maximaler kinetischer Energie. Messungen zeigen ausserdem, dass die Intensität I von Licht bei einer bestimmten Frequenz proportional dem Quadrat der Amplitude E einer elektromagnetischen Welle ist (die Intensität I ist die Energie der elektromagnetischen Strahlung pro Flächen- und Zeiteinheit; **Wellenmodell**).

² Heuristik: Lehre von den Methoden zum Finden neuer Erkenntnisse

Wellenmodell:

Die Intensität I („Helligkeit“) ist die Energie E pro Fläche A und Zeit t : $I = \frac{E}{A \cdot t}$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$I = \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot c \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

E : Betrag der elektrischen Feldstärke (entspricht der Amplitude der elektromagnetischen Welle);

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante; c : Lichtgeschwindigkeit

Grösse	ϵ_0	E^2	c	I
Einheit	$\frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^2}$	$\frac{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^4}{\text{s}^6 \cdot \text{A}^2 \cdot \text{m}^2}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^4}{\text{s}^6 \cdot \text{A}^2 \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

Teilchenmodell:

Die Intensität I („Helligkeit“) ist die Energie E der Anzahl Photonen N , die pro Zeiteinheit auf eine Fläche A treffen (Energie eines Photons gleich dem Produkt aus Frequenz f und Planck'schem Wirkungsquantum h):

$$I = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{N \cdot (h \cdot f)}{A \cdot t} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Grösse	h	f	A	t	I
Einheit	$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{1}{\text{s}}$	m^2	s	$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

Mit der Photonenflussdichte $n = \frac{N}{A \cdot t}$ erhält man:

$$I = (h \cdot f) \cdot n \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$h \cdot f$: Energie eines Photons; n : Photonenflussdichte (Anzahl Photonen pro Flächen- und Zeiteinheit); f und I sind messbar

Tabelle 2.1 Photonenenergien in Elektronenvolt eV³

Strahlungsart	Wellenlängenbereich	Photonenenergie
Gamma	$10^{-14} - 10^{-11} \text{ m}$	$10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$
Röntgen	$10^{-11} - 10^{-8} \text{ m}$	$10^3 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$
Ultraviolett	$10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$	10 eV
Licht	$4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (violett...rot)	1 eV
Infrarot	$8 \cdot 10^{-7} - 10^{-4} \text{ m}$	10^{-1} eV
Mikrowellen	$10^{-4} \text{ m} - 1 \text{ m}$	10^{-4} eV
Kurzwellen	$10 \text{ m} - 10^2 \text{ m}$	10^{-8} eV
Langwellen	10^3 m und mehr	10^{-10} eV

- Eine elektromagnetische Strahlung bestimmter Frequenz (Wellenmodell) besteht aus Photonen (Teilchenmodell), die alle die gleiche Energie besitzen.

Eine elektromagnetische Strahlung bestimmter Frequenz (Wellenmodell) strahlt umso intensiver (Intensität I ; „Helligkeit“), je grösser die Anzahl der Photonen (Teilchenmodell) bzw. je grösser die Energie (je grösser die Amplitude E ; Wellenmodell) pro Flächen- und Zeiteinheit ist.

- Photonenenergie: $E = h \cdot f$ [J]

- Lichtintensität („Helligkeit“):

- **Wellenmodell**

Intensität einer elektromagnetischen Strahlung: $I = \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot c$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

I : Intensität; ϵ_0 : elektrische Feldkonstante; E : Betrag der elektrischen Feldstärke (Amplitude der elektromagnetischen Strahlung); c : Lichtgeschwindigkeit

- **Teilchenmodell**

$$I = (h \cdot f) \cdot n \text{ [J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

n : Photonenflussdichte (Anzahl Photonen pro Flächen- und Zeiteinheit); f : Frequenz; h : Planck'sches Wirkungsquantum

Maximale kinetische Energie eines Fotoelektrons: $T_{\max} = \frac{m_e \cdot v^2}{2} = h \cdot f - W$ [J]

m_e : Masse Elektron; h : Planck'sches Wirkungsquantum; f : Frequenz; W : Austrittsarbeit eines Elektrons v : Geschwindigkeit

³ 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

2.4 Der Welle/Teilchen-Dualismus von Licht; Antreffwahrscheinlichkeit eines Photons

Die Abschnitte 2.1 und 2.2 haben gezeigt, dass für die Beschreibung der elektromagnetischen Strahlung zwei verschiedene Modelle verwendet werden müssen. Beugungsbilder sind nur dann zu verstehen, wenn sich Elementarwellen konstruktiv und destruktiv überlagern. Umgekehrt ist die Vorstellung von „Lichtteilchen“ (Photonen) nötig, um eine Erklärung für den Fotoeffekt zu finden.

