

Aufgaben 5 Elektromagnetische Wellen Dispersion, Farben, Fotometrie

Lernziele

- sich aus dem Studium eines schriftlichen Dokumentes neue Kenntnisse und Fähigkeiten erarbeiten können.
- einen bekannten oder neuen Sachverhalt analysieren und beurteilen können.
- aus einem Experiment neue Erkenntnisse gewinnen können.
- eine neue Problemstellung selbstständig bearbeiten und in einer Gruppe diskutieren können.
- das Phänomen der Dispersion kennen und verstehen.
- verstehen, wie die Aufspaltung von weissem Licht in die Spektralfarben zustande kommt.
- verstehen, wie ein Regenbogen zustande kommt.
- den Unterschied zwischen einem kontinuierlichen Spektrum und einem Linienspektrum kennen und verstehen.
- die additive und die subtraktive Farbmischung kennen und verstehen.
- das Farbensehen im menschlichen Auge kennen und verstehen.
- wissen und verstehen, was Komplementärfarben sind.
- wissen und verstehen, wie die Farbe eines Körpers zustande kommt.
- die wichtigsten radiometrischen und fotometrischen Grössen kennen und verstehen.
- den Zusammenhang zwischen den radiometrischen und den fotometrischen Grössen kennen, verstehen und anwenden können.
- wissen und verstehen, was ein Raumwinkel ist.

Aufgaben

Dispersion

- 5.1 Studieren Sie im Lehrbuch Tipler/Mosca den folgenden Abschnitt:
- Dispersion (Seiten 1019 und 1020 im Abschnitt „28.3 Reflexion und Brechung“, ohne den Teil „*Berechnung des Beobachtungswinkels beim Regenbogen“)
- 5.2 Bearbeiten Sie im Arbeitsbuch Mills zu Tipler/Mosca die folgende Aufgabe:
A28.15

Farben

- 5.3 Studieren Sie im Lehrbuch Tipler/Mosca den folgenden Abschnitt:
- 28.6 Lichtspektren (Seiten 1029 bis 1032)
- 5.4 Studieren Sie den folgenden Abschnitt „Die Farbwahrnehmung im Auge“ aus dem Lehrbuch Dorn-Bader (Dorn-Bader, Physik in einem Band, Seiten 162 bis 165, ISBN 3-507-86210-7):
(siehe nächste drei Seiten)

§ 62 Die Farbwahrnehmung im Auge

1. Rot und Grün gibt – Weiß

Die Summe sämtlicher farbiger Lichter des Spektrums empfinden wir als etwas Neues, nämlich als *Weiß*. Welchen Eindruck erhält unser Auge wohl, wenn wir nun nicht *alle* farbigen Lichter des Spektrums, sondern nur einen Teil davon vereinigen? Welche Gesetze gelten für eine solche Addition *einzelner* farbiger Lichter?

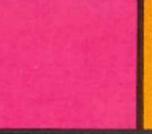
Zur Beantwortung dieser Frage untersuchen wir vorerst, welchen Eindruck unser Auge erhält, wenn wir aus dem kontinuierlichen Spektrum *eine* Farbe weglassen und dann die restlichen farbigen Lichter des Spektrums wieder addieren.

Versuch 193: Wir wiederholen Versuch 189, in dem alle Spektralfarben zu Weiß vereinigt werden. Mit einem schmalen Prisma lenken wir nun nach *Bild 162.2* das *rote* Licht so zur Seite, daß es nicht mehr an der Farbaddition beteiligt ist: *Die Stelle, an der alle übrigen Spektralfarben vereinigt werden, leuchtet jetzt grün!* – Nun schieben wir das schmale Prisma durch das ge-

