

# Es werde Licht

# 18

## In diesem Kapitel ...

- ▶ Licht ist eine Welle
- ▶ Licht als Welle, Strahl und Teilchenstrom
- ▶ Das elektromagnetische Spektrum
- ▶ Polarisation

Im letzten Teil wurden Wellen eingeführt, definiert und unter verschiedenen Gesichtspunkten ausführlich diskutiert. Dabei wurden vor allem Seil- und Wasserwellen als Beispiele für Transversalwellen angeführt. Kapitel 17 beschäftigte sich eingehend mit Schallwellen als dem wichtigsten Beispiel für longitudinale Wellen. Das Thema des vorliegenden Kapitels ist das *Licht* als wichtigstem Vertreter von Transversalwellen (nichts gegen Seilwellen, aber das Licht und die anderen elektromagnetischen Wellen sind aus physikalischer Sicht einfach wesentlich interessanter).

In diesem Kapitel wird zunächst anhand eines Interferenzeffekts bewiesen, dass Licht eine Welle ist. Anschließend wird dargestellt, dass es allerdings auch Fälle gibt, in denen die Beschreibung des Lichts als Welle zu Problemen führen kann. Zudem wird gezeigt, dass das sichtbare Licht nur einen winzigen Ausschnitt aus einem extrem weiten Spektrum transversaler Wellen darstellt, das *elektromagnetisches Spektrum* genannt wird. Daran anschließend werden einige Größen eingeführt, mit deren Hilfe man die Ausbreitung von Licht auch quantitativ beschreiben kann. Zum Abschluss dieses Kapitels wird dann mit der Polarisation ein Effekt vorgestellt, der allen elektromagnetischen Wellen gemeinsam ist, aber nicht auf diese beschränkt ist.

## Licht ist eine Welle

In Kapitel 16 wurde gezeigt, dass Wellen miteinander interferieren, sich also überlagern können. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass man aus dem Auftreten von Interferenzmustern schließen kann, dass die beobachteten Phänomene auf Wellen beruhen.

## Der Doppelspaltversuch

Abbildung 18.1 zeigt schematisch die Interferenzeffekte sowie die Intensitätsverteilung auf einem Schirm, die man beobachtet, wenn sichtbares Licht einen *Doppelspalt* durchläuft. Die genauen Versuchsbedingungen spielen an dieser Stelle keine Rolle; sie werden in Kapitel 19 diskutiert.

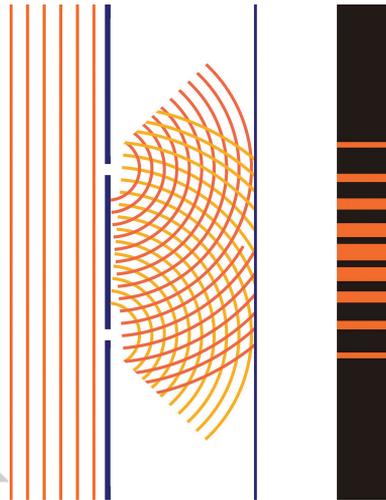


Abbildung 18.1: Das Young'sche Doppelspaltexperiment

Der in Abbildung 18.1 dargestellte Doppelspaltversuch dient an dieser Stelle nur dazu, zu beweisen, dass es sich bei Licht um eine Welle handelt. Bei Licht können Interferenzeffekte auftreten; also handelt es sich beim Licht um eine Welle. Weitere Interferenzeffekte mit Licht und die ebenfalls auf Interferenzen beruhende Beugung werden im nachfolgenden Kapitel 19 behandelt.



Dieses Doppelspaltexperiment wurde zum ersten Mal im Jahre 1802 von dem britischen Physiker Thomas Young (1773–1829) durchgeführt, der damit eine lange Debatte über die Frage beendete, ob es sich bei Licht um Teilchen (Newton) oder Wellen (Huygens) handelt. Mehr dazu finden Sie in den Kapiteln 46 und 47.

## Was schwingt beim Licht?

Der vorangegangene Abschnitt hat gezeigt, dass es sich bei Licht um eine Welle handelt. Daher stellt sich automatisch die Frage: Wenn Licht eine Welle ist, was schwingt bei dieser Welle? Ist es eine Transversalwelle oder eine longitudinale Welle? Bei Seilwellen schwingt das Seil auf und ab, bei Wasserwellen bewegen sich Wasserteilchen. Bei den longitudinalen Schallwellen schwingen Luftteilchen vor und zurück und verursachen Druckschwankungen, die sich ausbreiten. Aber beim Licht?

Die Antwort auf diese Frage ist komplex; die folgende Definition wird erst dann verständlich werden, wenn Sie sich in Teil VI mit dem Elektromagnetismus beschäftigen. Die vollständige Auflösung finden Sie in Kapitel 30 über die Maxwell'schen Gleichungen.

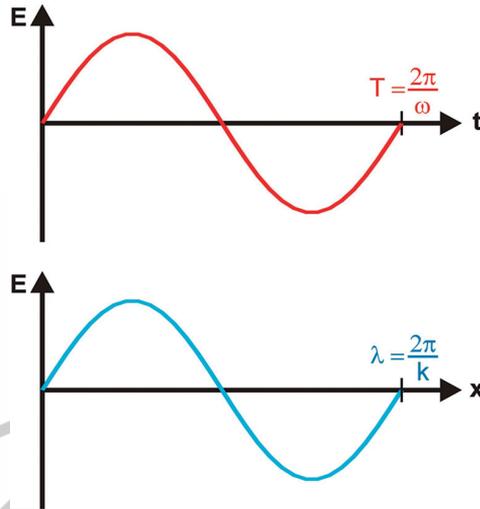


Abbildung 18.2: Sich räumlich ausbreitende Schwingungen des elektrischen Feldes  $E$

Die vorläufige und für die Diskussion in diesem Teil ausreichende Antwort lautet:



Licht gehört zu den sogenannten *elektromagnetischen Wellen*:

- ✓ Licht ist eine transversale Welle.
- ✓ Eine Größe, die *elektrisches Feld  $E$*  genannt wird, schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Abbildung 18.2).
- ✓ Eine weitere Größe, die *magnetisches Feld  $H$*  genannt wird, schwingt senkrecht sowohl zur Ausbreitungsrichtung als auch zum elektrischen Feld (Abbildung 18.3).