Die hellen und dunklen Stellen eines Beugungsmusters (Abschnitt 2.1) liessen sich durch konstruktive und destruktive Interferenz von Lichtwellen verstehen. Die vom Zentrum nach aussen hin abnehmende Intensität („Helligkeit“) kann sowohl mit dem Wellen- als auch mit dem Teilchenmodell beschrieben werden. Im ersten Fall wird die Amplitude E (elektrische Feldstärke) der Lichtwelle kleiner ($I \sim E^2$), im zweiten Fall die Anzahl n der Photonen (Photonenflussdichte; $I \sim n$).

Stellt man sich nun die Frage, an welchem Ort des Beugungsbilds ein bestimmtes Photon anzutreffen ist, so lässt sich keine eindeutige Antwort dazu finden. Sicher ist jedoch, dass die Antreffwahrscheinlichkeit an den hellsten Stellen am grössten ist. Dort erreicht die Anzahl auftreffender Photonen ein Maximum. Mit zunehmendem Abstand vom Zentrum gelangen immer weniger Photonen auf den Leuchtschirm. Die Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes Photon anzutreffen, lässt sich also mit der Lichtintensität beantworten. Diese ist, wie bereits erläutert, vom Quadrat der elektrischen Feldstärke E (der Amplitude) bzw. von n , der Anzahl Photonen, abhängig. Setzt man, bei konstanter Frequenz, die beiden Formeln für die Lichtintensität gleich und eliminiert die Konstanten, so zeigt sich, dass die Anzahl Photonen proportional dem Quadrat der elektrischen Feldstärke E (der Amplitude der elektromagnetischen Strahlung) ist:

Wellenmodell:

$$I = \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot c \quad I = \text{Intensität („Helligkeit“); } E: \text{Amplitude; } c: \text{Lichtgeschwindigkeit}$$

Teilchenmodell:

$$I = (h \cdot f) \cdot n \quad h \cdot f: \text{Photonenenergie; } n: \text{Anzahl Photonen pro Flächen- und Zeiteinheit (Photonenflussdichte)}$$

$$\varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot c = (h \cdot f) \cdot n; \text{ ohne die Konstanten } \varepsilon_0, c, f \text{ und } h \text{ ergibt sich:}$$

$$n \sim E^2$$

Je grösser n , d. h. je grösser die Anzahl der Photonen pro Flächen- und Zeiteinheit an einer hellen Stelle eines Beugungsbilds ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dort ein bestimmtes Photon anzutreffen. Da die Intensität („Helligkeit“) vom Quadrat der elektrischen Feldstärke E abhängt, ist auch die Antreffwahrscheinlichkeit eines Photons proportional zu E^2 . Das Erstaunliche bei diesen Betrachtungen ist die Tatsache, dass sich nicht mehr mit absoluter Sicherheit eine

Aussage über ein Photon machen lässt. Es ist unumgänglich, mit Wahrscheinlichkeiten zu operieren. Da den Photonen auch Welleneigenschaften zuzuschreiben sind, lässt sich ausserdem keine konkrete Bahn von der kleinen Öffnung bis zum Leuchtschirm finden.

Die am Beugungsbild gefundenen Gesetzmässigkeiten lassen sich verallgemeinern:

-
- Aufgrund der Wellen- und Teilcheneigenschaften elektromagnetischer Strahlung ist die Bahn eines einzelnen Photons nicht vorherbestimmt (determiniert).
 - Das Quadrat der Wellenamplitude (der elektrischen Feldstärke) E ist ein Mass für die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in irgendeinem Raumpunkt anzutreffen.

$$n \sim E^2$$

2.5 Übungen mit Lösungen zum Kapitel 2

Übungen

A 2.1

- a) Wieso erreichen Lichtwellen den Mond, im Gegensatz zu Schallwellen?
- b) Ist IR-Licht (Infrarot) oder sichtbares Licht energiereicher?
- c) Schauen Sie sich die Klettfilme "Eigenschaften von Wellen 1 und 2" an. Notieren Sie alle in den Filmen vorkommenden Fachausdrücke. Welche sind Ihnen bekannt, welche unbekannt?

- A 2.2 Rotes Licht hat eine Wellenlänge von 680 nm. Welche Energie besitzt ein Photon dieses Lichts? (1 nm = 10^{-9} m)

Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen: $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- A 2.3 Vergleichen Sie zwei Photonen verschiedener Frequenz:

$f(\text{Photon 1}) > f(\text{Photon 2})$. Welches der zwei Photonen hat die grössere Energie?

- A 2.4 Bei einigen Lampentypen lässt sich die Helligkeit stufenlos verstellen.

Was passiert, wenn die Helligkeit vermindert wird?

Beschreiben Sie den Vorgang mit beiden Modellen des Lichts.

- A 2.5 Muss man das Licht durch eine Longitudinal- oder eine Transversalwelle beschreiben?