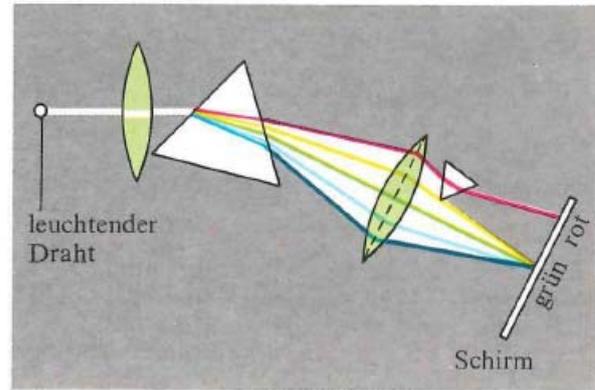
samte Spektrum und blenden so die einzelnen Spektralfarben der Reihe nach aus. Dabei entsteht an der Vereinigungsstelle ein buntes Farbenspiel. Die Farben, die unser Auge jeweils empfindet, sind in *Bild 162.1* verzeichnet. Die in dieser Darstellung übereinander liegenden Farben werden **Komplementärfarben** genannt.

Erblicken wir z.B. das rote Licht einer Verkehrsampel, so könnte dieser Farbeindruck auf verschiedene Arten zustandekommen:

- In unser Auge könnte spektralreines (einfarbiges) rotes Licht gelangen.
- Das Auge könnte aber auch sämtliche Spektralfarben außer Grün empfangen.

Ausgeblendete Spektralfarbe						
Mischfarbe des Restes						

162.1 Hier stehen Paare von Komplementärfarben übereinander.



162.2 Aus dem Spektrum wird das rote Licht herausgenommen.

Welcher dieser beiden Fälle zutrifft, kann das Auge allein nicht feststellen.

Das durch Addition entstandene Rot kann man als „Weiß ohne Grün“ bezeichnen. Fügt man die Spektralfarbe Grün hinzu, so ist das Spektrum wieder komplett; es ist also klar, daß dabei Weiß entsteht. Seltsamerweise erhalten wir aber auch dann Weiß, wenn wir mit zwei schmalen Spiegeln aus dem Spektrum die beiden *Spektralfarben* Rot und Grün so ablenken, daß sie aufeinanderfallen. Auch die übrigen Komplementärfarben ergeben stets zusammen Weiß. Ob es sich nun um reine Spektralfarben

handelt oder um Farben, die durch Addition entstanden sind, stets gilt:

Zwei Komplementärfarben ergeben zusammen Weiß.

Welchen Eindruck erhält das Auge aber, wenn wir keine Komplementärfarben, sondern zwei *ganz beliebige* farbige Lichter addieren?

Versuch 194: Zur Erzeugung farbiger Lichter benutzen wir zwei *Diaprojektoren* mit vorgeschalteten *Farbfiltern*. Damit werfen wir zwei im Spektrum nahe beieinander liegende farbige Lichter – so z.B. Rot und Gelb – auf einen

Schirm: Unser Auge erhält den Farbeindruck Orange! Projizieren wir Orange und Grün aufeinander, so erhalten wir Gelb.

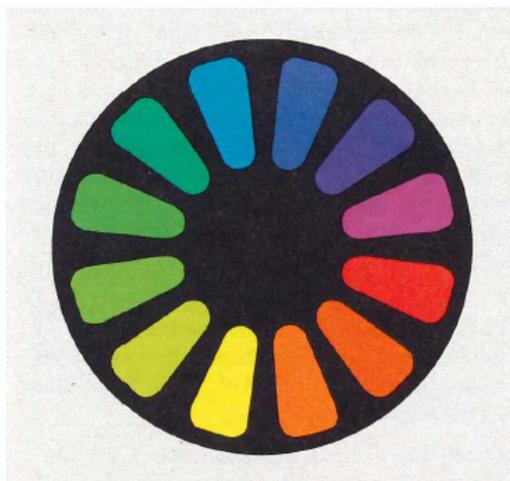
Nun addieren wir die beiden jeweils am äußersten Rand des Spektrums vorkommenden farbigen Lichter Rot und Violett. Dabei entsteht ein ganz neuer Farbeindruck, der im Spektrum überhaupt nicht vorkommt, nämlich *Purpur*. Je nachdem, ob man in dieser Addition das Rot oder das Violett *intensiver* macht, erhält man immer wieder andere Purpurtöne; man kann sie auf diese Weise kontinuierlich von Rot in Violett übergehen lassen.