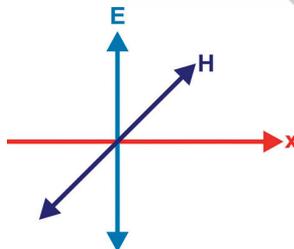


Abbildung 18.3: Schwingungen des elektrischen Feldes  $E$  und des magnetischen Feldes  $H$  bilden eine elektromagnetische Welle.

Da sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld keine Träger brauchen, kann sich Licht auch im Vakuum, d. h. im luftleeren Raum ausbreiten. Darin unterscheiden sich elektromagnetische Wellen von allen anderen bislang diskutierten Wellen: Bei elektromagnetischen Wellen gibt es keinen Träger.

## Lichtgeschwindigkeit

Wie jede andere Welle besitzen auch elektromagnetische Wellen eine Ausbreitungsgeschwindigkeit:



Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts wird *Lichtgeschwindigkeit* genannt. Sie beträgt im Vakuum:

$$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum ist für alle elektromagnetischen Wellen gleich. In durchsichtigen Materialien wie Wasser oder Glas nimmt die Lichtgeschwindigkeit andere (kleinere) Werte an. Dies wird in Kapitel 20 diskutiert.



Werfen Sie noch einmal einen Blick auf Kapitel 3. Dort wurde dargestellt, dass im internationalen Einheitensystem (SI-System) die Längeneinheit Meter mittlerweile über die Vakuumlichtgeschwindigkeit definiert ist. Solange diese Definition gültig ist, liegt der Wert der Lichtgeschwindigkeit fest. Er beträgt genau:

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

Beachten Sie, wie erstaunlich genau dieser Wert festgelegt ist!

## Frequenz und Wellenlänge

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts  $c$  ist also exakt definiert, wie gerade gezeigt wurde. Aber natürlich besitzen Lichtwellen wie andere Wellen auch eine Frequenz  $f$  und eine Wellenlänge  $\lambda$ . Das menschliche Auge kann Lichtwellen zwischen etwa 400 und 750 nm wahrnehmen. Dieser Wellenlängenbereich wird als *sichtbares Licht* bezeichnet. Die dazugehörigen Frequenzen lassen sich leicht über die auch hier geltende Beziehung zwischen  $c$ ,  $f$  und  $\lambda$  ermitteln:

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

Daraus ergeben sich Frequenzen zwischen 7,5 und  $4,0 \times 10^{14}$  Hz, die das menschliche Auge wahrnehmen kann.

Das Auge ordnet den verschiedenen Wellen verschiedene Farben zu. Blaues Licht besitzt kurze Wellenlängen (hohe Frequenzen), rotes Licht entsprechend lange Wellenlängen (niedrige Frequenzen). Dies ist in Abbildung 18.4 dargestellt.

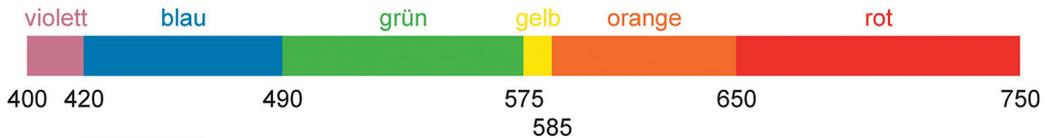


Abbildung 18.4: Das Spektrum des sichtbaren Lichts. Die Wellenlängen sind in nm angegeben.

- ✓ Licht mit Wellenlängen unter 400 nm, das das Auge also nicht wahrnehmen kann, wird *ultraviolettes Licht* genannt.
- ✓ Entsprechend heißt Licht mit Wellenlängen über 750 nm, das vom Auge ebenfalls nicht detektiert wird, *Infrarotlicht*.

Das sichtbare Licht ist also nur ein Ausschnitt aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum.

## Das elektromagnetische Spektrum

Aus Tabelle 18.1, die einen Überblick über das gesamte elektromagnetische Spektrum gibt, geht hervor, dass der Ausschnitt, den das sichtbare Licht in diesem Spektrum bildet, extrem klein ist.

Spektralbereich	Wellenlänge	Wellenlänge [m]
Wechselströme	10 km–10 Mm	$10^4$ – $10^7$
Radiowellen	0,1 m–10 km	$10^{-1}$ – $10^4$
• Langwelle	• 1 km–10 km	• $10^3$ – $10^4$
• Mittelwelle	• 100 m–1 km	• $10^2$ – $10^3$
• Kurzwelle	• 10 m–100 m	• $10^1$ – $10^2$
• Ultrakurzwelle	• 1 m–10 m	• $10^0$ – $10^1$
• UHF	• 10 cm–1 m	• $10^{-1}$ – $10^0$
Mikrowellen	1 mm–10 cm	$10^{-3}$ – $10^{-1}$
Infrarotstrahlung	1 $\mu$ m–1 mm	$10^{-6}$ – $10^{-3}$
sichtbares Licht	400 nm–750 nm	$4$ – $7,5 \times 10^{-7}$
Ultravioletstrahlung	10 nm–400 nm	$0,1$ – $4 \times 10^{-7}$
Röntgenstrahlung	10 pm–10 nm	$10^{-11}$ – $10^{-8}$
• weich	• 1 nm–10 nm	• $10^{-9}$ – $10^{-8}$
• mittel	• 100 pm–1 nm	• $10^{-10}$ – $10^{-9}$
• hart	• 10 pm–100 pm	• $10^{-11}$ – $10^{-10}$
Gammastrahlung	0,1 pm–10 pm	$10^{-13}$ – $10^{-11}$
kosmische Strahlung	1 fm–0,1 pm	$10^{-15}$ – $10^{-13}$

Tabelle 18.1: Das elektromagnetische Spektrum

Aus dieser Tabelle wird zudem deutlich:

- ✓ Das elektromagnetische Spektrum überstreicht einen Wellenlängenbereich von mindestens 20 Größenordnungen ( $10^7$ – $10^{-15}$  m).
- ✓ Das Spektrum des sichtbaren Lichts umfasst weniger als eine halbe Größenordnung.

