Aufgaben 4 Elektromagnetische Wellen
Elektromagnetische Welle, Wellengleichung, Polarisation

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.
- die allgemeine Form einer eindimensionalen Wellenfunktion kennen und verstehen.
- die eindimensionale Wellengleichung kennen und verstehen.
- wissen und verstehen, was eine elektromagnetische Welle ist.
- den Träger einer elektromagnetischen Welle kennen.
- wissen, wie eine elektromagnetische Welle erzeugt werden kann.
- wissen, dass elektromagnetische Wellen Transversalwellen sind.
- die gegenseitige Lage des elektrischen und des magnetischen Feldstärkevektors in einer elektromagnetischen Welle kennen.
- die Richtungen des elektrischen und des magnetischen Feldstärkevektors bezüglich der Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle kennen.
- die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Vakuum kennen.
- einen Überblick über das Frequenzspektrum der elektromagnetischen Wellen haben.
- die mathematische Beschreibung einer sinsuförmigen, ebenen elektromagnetischen Welle kennen.
- das Phänomen Polarisation kennen und verstehen.
- den quantitativen Zusammenhang zwischen den Intensitäten von Licht vor und hinter einem Polarisationsfilter kennen, verstehen und anwenden können.
- verschiedene physikalische Effekte zur Erzeugung von linear und zirkular polarisiertem Licht kennen und verstehen.

Aufgaben

Elektromagnetische Welle

4.1 Studieren Sie im Buch KPK 3 den folgenden Abschnitt:
- 4.7 Elektromagnetische Wellen (Seiten 44 bis 46)

Hinweis:
- Der auf der Seite 46 aufgeführte magnetische Feldvektor $\vec{H}$ unterscheidet sich im Vakuum vom Feldvektor $\vec{B}$, den Sie aus der Physik 2 kennen, nur durch den Faktor μ_0 (magnetische Feldkonstante): $\vec{B} = \mu_0\,\vec{H}$.

4.2 Studieren Sie im Lehrbuch Tipler/Mosca den folgenden Abschnitt:
- 12.2 Periodische Wellen, harmonische Wellen (nur den Teil „Elektromagnetische Wellen“, Seite 468)

4.3 Die folgende Funktion y beschreibt eine eindimensionale harmonische Welle, welche sich in die positive x-Richtung fortbewegt:

$$y(x,t) = \hat{y}\,\sin(kx - \omega t + \varphi)$$

a) Zeigen Sie, dass die Funktion y die folgende Form aufweist:

$$y(x,t) = f(z) = f(x - vt) \qquad (z := x - vt)$$

Hinweise :
- Klammern Sie im Argument der Sinus-Funktion den Faktor k aus.
- Überlegen Sie sich, wie die Grössen k, ω und v zusammenhängen.

b) Zeigen Sie, dass die Funktion y die folgende partielle Differentialgleichung, die sogenannte Wellengleichung, erfüllt:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x,t) = \frac{1}{v^2}\cdot\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x,t)$$

4.4 Zeigen Sie, dass jede Funktion y der Form

$$y(x,t) = f(z) = f(x - vt) \qquad (z := x - vt)$$

die folgende partielle Differentialgleichung, die sogenannte Wellengleichung, erfüllt:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x,t) = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x,t)$$

Hinweis:
- Beim Ableiten der Funktion y benötigt man die Kettenregel:

$$\frac{\partial y}{\partial x}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial x}(x,t) = ...$$
$$\frac{\partial y}{\partial t}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial t}(x,t) = ...$$

4.5 Im Vakuum (d.h. ohne Materie in den Feldern) folgen aus den Maxwell-Gleichungen für die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ und die magnetische Feldstärke $\vec{B}$ (auch „magnetische Flussdichte“ genannt) im eindimensionalen Fall die folgenden Wellengleichungen (ohne Herleitung, vgl. Unterricht):

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \qquad \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \qquad (*)$$

Überprüfen Sie, dass die folgenden Funktionen, die eine sinusförmige elektromagnetische Welle beschreiben, die Wellengleichungen (*) erfüllen, falls $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$

$$E(x,t) = \hat{E} \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

$$B(x,t) = \hat{B} \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

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

		wahr	falsch
a)	Eine elektromagnetische Welle hat keinen Wellenträger.	☐	☐
b)	Die Wellengleichung ist eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung.	☐	☐
c)	Bei einer elektromagnetischen Welle schwingen die elektrischen und magnetischen Feldvektoren immer senkrecht zueinander.	☐	☐
d)	Ein Indiz dafür, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist, ist die Tatsache, dass sich eine elektromagnetische Welle im Vakuum mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet wie Licht.	☐	☐
e)	Eine elektromagnetische Welle der Wellenlänge 500 μm ist eine Lichtwelle im sichtbaren Bereich.	☐	☐

Polarisation

4.7 Studieren Sie im Lehrbuch Tipler/Mosca den folgenden Abschnitt:
- 28.5 Polarisation (Seiten 1024 bis 1029)

4.8 **Experimente Posten 1: Polarisator/Analysator** (20 min)

(Optische Profilbank, Linse f = 100 mm und Polarisationsfolie (Polarisator) auf Reiter, zweite Polarisationsfolie (Analysator) mit Skale auf Reiter)

Das Licht der Lampe läuft nacheinander durch eine Linse, einen Polarisator und einen Analysator auf einen Schirm.