Damit ist für das Auge ein Übergang vom einen Ende des Spektrums zum anderen geschaffen. Man kann dies dadurch sinnfällig zum Ausdruck bringen, daß man die Spektralfarben in einem Kreis anordnet. Er wird geschlossen, indem man zwischen Violett und Rot die Mischfarbe *Purpur* einfügt (*Bild 163.1*). Dieser **Farbenkreis** verhilft uns zu einer einfachen Merkregel für die Addition farbiger Lichter:

Addiert man Lichter, deren Farben sich im Farbenkreis gegenüberliegen (Komplementärfarben), so erhält man Weiß. Addiert man Lichter, deren Farben im Farbenkreis näher

beieinander liegen, so erhält man eine Farbempfindung, die der dazwischenliegenden Farbe entspricht.

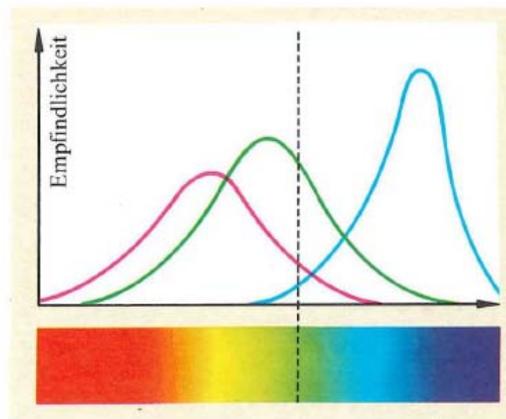
Die Gesetze der additiven Farbmischung sind unabhängig davon, ob man einfarbiges oder Mischlicht verwendet.



163.1 Purpur schließt das Spektrum zum Farbenkreis.

In der Netzhaut des menschlichen Auges befinden sich 3 Arten farbempfindlicher Zapfen. Sie melden die Farben Rot, Grün bzw. Blau an das Gehirn weiter.

Durch additive Mischung der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau lassen sich alle Lichter des Farbenkreises herstellen.



163.2 Farbempfindlichkeit der drei Zapfenarten

2. Das Auge kommt mit drei Farben aus

Die Farbwahrnehmung geschieht auf raffinierte Weise in der Netzhaut des Auges: Von den dort eingelagerten *Zapfen* ist eine Sorte für *Rot*, die andere für *Grün* und die dritte für *Blau* besonders empfindlich.

Versuch 195: Wir projizieren nach *Bild 164.1* rotes, grünes und blaues Licht teilweise aufein-

ander. Die Summe dieser drei Grundfarben ergibt den Eindruck *Weiß!* Den Empfindlichkeitskurven (*Bild 163.2*) entnehmen wir, daß Gelb die Grün meldenden und die Rot meldenden Zapfen gleich stark reizt. Demnach löst die Summe von gleich starkem grünem und rotem Licht im Auge die Empfindung *Gelb* aus. Ebenso kann man erklären, warum Blau und Grün die dazwischenliegende Farbe *Hellblau* ergibt. Auch das Zustandekommen von *Purpur* folgt aus der Dreifarventheorie: Betrachten wir die Empfindlichkeitskurven, so stellen wir fest, daß es keine Spektralfarbe gibt, die gleichzeitig einen Rot meldenden *und* einen Blau meldenden Zapfen erregt, ohne dabei auch einen Grün meldenden Zapfen zu reizen. Deshalb erzeugt rotes Licht und blaues Licht zusammen eine Farbempfindung, die von keiner Spektralfarbe allein hervorgerufen werden kann, eben die Mischfarbe *Purpur!*

Die Intensitäten der drei Grundfarben sind in Versuch 195 gerade so bemessen, daß sie zusammen *Weiß* ergeben. Ändert man die Stärke der einzelnen Farbanteile (etwa durch Abblenden), so entstehen statt *Weiß* alle möglichen *Mischfarben*. Nach diesem Prinzip arbeitet z.B. das *Farbfernsehen*.