### Das meiste wird von der Atmosphäre verschluckt

Der Mensch hat mit dem Auge ein optisches Instrument entwickelt, das einen Teil des elektromagnetischen Spektrums erstaunlich gut wahrnehmen kann, wobei der Ausschnitt aus dem Gesamtspektrum allerdings extrem klein ist. Warum diese Einschränkung? Menschen können IR- (als Wärme) und auch UV-Strahlen indirekt über die Haut wahrnehmen. Warum hat die Evolution die Entwicklung des Auges auf das sichtbare Licht beschränkt? Die Antwort darauf ist relativ einfach: Eine andere Lösung hätte sich nicht gelohnt. Dafür sind zwei Gründe ausschlaggebend:

- ✓ Der Mensch kann mit seinem Auge Abstände von unter 1 mm in einer Entfernung von 1 m noch gut wahrnehmen. Allerdings muss die Wellenlänge der Strahlung kleiner sein als die beobachteten Dimensionen (Kapitel 23). Dies schließt also Wellenlängen  $\lambda \geq 1$  mm aus.
- ✓ Die Atmosphäre der Erde ist für weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrums mit Wellenlängen unter 1 mm entweder aufgrund von Streuverlusten oder von Absorptionsverlusten (siehe Kapitel 20) undurchdringlich (Abbildung 18.5). Es würde einfach keinen Sinn machen, ein Auge zu besitzen, das Wellenlängen von beispielsweise 20  $\mu\text{m}$  wahrnimmt, weil diese Wellenlängen nicht durch die Luft zum Auge gelangen können.

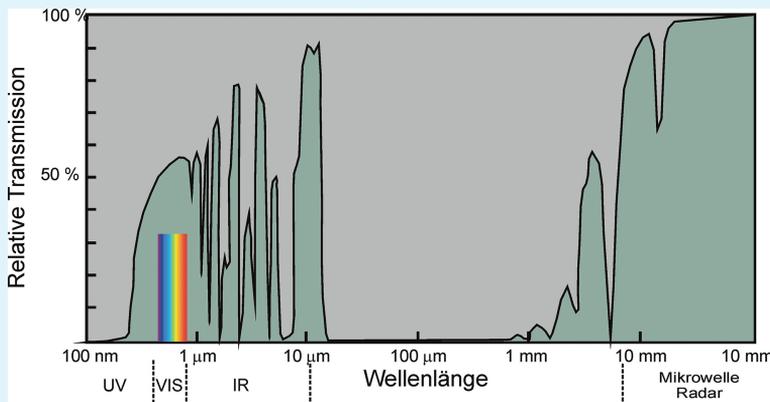


Abbildung 18.5: Verluste in der Erdatmosphäre als Funktion der Wellenlänge

- ✓ Es gibt noch einen dritten Grund für die Lage des für das menschliche Auge sichtbaren Bereichs im elektromagnetischen Spektrum: Die Natur musste Sehzellen entwickeln, die das einfallende Licht geeignet wahrnehmen. Besonders leistungsfähige Rezeptoren lassen sich im Bereich des sichtbaren Lichts realisieren.

## Die verschiedenen Gestalten des Lichts

Aus dem oben vorgestellten Doppelspaltexperiment geht eindeutig hervor, dass Licht eine Welle ist. Licht ist also eine Welle. Ja oder nein? Die Antwort ist ein klares Ja. Die korrekte Antwort lautet:



In vielen Fällen verhält sich Licht so, als handele es sich um eine *Welle*. Es gibt aber auch Fälle, in denen sich Licht wie ein *Strom von Teilchen* verhält.

Dies ist einer der Widersprüche, die am Ende des 19. Jahrhunderts in der Physik auftauchten und schließlich zur Entwicklung der Quantenmechanik geführt haben. Einzelheiten werden in den Kapiteln 36 und 39 diskutiert.

Licht kann sich also manchmal wie eine Welle und manchmal wie ein Teilchenstrom verhalten. Aber damit ist es nicht genug: Manchmal ist es durchaus ausreichend, Licht als einen *Strahl* zu behandeln, wie er etwa von einer Taschenlampe oder besser von einem Laser erzeugt wird. Aber dies ist nur eine von vielen der bei Physikern so beliebten Vereinfachungen. Der sogenannte *Welle-Teilchen-Dualismus* ist hingegen eine Frage, die bis zu den Grundfesten der Quantenmechanik (Kapitel 39) hinabreicht.

Welches der drei Modelle des Lichts das jeweils geeignete ist, hängt von verschiedenen Umständen ab. Lichtstrahlen sind generell nur dann eine sinnvolle Beschreibung, wenn die Wellenlänge klein gegen alle übrigen Längen im Experiment ist. Dies ist beispielsweise bei der Spiegelung oder Brechung von sichtbarem Licht der Fall. Schaut man dagegen auf die Kante eines Spiegels im Mikrometermaßstab, erkennt man Beugungseffekte.

Ob auf der Mikroskala das Wellen- oder das Teilchenstrommodell zu wählen ist, ist dagegen nicht so leicht zu entscheiden. Beispielsweise muss man am Doppelspalt (Interferenz!) immer das Wellenbild wählen, ein Einzelspalt lässt sich in der Regel auch mit Teilchen beschreiben. Bei sehr hohen Strahlungsenergien überwiegt in der Regel allerdings der Teilchenaspekt.

### Vorwärts wie Rückwärts: Licht als Strahl

Im einfachsten Fall kann Licht als Strahl behandelt werden. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts liegen im Bereich von 400–750 nm. Im Normalfall sind Linsen, Spiegel und auch Detektoren (Schirme, das Auge usw.) wesentlich größer. In diesem Fall kann die *Strahlenoptik* angewendet werden, die ausführlich in den Kapiteln 20–23 dargestellt wird. Wenn man Licht als Strahl behandelt, so muss man die folgende Regel berücksichtigen, die aus Abbildung 18.6 abgelesen werden kann:



Der *Strahlengang*, d. h. der Durchgang eines Lichtstrahls durch ein optisches Instrument ist umkehrbar.