- A 2.6 Licht wird an einem Spalt gebeugt. Es treten unter anderem Intensitätsminima im Schattenraum auf. Welchen Gangunterschied, ausgedrückt als n-faches der Wellenlänge, hat das Licht an diesen Stellen?

- A 2.7 Wie gross ist der Energieunterschied zwischen zwei ansonsten gleichen Lichtwellen, wenn die eine die doppelte Frequenz und Amplitude der anderen aufweist?

$$(E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot f^2 \cdot s_{\text{max}}^2)$$

- A 2.8 Rotes Licht hat eine grössere Wellenlänge als blaues. Welches Licht ist somit energiereicher?

- A 2.9 Worin bestehen die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen sichtbarem Licht, Radiowellen und γ -Strahlung? Nennen Sie jeweils zwei Gemeinsamkeiten und zwei Unterschiede.

- A 2.10 Welches Photon hat die grössere Energie?

- a) ein Photon von Röntgenstrahlung ($\lambda = 1 \text{ nm}$)
- b) ein Photon von gelbem Licht ($\lambda = 590 \text{ nm}$)

- A 2.11 Welche Frequenz hat blaues Licht mit einer Wellenlänge von 450 nm? Welche Energie hat ein Photon dieser Strahlung? ($h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

- A 2.12 Wie schnell bewegt sich ein Photon von grünem Licht? Ist dieses Photon schneller als ein Photon von Infrarotstrahlung? $\lambda_{\text{grün}} = 550 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Infrarot}} = 2000 \text{ nm}$.

A 2.13 Können Lichtwellen miteinander interferieren? Falls ja, beschreiben Sie ein Experiment, bei dem es zu destruktiver Interferenz kommt.

Lösungen

A 2.1 a) Lichtwellen sind im Gegensatz zu Schallwellen nicht trägergebunden. Sie können sich im Vakuum des Alls fortpflanzen und erreichen den Mond.

b) Die Wärmestrahlung (IR-Licht) hat eine kleinere Frequenz als sichtbares Licht und ist weniger energiereich.

c) Fortschreitende Wellen; Wellenlänge λ ; Amplitude $s_{\max}$ (im Film: a); Frequenz f ; Ausbreitungsgeschwindigkeit (Fortpflanzungsgeschwindigkeit) $c = f \cdot \lambda$; Interferenz (Verstärkung; Auslöschung); Wellenberg und Wellental; Interferenzfigur; Beugung; Schattenraum.

Stehende Wellen; Knoten und Bäuche; Erregerfrequenz; halbe Wellenlänge entspricht dem Abstand zwischen zwei Knoten.

A 2.2 $E = h \cdot f$ und $f = \frac{c}{\lambda}$ daraus folgt: $E = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 2.998 \cdot 10^8}{680 \cdot 10^{-9}} = 2.921 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

A 2.3 $E = h \cdot f$

Ein Photon mit grösserer Frequenz weist die grössere Energie auf. Photon 1 hat also die grössere Energie.

A 2.4 Wellenmodell: Die Amplitude der Welle (elektrische Feldstärke) nimmt ab.

Teilchenmodell: Es werden weniger Photonen gleicher Energie ausgesandt.

A 2.5 Licht lässt sich durch elektromagnetische Transversalwellen beschreiben. Die elektromagnetischen Felder stehen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung.

A 2.6 Ein Intensitätsminimum tritt dann auf, wenn sich ein Wellenberg und ein Wellental auslöschten. Der Gangunterschied beträgt $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($n = 1, 3, 5, 7, 9 \dots$).

A 2.7 Die Energie E ist proportional zu $f^2 \cdot s_{\max}^2$. Aus der doppelten Amplitude $s_{\max}$ und der doppelten Frequenz f folgt: $2^2 \cdot 2^2 = 16$. Die Energie ist somit 16 mal grösser.

A 2.8 Die Energie ist indirekt proportional zur Wellenlänge. Damit ist das blaue Licht energiereicher als das rote.

A 2.9 Alle Wellen sind elektromagnetischer Natur. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und sind an keinen Wellenträger gebunden. Sie besitzen jedoch verschiedene Wellenlängen und Frequenzen und folglich auch verschiedene Energien.

A 2.10 $E = h \cdot f$ und $f = \frac{c}{\lambda}$; durch Umformen erhält man $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$

Die Energie ist also bei der Röntgenstrahlung grösser. Sie hat die kleinere Wellenlänge.

A 2.11 $f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow f = \frac{2.998 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} = 6.662 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

$$E = h \cdot f = 6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 6.662 \cdot 10^{14} = 4.414 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

A 2.12 Alle Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit!

- A 2.13 Lichtwellen können miteinander in Wechselwirkung treten. Bei einem Beugungsexperiment an einem Spalt kommt es im Schattenraum unter anderem zu Intensitätsminima, wenn $\Delta x = n \frac{\lambda}{2}$ mit $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ist. Diese lassen sich durch destruktive Interferenz des Lichts erklären.