4. Filter subtrahieren Farben

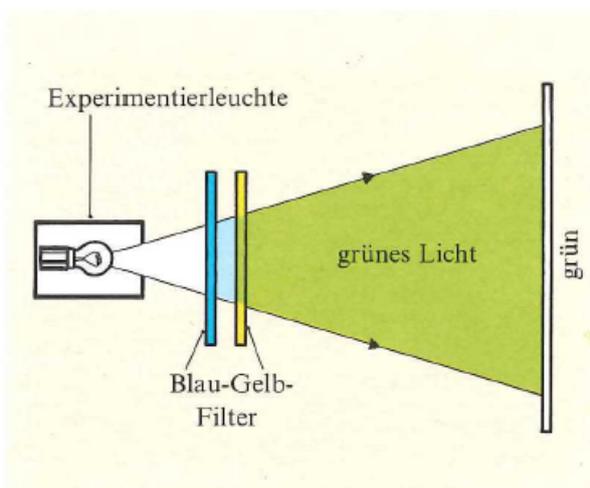
Eine Farbscheibe nimmt aus dem weißen Licht bestimmte Spektralfarben heraus; den Rest erhält unser Auge als *Mischfarbe*. Dieses Filterverfahren heißt **subtraktive Farbmischung**.

Versuch 196: Wir nehmen ein Farbfilter, das den roten und orangefarbenen Teil des Spektrums zurückhält; es erscheint unserem Auge *blau*. Ein zweites Farbfilter, das wir benutzen wollen, absorbiert das blaue Ende des Spektrums; es sieht für unser Auge *gelb* aus. Diese beiden Farbscheiben halten wir nun hintereinander und schicken durch sie das weiße Licht einer Experimentierleuchte (*Bild 165.1*). Auf dem Schirm sehen wir die einzige Farbe, die von *beiden* Filtern durchgelassen wird, nämlich *Grün!*

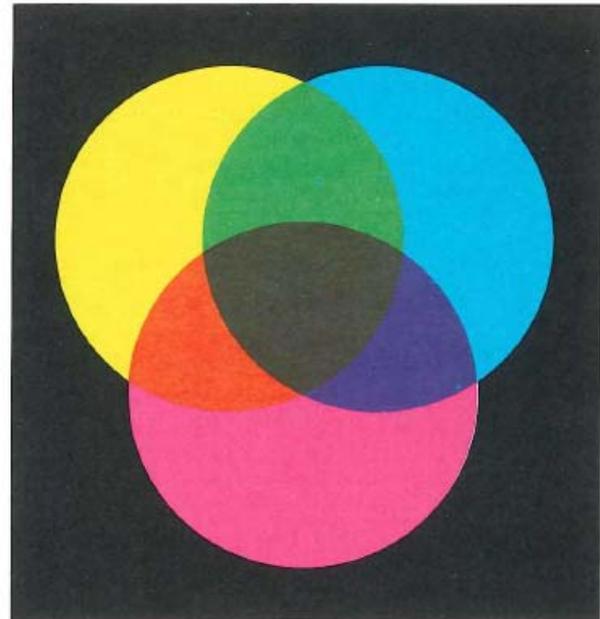
Eine solche subtraktive Farbmischung liegt auch vor, wenn man farbige Substanzen aus dem Malkasten mischt. Streicht man z.B. eine Mischung aus blauer und gelber Wasserfarbe auf weißes Papier, so entsteht *Grün*. Da die Farbkörnchen in mehreren Schichten auf dem Papier liegen, dringt das Licht vor und nach der Streuung am weißen Untergrund durch *beide* Arten der Farbkörnchen. Dabei entsteht derselbe Effekt wie in Versuch 196. *Bild 165.2* zeigt die subtraktive Farbmischung für eine

blaue, eine gelbe und eine rote Farbscheibe. Alle drei Filter zusammen lassen überhaupt kein Licht durch; deshalb ist die Mitte schwarz.

Bei der subtraktiven Farbmischung werden aus Weiß bestimmte Anteile herausgenommen. Die restlichen Lichter addieren sich.