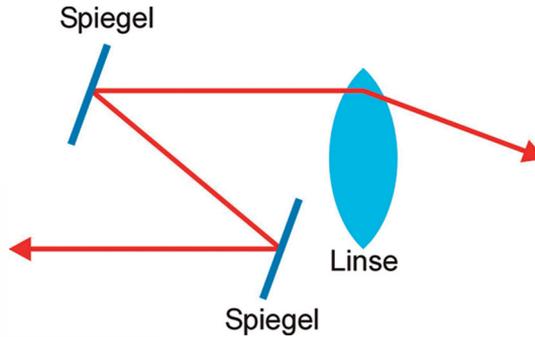


Abbildung 18.6: Jeder Strahlengang ist umkehrbar.

## Licht als Welle

Wenn man es mit Objekten zu tun hat, deren Abmessungen in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts liegen (z. B. schmale Spalte), muss man Licht als Welle behandeln. Dann können Interferenz- und Beugungseffekte auftreten, auf die in Kapitel 19 genauer eingegangen wird.

## Licht als Teilchenstrom

Dieser letzte Aspekt spielt in der klassischen Physik und damit auch in diesem Teil über die Optik überhaupt keine Rolle, er wird, wie gesagt, erst im Zusammenhang mit der Revolution in der Physik und mit der Quantenmechanik von Bedeutung.

Im vorliegenden Teil wird die Wellennatur des Lichts in diesem und im folgenden Kapitel behandelt, während die verbleibenden Kapitel 20–23 vor allem der Strahlenoptik gewidmet sind. Allerdings wird auch deutlich werden, dass man die Wellennatur des Lichts niemals aus den Augen verlieren darf.

### *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

Sie mögen sagen: »Noch nie gehört. Was soll dieser englische Titel hier?« Wenn Sie allerdings das Thema dieses Kastens erfahren, werden Sie sagen: »Darüber wollte ich immer schon mehr wissen!«

Schauen Sie sich die Überschrift noch einmal genau an. Die Anfangsbuchstaben der großgeschriebenen Wörter ergeben »LASER«. Jetzt sind Sie wahrscheinlich zufrieden. Die Lichtquelle *Laser* gibt es mittlerweile in jedem Haushalt: In jedem CD-Player steckt ein Laser, und vielleicht besitzen Sie auch einen Laserpointer. Laser gibt es mittlerweile in (fast) jeder Farbe, Größe und Intensität. Übersetzt man das »Akronym« Laser, erhält man »Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung«. Das hört sich kompliziert an und ist in der Tat nicht ganz einfach. Um die Wirkungsweise eines Lasers zu verstehen,

muss man tief in die Quantenmechanik eintauchen. Es genügt, zu sagen, dass der Name Albert Einstein eine große Rolle bei der Entwicklung der Theorie spielt. Interessanterweise entwickelte Einstein diese Theorie bereits 1916; der erste *Maser* (Mikrowellen-Laser) wurde 1954, der erste Laser mit sichtbarem Licht erst 1960 realisiert.

In einer normalen Lichtquelle werden Atome durch Stöße oder andere Prozesse so angeregt, dass sie einen energetisch höheren Zustand einnehmen. Nach einer gewissen Zeit (typischerweise  $10^{-8}$  s) fallen die Atome dann wieder in ihren energetischen Grundzustand zurück, wobei die Energiedifferenz als Photon (Lichtquant; Kapitel 36) ausgesendet wird. Dies nennt man *spontane Emission*. Derselbe Prozess findet auch bei anderen Atomen in der Quelle statt, wobei diese Vorgänge allerdings völlig unkoordiniert sind. Die Aussendung der Photonen findet in alle Raumrichtungen statt; es gibt keine Beziehung zwischen den einzelnen Photonen (Abbildung 18.7a).

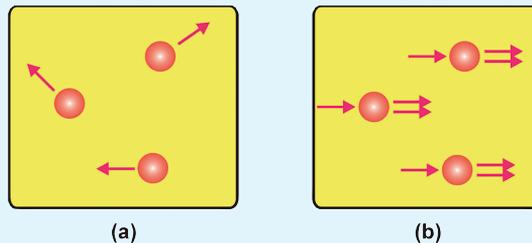


Abbildung 18.7: Spontane (a) und stimulierte Emission (b) von Licht

Der Fall liegt anders, wenn das angeregte Atom von einem Photon getroffen wird, dessen Energie der Anregungsenergie entspricht. Dann fällt es sofort in seinen Grundzustand zurück. Das dabei ausgesendete Photon besitzt die gleiche Richtung wie das auslösende Photon und ist im Gleichtakt mit ihm. Infolgedessen liegen jetzt zwei Photonen mit den gleichen Eigenschaften vor. Dieser Prozess wird *stimulierte* oder *induzierte Emission* genannt. Er wurde bereits 1916 von Albert Einstein beschrieben.

Man muss jetzt dafür sorgen, dass sich die so erzeugten Photonen vervielfachen. Dazu sind zwei Schritte erforderlich:

- ✓ Die bereits vorhandenen Photonen müssen dazu verwendet werden, immer mehr Photonen mit gleichen Eigenschaften zu erzeugen, indem sie in einem bestimmten Volumen hin- und herwandern. Zu diesem Zweck ist der Laser an beiden Enden *verspiegelt*, wobei der Spiegelabstand so gewählt ist, dass sich eine stehende Welle zwischen den Spiegeln ausbildet; er muss also ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein (Kapitel 16). Auf diese Weise wandern die Photonen zwischen den beiden Spiegeln hin und her.
- ✓ Damit dieser Prozess erfolgreich ist, müssen genügend angeregte Atome vorhanden sein. Normalerweise ist der Grundzustand stärker besetzt als angeregte Zustände. Damit ein Laser funktioniert, muss das Gegenteil der Fall sein, es muss eine *Besetzungsinversion* vorliegen. Dies wird durch äußere Energiezuführung verwirklicht, das sogenannte Pumpen. Dies kann je nach System optisch oder elektronisch erfolgen. Details hängen vom jeweiligen Lasertyp ab.

Ein wichtiger Schritt fehlt allerdings noch, denn bis jetzt hat man noch keinen Laser. Man muss einen Strahl auskoppeln. Dies erreicht man, indem man einen der beiden Spiegel so auslegt, dass er nur 99 % reflektiert und 1 % durchlässt. Dieses eine Prozent liefert einen intensiven, monochromatischen, polarisierten und kohärenten Lichtstrahl.