(Fortsetzung siehe nächste Seite)

Beobachten Sie die Helligkeit des runden Lichtflecks auf dem Schirm für die folgenden Situationen. Schreiben Sie Ihre Beobachtungen in einigen Worten auf. Finden Sie Erklärungen für Ihre Beobachtungen.

a) *ohne Polarisator und Analysator* (d.h. weder Polarisator noch Analysator auf der optischen Bank)

b) *mit Polarisator, ohne Analysator* (d.h. nur Polarisator auf der optischen Bank)
- Unterschied zu a)?
- Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung des Polarisators?

c) *mit Polarisator und Analysator* (d.h. sowohl Polarisator als auch Analysator auf der optischen Bank)
- Abhängigkeit von den Polarisationsrichtungen des Polarisators und des Analysators?

d) *λ/4-Plättchen zwischen Polarisator und Analysator*
- Einfluss des λ/4-Plättchens auf die Situationen in c)?
- Abhängigkeit von der Ausrichtung der optischen Achse des λ/4-Plättchens?

4.9 **Experimente Posten 2: Stativstange als Polarisationsfilter** (10 min)

Ein Federseil verläuft durch einen aus zwei parallelen Stativstangen bestehenden Spalt.

Lassen Sie auf dem Federseil einen kurzen Wellenzug gegen den Spalt laufen. Beobachten Sie, ob und wie der Wellenzug den Spalt passiert. Schreiben Sie Ihre Beobachtungen in einigen Worten auf.

Untersuchen Sie die folgenden Fälle:
- Longitudinalwelle
- Transversalwelle, Schwingungsrichtung parallel zum Spalt
- Transversalwelle, Schwingungsrichtung senkrecht zum Spalt
- Transversalwelle, Schwingungsrichtung im Winkel 45° zum Spalt

4.10 **Experiment Posten 3: Polarisation durch Reflexion** (10 min)

An einer Grenzfläche Luft-Plexiglas wird Licht reflektiert und gebrochen.

Untersuchen Sie mit Hilfe des bereitliegenden Polarisationsfilters die Polarisation des einfallenden, reflektierten und gebrochenen Lichtes. Variieren Sie den Einfallswinkel, und bestimmen Sie den Brewster-Winkel.

4.11 **Experiment Posten 4: Polarisation durch Streuung** (10 min)

Betrachten Sie den blauen Himmel (bei schönem Wetter), die Wolken und die Berge durch die bereitliegenden Polarisationsfilter hindurch.

Beurteilen Sie die Polarisation des am Himmel, an den Wolken und an den Bergen reflektierten bzw. gestreuten Sonnenlichtes.

4.12 Im Lehrbuch Tipler/Mosca wird auf der Seite 1026 erklärt (vgl. Aufgabe 4.7), warum die Intensität des Lichtes hinter einer Polarisationsfolie noch genau halb so gross ist wie vor der Folie, falls das auf die Folie auftreffende Licht völlig unpolarisiert ist. Es wird mit einem mittleren Winkel 45° argumentiert.

Eine andere Argumentation bestünde darin, den Faktor $\cos^2(\theta)$ in der Formel (28.23) über alle Winkel θ ($0 \le \theta < 2\pi$) zu mitteln.

Püfen Sie nach, dass $\overline{\cos^2(\theta)}$, d.h. der Mittelwert von $\cos^2(\theta)$ über alle Winkel im Intervall $0 \le \theta < 2\pi$ gleich 1/2 ist.

Hinweis:
- Für die Mittelwertbildung muss die folgende Integration ausgeführt werden (linearer Mittelwert):

$$\overline{\cos^2(\theta)} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \cos^2(\theta)\, d\theta$$

4.13 Bearbeiten Sie im Arbeitsbuch Mills zu Tipler/Mosca die folgenden Aufgaben:
A28.16, A28.17

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

- Polarisation
- Lambda-Viertel-Plättchen

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

		wahr	falsch
a)	Es können nur Transversalwellen polarisiert werden, Longitudinalwellen jedoch nicht.	☐	☐
b)	Bei einer linear polarisierten Lichtwelle schwingt der elektrische Feldvektor immer in der gleichen Ebene.	☐	☐
c)	Polarisiertes Licht kann durch Reflexion erzeugt werden.	☐	☐
d)	Fällt ein Lichtstrahl unter dem Brewster-Winkel auf die Grenzfläche zu einem anderen Medium, so ist der gebrochene Strahl vollständig linear polarisiert.	☐	☐
e)	Ein $\lambda/2$-Plättchen erzeugt aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht.	☐	☐

Lösungen

4.1 ...

4.2 ...

4.3 a) ...

b) ...

4.4 $\frac{\partial y}{\partial x}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial x}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot 1 = \frac{df}{dz}(z)$

$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x,t) = \frac{\partial}{\partial x}\frac{df}{dz}(z) = \frac{d}{dz}\frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial x}(x,t) = \frac{d^2 f}{dz^2}(z) \cdot 1 = \frac{d^2 f}{dz^2}(z)$

$\frac{\partial y}{\partial t}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial t}(x,t) = \frac{df}{dz}(z) \cdot (-v) = -v \cdot \frac{df}{dz}(z)$

$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x,t) = \frac{\partial}{\partial t}\left(-v \cdot \frac{df}{dz}(z)\right) = -v \cdot \frac{\partial}{\partial t}\frac{df}{dz}(z) = -v \cdot \frac{d}{dz}\frac{df}{dz}(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial t}(x,t) = -v \cdot \frac{d^2 f}{dz^2}(z) \cdot (-v) = v^2 \frac{d^2 f}{dz^2}(z)$

$\Rightarrow \qquad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x,t) = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x,t)$

4.5 $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = - k^2 \hat{E} \sin(kx - \omega t + \varphi)$

$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = - \omega^2 \hat{E} \sin(kx - \omega t + \varphi)$

...

4.6 a) falsch

b) wahr

c) wahr

d) wahr

e) falsch

4.7 ...

...

4.14 ...

4.15 a) wahr

b) wahr

c) wahr

d) falsch

e) falsch