165.1 Die Filter lassen zusammen nur Grün durch.



165.2 Subtraktive Farbmischung

5. Auch beim Farbdruck wird gemischt

Von einem Bild, das farbig gedruckt werden soll, stellt man zuerst *Farbauszüge* in den drei Grundfarben her. Nach ihnen werden dann im Rasterverfahren Druckplatten geätzt. Sie werden entsprechend eingefärbt und anschließend aufeinander gedruckt. Dabei fallen die farbigen Rasterpunkte teils aufeinander, teils nebeneinander (*Bild 165.3*). Die Farbmischung kann also *subtraktiv* (wie beim Farbfilm), aber auch *additiv* (wie beim Farbfernsehen) zustandekommen. Meist wird noch eine Schwarzplatte mitgedruckt, damit das Bild scharfe Konturen erhält. Weil man für dieses Verfahren *vier* verschiedene Druckplatten benötigt, wird es **Vierfarbendruck** genannt.



165.3 Rasterpunkte eines Vierfarbendrucks

5.5 Experimente Posten 1: Farben (30 min)

a) *Farbzerlegung an einem Prisma*

Ein trapezförmiges Prisma wird mit weissem Licht beleuchtet.

- i) Beobachten Sie das Licht, welches die schräge Fläche des Prismas verlässt, indem Sie den Schirm in das Lichtbündel halten. Notieren Sie sich, welche Farben in welcher Reihenfolge auf dem Schirm sichtbar sind. Ist das Farbspektrum ein kontinuierliches oder ein diskretes Spektrum?
- ii) Beurteilen Sie nun, ob sich die Spektralfarben mit einem Prisma weiter zerlegen lassen. Schieben Sie dazu von unten bzw. oben vorsichtig die Spitze des rechtwinkligen Prismas in das farbig aufgefächerte gebrochene Lichtbündel. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.
- iii) Untersuchen Sie nun, wie man mit Hilfe einer Sammellinse das farbig aufgefächerte Lichtbündel wieder zu weissem Licht vereinigen kann. Untersuchen Sie auch die Farbe des wiedervereinigten Lichtes, wenn man mit dem rechtwinkligen Prisma vor der Linse den roten bzw. blauen Bereich ausblendet.

b) *Additive Farbmischung*

Im vorderen Lichtschacht und in den beiden seitlichen Lichtschächten können Farbfilter oder dicht schliessende Blenden eingesetzt werden. So kann eine Farbe alleine oder die additive Farbmischung von zwei oder drei Farben beobachtet werden.

- i) Beobachten Sie den Farbeindruck bei der Addition der folgenden Farben:
 - Rot und Grün
 - Rot und Blau
 - Grün und Blau
 - Rot, Grün und Blau
- ii) Halten Sie für die vier Fälle in i) einen Stift in die unterschiedlich gefärbten Lichtbündel, und beobachten Sie die Farben der entstehenden Schatten.

c) *Subtraktive Farbmischung*

Mit einem oder mehreren vor den vorderen Lichtschacht gehaltenen Farbfilter(n) kann die subtraktive Farbmischung beobachtet werden.

- i) Beobachten Sie den Farbeindruck beim Hintereinanderhalten der folgenden Farbfilter. Erklären Sie den beobachteten Farbeindruck mit Hilfe der subtraktiven Farbmischung:
 - Gelb und Purpur
 - Gelb und Cyan
 - Purpur und Cyan
 - Gelb, Purpur und Cyan
- ii) Führen Sie weitere Experimente mit selbst gewählten Filterkombinationen durch.

d) *Körperfarben*

Ein Blatt mit drei Flächen in den Farben Rot, Grün und Blau wird mit Licht verschiedener Farben beleuchtet.

Beobachten Sie, wie sich die Farben der drei Flächen verändern, wenn sie mit Licht verschiedener Farben beleuchtet werden.

5.6 Experimente Posten 2: Spektren (10 min)

Licht aus verschiedenen Lampen beleuchtet einen Spalt. Die Linse erzeugt ein reelles Bild des Spaltes auf dem Schirm. Ein sogenanntes Geradsichtprisma zerlegt das Licht in seine Spektralfarben.