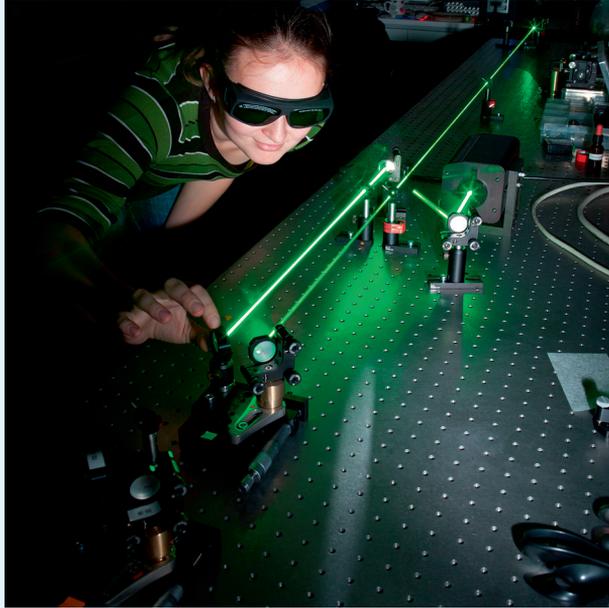


Abbildung 18.8: Ein optischer Aufbau mit Laserstrahlen

## Licht quantitativ: Intensität, Strahlungsleistung und Lichtmenge

Bislang wurden die Ausbreitung und die Eigenschaften von Licht oder anderer elektromagnetischer Strahlung beschrieben, ohne auf Größen wie die mit einem Lichtstrahl verbundene Energie oder Leistung einzugehen. Aber Sie wissen selbst, dass eine Oberfläche, die mit Licht bestrahlt wird, warm wird und dass man mithilfe einer Linse Sonnenlicht so bündeln kann, dass man ein Feuer entzünden kann. Licht ist also zweifelsohne mit dem Transport von Energie verbunden. Es gibt eine Reihe von Größen, mit denen man Licht quantitativ beschreiben kann. Diese Größen werden im Folgenden vorgestellt. Dabei kann man sie grob in zwei Gruppen unterteilen:

- ✓ *Energetische Größen* wie die Intensität oder die Leistung, die unabhängig von der menschlichen Wahrnehmung sind. Energetische Größen werden häufig mit dem Index  $e$  gekennzeichnet.

- ✓ *Photometrische* (also lichttechnische) Größen, die sich nicht nur auf die direkten physikalischen Aspekte beziehen, sondern auch die Wahrnehmung durch das Auge berücksichtigen. Zur Kennzeichnung wird häufig der Buchstabe  $v$  (für visuell) verwendet.

### Rein physikalisch: Energetische Größen

Von allen Größen zur quantitativen Beschreibung von Licht und anderen elektromagnetischen Wellen ist Ihnen wahrscheinlich die Intensität am geläufigsten.



Die *Intensität*  $I$  einer Lichtwelle ist proportional zum Quadrat ihrer Amplitude. Ihre Einheit ist  $\text{W/m}^2$ , also Leistung pro Fläche.

Diese Leistung, die von einer Lichtwelle transportiert wird, wird entsprechend als *Strahlungsleistung* bezeichnet:

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt}$$



In Kapitel 39 wird dargestellt, dass Licht auch durch einen Strahl von Teilchen mit der Teilchenenergie  $hf$  beschrieben werden kann, wobei  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum und  $f$  die Frequenz des Lichts sind.

Für den Photonenstrom gilt:

$$n_p = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Diese Gleichung beschreibt die Anzahl der Photonen, die pro Zeiteinheit transportiert werden. Daraus ergibt sich für die Strahlungsleistung:

$$\Phi_e = n_p \cdot hf$$

Die wichtigsten energetischen Einheiten zur Beschreibung von Licht sind im linken Teil von Tabelle 18.2 zusammengefasst.

### Das Auge misst mit: Photometrische Größen

Die zweite Gruppe von Größen zur quantitativen Beschreibung von Licht, die sogenannten *photometrischen* oder *visuellen Größen*, betreffen die standardisierte Lichtempfindung des menschlichen Auges. Eine dieser Größen ist die Lichtstärke, deren Einheit *Candela* zu den sieben Basiseinheiten des SI-Systems gehört (Kapitel 2) und weiter unten erläutert wird.

Es ist allerdings besser, an dieser Stelle nicht mit der Lichtstärke, sondern mit zwei weiteren photometrischen Größen zu beginnen, dem Lichtstrom und der Lichtmenge.



Der *Lichtstrom* ist wie folgt definiert:

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Dabei sind  $V(\lambda)$  die *Hellempfindlichkeitskurve* und  $K_m$  das *photometrische Strahlungsäquivalent*. Der Lichtstrom ist das photometrische Gegenstück zur energetischen Größe der Leistung (Tabelle 18.2).



Die Einheit des Lichtstroms ist das *Lumen*. Es gilt  $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$ . Die Einheit  $\text{sr}$  steht für *Steradian*, also den Raumwinkel. Sie wird in Kapitel 49 definiert. Die photometrischen Einheiten werden unten, nach Einführung der Candela, noch einmal zusammenfassend diskutiert.

Diese Gleichung ist für die Photometrie von zentraler Bedeutung. Sie enthält auf der linken Seite die photometrische Größe  $\Phi_v$  und auf der rechten Seite die energetische Größe  $\Phi_e$ , stellt also eine Verbindung zwischen den beiden Gruppen von Größen her. Diese Verbindung beruht auf einer Konstanten und einer Verteilungsfunktion:

- ✓ Die *Hellempfindlichkeitskurve (V-Lambda-Kurve)* beschreibt die (normalisierte) spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für das Tag- bzw. Nachtsehen. Sie ist in Abbildung 18.9 dargestellt. Sie wurde 1924 empirisch ermittelt und zuletzt 1983 überarbeitet. Sie liegt für den Bereich zwischen 360 und 830 nm in 1 nm-Schritten in tabellarischer Form vor. Ihr Maximum befindet sich für das Tagsehen bei 555 nm.

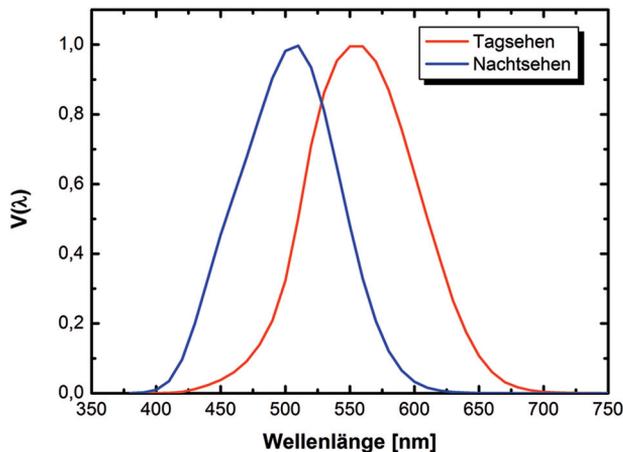


Abbildung 18.9: Hellempfindlichkeitskurven für Tagsehen und Nachtsehen

- ✓ Das *photometrische Strahlungsäquivalent*  $K_m$  beschreibt das Maximum dieser Kurve, das bei 555 nm liegt. Es beträgt:

$$K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Die Einheit von  $K_m$  enthält mit dem Watt eine energetische und mit dem Lumen eine photometrische Einheit. Daher stellt das photometrische Strahlungsäquivalent das eigentliche Bindeglied zwischen den energetischen und den photometrischen Größen dar.



Die oben vorgestellten Werte von  $K_m$  und  $V(\lambda)$  gelten für das *Tagsehen* (photopisches Sehen). Für das *Nachtsehen* (skotopisches Sehen) gilt  $K_m = 1699 \text{ lm/W}$  bei 505 nm; die entsprechende  $V$ -Lambda-Kurve ist ebenfalls in Abbildung 18.9 dargestellt.

Der Lichtstrom entspricht der energetischen Größe der Leistung, also der Energie pro Zeit. Also muss es auch eine photometrische Größe geben, die der Energie entspricht. Dies ist die Lichtmenge.



Die *Lichtmenge* ist die (durch die oben eingeführt  $V$ -Lambda-Kurve und das photometrische Strahlungsäquivalent) gewichtete Strahlungsenergie. Sie berechnet sich als Integral des Lichtstroms über die Zeit:

$$Q_v = \int_0^T \Phi_v(t) dt$$

Die Einheit der Lichtmenge ist dementsprechend  $\text{lm} \cdot \text{s}$ .

Jetzt ist es allerdings an der Zeit, die Größe der *Lichtstärke* einzuführen, deren Einheit die Basiseinheit Candela ist. Die Lichtstärke  $I_v$  ist der von einer Lichtquelle in einen bestimmten Raumwinkel  $\Delta\Omega$  ausgesendete Lichtstrom  $\Delta\Phi_v$ , also:

$$I_v = \frac{\Delta\Phi_v}{\Delta\Omega}$$

Die Einheit der Lichtstärke ist die Candela. Sie ist wie folgt definiert:



Eine *Candela* (cd) ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die in einer bestimmten Richtung monochromatische Strahlung der Frequenz  $5,40 \cdot 10^{14}$  Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung den Wert  $1/683$  Watt pro Steradian hat.

Beachten Sie: Die Frequenz von  $5,40 \cdot 10^{14}$  Hz entspricht einer Wellenlänge von 555 nm, das photometrische Strahlungsäquivalent ist als  $683 \text{ lm/W}$  definiert.

physikalische Größe	Einheit	lichtspezifische Größe	Einheit
Energie	J	Lichtmenge	lm · s
Leistung	W	Lichtstrom	lm
Strahlungsstärke	W/sr	Lichtstärke	cd = lm/sr
Intensität	W/m <sup>2</sup>	Beleuchtungsstärke	lm/m <sup>2</sup>

Tabelle 18.2: Energetische (links) und photometrische Größen (rechts) zur quantitativen Beschreibung von Licht

In Tabelle 18.2 sind die oben diskutierten energetischen und photometrischen Größen zur quantitativen Beschreibung von Licht vergleichend gegenübergestellt.

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer photometrischer Größen, von denen an dieser Stelle zumindest noch eine erwähnt werden muss.

Die *Beleuchtungsstärke* gibt den Lichtstrom pro Fläche an:

$$E_v = \frac{\Delta\Phi_v}{\Delta A}$$

Ihre Einheit ist lm/m<sup>2</sup> oder *Lux* (lx). Sie entspricht damit der der Intensität (Tabelle 18.2).



Die hier diskutierten photometrischen Größen sind nur im Bereich des sichtbaren Lichts definiert. Sie sind für andere elektromagnetische Wellen ohne jede Bedeutung.

Die obige Darstellung soll an dieser Stelle noch einmal kurz zusammengefasst werden: Es gibt zwei Gruppen von Größen zur quantitativen Beschreibung von (sichtbarem) Licht. Die erste umfasst energetische Größen, die auch in vielen anderen Bereichen der Physik verwendet werden. Die zweite Gruppe sind die photometrischen oder visuellen Größen, die den energetischen Größen entsprechen, aber die Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigen. Dies erfolgt mithilfe der Hellempfindlichkeitskurve und des photometrischen Strahlungsäquivalents. Diese beiden Größen sind in der Definition der SI-Grundgröße Candela direkt berücksichtigt. Damit ergeben sich als wichtigste photometrische Einheiten:

- ✓ Candela (cd, Lichtstärke)  $\hat{=}$  W/sr (Strahlungsstärke)
- ✓ Lumen (cd · sr, Lichtstrom)  $\hat{=}$  W (Leistung)
- ✓ Lux (lm/m<sup>2</sup>, Beleuchtungsstärke)  $\hat{=}$  W/m<sup>2</sup> (Intensität)



Die Lichtstärke einer Quelle beträgt 2 cd. Wie groß ist die Beleuchtungsstärke in 3 m Abstand?