Beobachten Sie für die verschiedenen Lichtquellen die Spektren auf dem Schirm. Beurteilen Sie jeweils, ob es sich um ein kontinuierliches Spektrum oder um ein Linienspektrum handelt.

(Fortsetzung siehe nächste Seite)

Hinweise:

- Schauen Sie nicht direkt in die Lampen hinein.
- Die Lampen sind z.T. sehr heiss. Berühren Sie daher die Lampengehäuse nicht.

5.7 Studieren Sie die folgenden **Applets**. Sie finden die Applets unter <http://www.thomasborer.ch> → Physik → Dokumente/Applets/Links

- Additive Farbmischung
- Subtraktive Farbmischung
- Farbwahrnehmung

5.8 Studieren Sie das folgende **Theorie-Blatt**. Sie finden das Theorie-Blatt unter <http://www.thomasborer.ch> → Physik → Dokumente/Applets/Links

- Farbaddition im Auge

Betrachten Sie das Muster aus roten und grünen Punkten auf dem Computerbildschirm, einmal aus der Nähe und einmal aus grösserer Entfernung. Beobachten Sie die Farbwahrnehmung bei den verschiedenen Entfernungen.

5.9 Führen Sie den folgenden **Quiz** durch. Sie finden den Quiz unter <http://www.thomasborer.ch> → Physik → Dokumente/Applets/Links

- LEIFI-Quiz „Farben“

5.10 Beurteilen Sie, ob die folgenden Aussagen wahr oder falsch sind. Kreuzen Sie das entsprechende Kästchen an.

	wahr	falsch
a) Das Farbenspektrum des weissen Sonnenlichts ist ein kontinuierliches Spektrum.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) Beim Farbfernseher entstehen die Farben durch Farbaddition.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) Wenn auf ein grünes Spektralfilter, das nur eine Wellenlänge durchlässt, nicht spektralreines grünes Licht fällt, dann wird hinter dem Filter spektralreines grünes Licht zu sehen sein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) Beim Wasserfarbenmalen entsteht aus der Mischung der Farben Gelb und Blau die Farbe Grün. Diese Mischung entspricht einer Farbsubtraktion.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) Addiert man zwei Komplementärfarben, so entsteht die „Farbe“ Weiss.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fotometrie

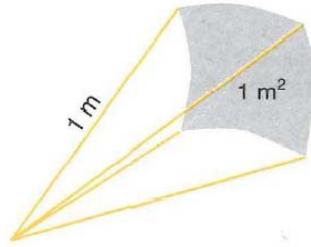
5.11 In der sogenannten Fotometrie wird der Energietransport in Licht beschrieben und gemessen.

Es gibt **radiometrische** (strahlungsphysikalische) und **fotometrische** (lichttechnische) Grössen. Jede fotometrische Grösse entspricht eine radiometrischen Grösse. Im Gegensatz zu den radiometrischen Grössen ist bei den fotometrischen Grössen die Empfindlichkeit des Betrachters mitberücksichtigt.

- a) Studieren Sie auf Wikipedia unter „Radiometrie“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Radiometrie>, 12.3.2018) die folgenden **radiometrischen** Grössen:
- Strahlungsenergie/Strahlungsmenge Q , $[Q] = J$
 - Strahlungsleistung/Strahlungsfluss Φ , $[\Phi] = J/s = W$
 - Strahlungsintensität/Strahlungsstärke I , $[I] = J/s/sr = W/sr$
 - Strahlungsstromdichte/Bestrahlungsstärke E , $[E] = J/s/m^2 = W/m^2$

Hinweise:

- 1 sr (Steradian) ist der räumliche Winkel Ω , dessen Scheitelpunkt im Mittelpunkt einer Kugel mit Radius 1 m liegt und der aus der Kugeloberfläche eine Kalotte der Fläche 1 m^2 ausschneidet:



- Vergleichen Sie mit der Definition des rad (Radiant, Bogenmass): 1 rad ist der ebene Winkel φ , dessen Scheitelpunkt im Mittelpunkt eines Kreises mit Radius 1 m liegt und der aus dem Kreisumfang einen Bogen der Länge 1 m ausschneidet.