Für die Beleuchtungsstärke gilt die Beziehung:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} = \frac{I_v \cdot \Omega}{A}$$

Für den Raumwinkel gilt:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Setzt man dies ein, so ergibt sich:

$$E_v = \frac{I_v \cdot A}{r^2 A} = \frac{I_v}{r^2} = \frac{2 \text{ cd}}{(3 \text{ m})^2} = 0,22 \text{ lx}$$

## Polarisation

Licht ist eine transversale elektromagnetische Welle, bei der das elektrische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Senkrecht zum elektrischen Feld und ebenfalls senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt das magnetische Feld. Bei der Ausbreitung einer Lichtwelle ist zunächst nur eine Richtung ausgezeichnet: Die Ausbreitungsrichtung. Das elektrische Feld schwingt senkrecht dazu. Es hat aber immer noch einen Vollkreis von  $360^\circ$  für eine mögliche Orientierung der Schwingungsrichtung zur Verfügung.

Im Normalfall treten in einem Lichtstrahl alle möglichen Schwingungsrichtungen des elektrischen Feldes zu gleichen Anteilen auf. In diesem Fall spricht man von *unpolarisiertem Licht* (Abbildung 18.10). Es gibt aber Materialien, bei denen der Durchgang von Licht von der Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes abhängt (siehe den Kasten über die Doppelbre-

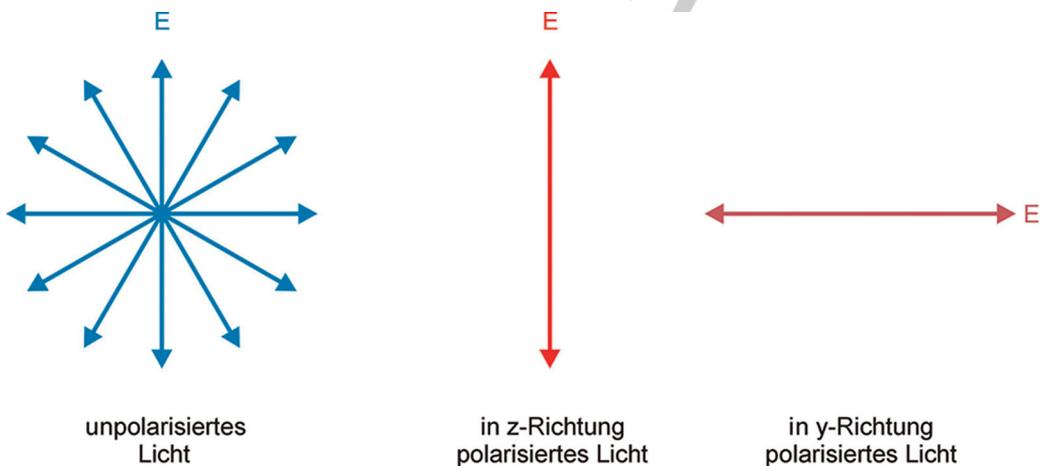


Abbildung 18.10: Polarisiertes und unpolarisiertes Licht

chung in Kapitel 20). Aus derartigen Materialien kann man Polarisationsfilter herstellen, die nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung durchlassen.



*Polarisationsfilter* oder kurz *Polfilter* lassen nur Lichtkomponenten durch, bei denen das elektrische Feld in eine bestimmte Richtung schwingt (Abbildung 18.10). Komponenten, die senkrecht dazu schwingen, werden ausgelöscht.



Auch bei polarisiertem Licht schwingt das magnetische Feld senkrecht zum elektrischen Feld.

Abbildung 18.11 zeigt eine Lichtquelle, deren Strahl nacheinander zwei Polfilter durchläuft, die so ausgerichtet sind, dass ihre Durchlassrichtungen senkrecht aufeinander stehen (*gekreuzte Polfilter*). Unabhängig vom Polarisationszustand des Lichts vor den Filtern kann kein Licht diese Anordnung passieren, der Strahl wird völlig ausgelöscht.

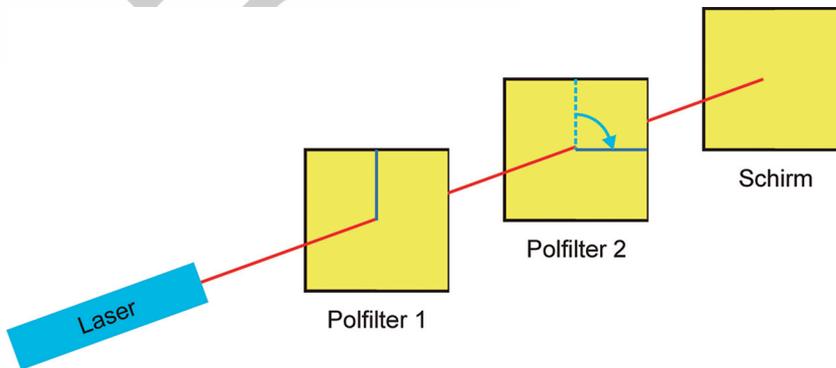


Abbildung 18.11: Auslöschung von Licht durch gekreuzte Polfilter

Dies wird noch einmal in Abbildung 18.12 illustriert. Ausgangspunkt ist unpolarisiertes Licht, das in alle Richtungen schwingt. Nach dem ersten Filter ist das Licht polarisiert; es enthält nur noch Komponenten, deren elektrisches Feld in  $z$ -Richtung schwingt. Für derart polarisiertes Licht aber ist das zweite Polfilter unpassierbar; also erfolgt eine vollständige Auslöschung.

Abbildung 18.13 zeigt eine Anordnung mit drei Polfiltern, wobei zwischen zwei gekreuzten Filtern ein drittes eingeschoben wurde, dessen Durchlassrichtung  $45^\circ$  in Bezug auf die beiden anderen Filter beträgt. Hat dieses mittlere Filter einen Einfluss auf die auf dem Schirm beobachtete Intensität? Ich gebe Ihnen zwei Antwortmöglichkeiten vor:

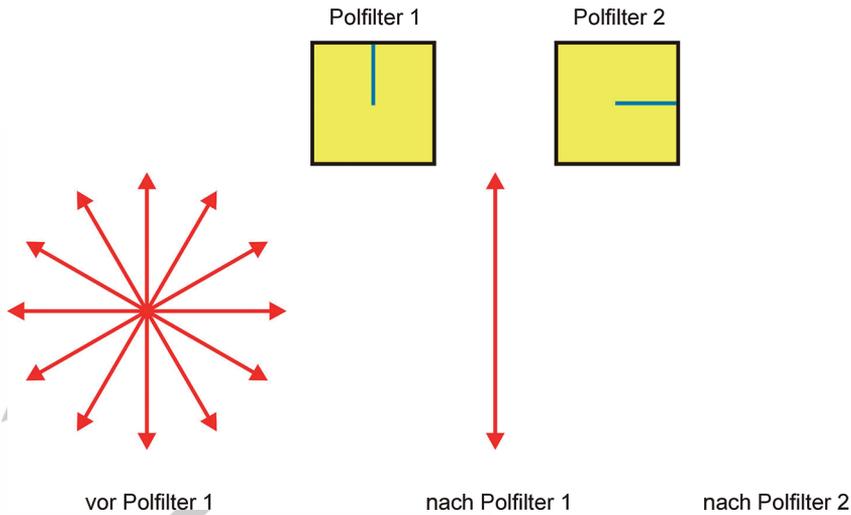


Abbildung 18.12: Eine Anordnung aus zwei gekreuzten Polfiltern

- ✓ Dieses Filter hat keinen Einfluss. Die beiden gekreuzten Filter löschen das Licht aus, und das war es. Ein drittes Filter kann daran nichts ändern.
- ✓ Natürlich hat es einen Einfluss, denn sonst würde diese Frage hier nicht gestellt werden.

Und natürlich ist die zweite Antwort richtig, aber Sie würden wahrscheinlich gerne auch die physikalische Begründung kennen. Der Grund für diesen Effekt ist, dass es sich um elektrische Felder und damit um Vektoren handelt, für die das in Kapitel 3 eingeführte *Superpositionsprinzip* gilt. Das erste Filter lässt nur Komponenten des elektrischen Feldes durch, die senkrecht stehen. Diese Schwingungen werden, wenn sie direkt auf das gekreuzte Filter fallen, vollständig

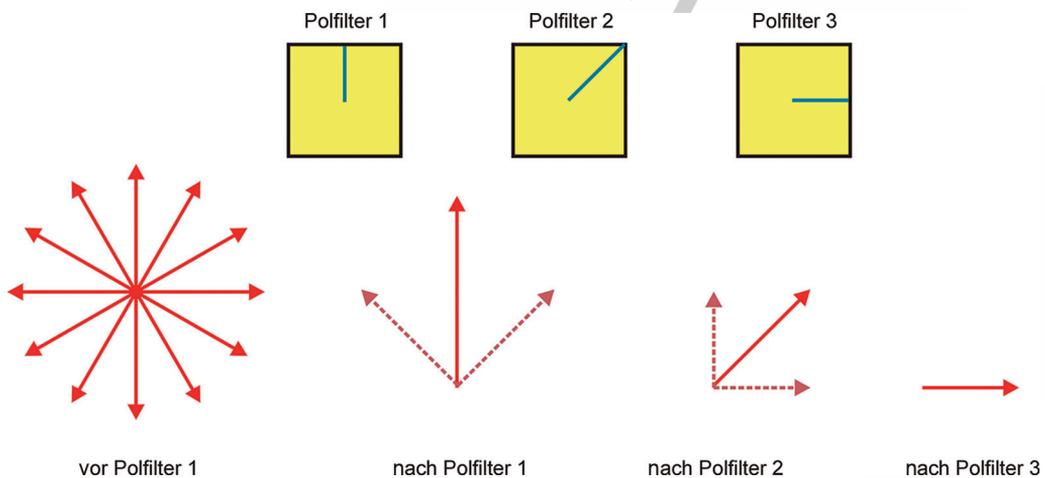


Abbildung 18.13: Eine Anordnung aus drei gekreuzten Polfiltern. Ein Teil der Strahlung kommt durch!

ausgelöscht. Allerdings befindet sich nun das  $45^\circ$ -Filter dazwischen. Das Superpositionsprinzip besagt nun, dass das senkrecht schwingende elektrische Feld in zwei zueinander senkrechte Komponenten zerlegt werden kann, jeweils unter den Winkeln von  $45^\circ$  und  $-45^\circ$ . Letztere wird von dem  $45^\circ$ -Filter ausgelöscht, erstere jedoch durchgelassen. Dies bedeutet, dass das elektrische Feld des Lichts, das das letzte Filter erreicht, nicht länger senkrecht schwingt, sondern unter einem Winkel von  $45^\circ$ . Demzufolge kann ein Teil des Lichts auch dieses Filter passieren, und man sieht auf dem Schirm eine Intensität. Das mittlere  $45^\circ$ -Filter bewirkt also eine Drehung der Polarisationsrichtung zwischen den beiden ursprünglichen Filtern.

## Übungsaufgaben zu diesem Kapitel



### Aufgabe 18.1

Nennen Sie je eine Situation, in denen Licht als Strahl, als Welle oder als Teilchenstrom (Photonenstrom) beschrieben werden kann bzw. muss.

### Aufgabe 18.2

Die Sonne ist etwa 150 Millionen km von der Erde entfernt, der Mond ca. 400.000 km. Wie lange braucht das Sonnenlicht, um die Erde zu erreichen? Wie lange braucht das vom Mond reflektierte Sonnenlicht, um vom Mond zur Erde zu gelangen?

### Aufgabe 18.3

Mein Lieblingsradiosender ist hr1. In Kassel sendet er mit einer Frequenz von 94,3 MHz. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieses Signals? Wie groß ist seine Wellenlänge?

### Aufgabe 18.4

Der European Space Agency (ESA) ist zum ersten Mal eine Mondlandung gelungen. Um den Astronauten zu gratulieren, schickt sie einen Laserstrahl an die Landestelle. Gleichzeitig nimmt sie Funkverbindung mit den Astronauten auf. Welches der beiden Signale erreicht den Mond zuerst?

### Aufgabe 18.5

Ein Projektor strahlt einen Lichtstrom von 800 lm auf eine 25 m entfernte und  $3,5\text{ m} \times 5\text{ m}$  große Leinwand. Wie groß ist der Lichtstrom in Richtung der Leinwand? Wie groß ist die Beleuchtungsstärke auf der Leinwand?

### Aufgabe 18.6

Was würde passieren, wenn man den  $45^\circ$ -Polfilter aus Abbildung 18.13 nicht zwischen die beiden gekreuzten Filter stellen würde, sondern davor oder dahinter?