- b) Studieren Sie auf Wikipedia unter „Photometrie“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Photometrie>, 12.3.2018) die folgenden **fotometrischen** Grössen:
- Lichtmenge Q_v , [Q_v] = $\text{lm}\cdot\text{s}$
 - Lichtstrom Φ_v , [Φ_v] = lm
 - Lichtstärke I_v , [I_v] = $\text{cd} = \text{lm}/\text{sr}$
 - Beleuchtungsstärke E_v , [E_v] = $\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$
- c) Stellen Sie in geeigneter Form dar, welche fotometrische Grösse welcher radiometrischen Grösse entspricht.
- d) Studieren Sie auf Wikipedia unter „V-Lambda-Kurve“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/V-Lambda-Kurve>, 12.3.2018), wie die fotometrischen und die radiometrischen Grössen über die **Hellempfindlichkeitskurve** zusammenhängen.

- 5.12 Studieren Sie das folgende **Applet**. Sie finden das Applet unter <http://www.thomasborer.ch> → Physik → Dokumente/Applets/Links
- Fotometrie

- 5.13 Eine als punktförmig angenommene Lichtquelle strahlt in alle Richtungen gleichverteilt gelbes Licht der Wellenlänge 600 nm ab. Die Strahlungsleistung ist konstant und beträgt 10.0 W.

Bestimmen Sie ...

- ... die in einer Stunde anfallende Strahlungsenergie.
- ... die Strahlungsintensität.
- ... die Strahlungsstromdichte in der Entfernung 5.00 m von der Lichtquelle.
- ... den Lichtstrom.
- ... die Lichtstärke.
- ... die Beleuchtungsstärke in der Entfernung 5.00 m von der Lichtquelle.

Hinweis:

- Verwenden Sie in d) bis f) die relative Hellempfindlichkeitskurve für das Tagsehen.

- 5.14 (siehe nächste Seite)

5.14 Beurteilen Sie, ob die folgenden Aussagen wahr oder falsch sind.
Kreuzen Sie das entsprechende Kästchen an.

- | | wahr | falsch |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) Jede fotometrische Grösse entspricht einer radiometrischen Grösse. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) Die fotometrische Grösse Lichtstärke entspricht der radiometrischen Grösse Strahlungsleistung. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) Wenn zwei Lichtquellen die gleichen Strahlungsleistungen aufweisen, die eine Lichtquelle jedoch rotes und die andere grünes Licht aussendet, dann ist die Lichtstärke des roten Lichtes höher als die des grünen Lichtes. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) Die Definition der Einheit Candela beruht auf der Definition der Einheit Lumen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) Der Raumwinkel, der einer ganzen Kugeloberfläche entspricht, beträgt 4π . | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

d) ...

5.12 ...

5.13 a) $Q = \Phi \cdot \Delta t = 10.0 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 36.0 \text{ kJ}$

b) $I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{10.0 \text{ W}}{4\pi} = 0.796 \text{ W/sr}$

c) $E = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Phi}{4\pi r^2} = \frac{10.0 \text{ W}}{4\pi \cdot (5.00 \text{ m})^2} = 31.8 \text{ mW/m}^2$

d) $\Phi_V = \Phi \cdot K_m \cdot V(\lambda) = 10.0 \text{ W} \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot 0.62 = 4.2 \cdot 10^3 \text{ lm}$

e) $I_V = I \cdot K_m \cdot V(\lambda) = 0.796 \text{ W/sr} \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot 0.62 = 0.34 \cdot 10^3 \text{ cd}$

f) $E_V = E \cdot K_m \cdot V(\lambda) = 31.8 \text{ mW/m}^2 \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot 0.62 = 13 \text{ lx}$

5.14 a) wahr

b) falsch

c) falsch

d) falsch

e) wahr