

Elektromagnetische Wellen

Leitprogramm von Hanno Gassmann

Inhalt:

Mit diesem Leitprogramm erarbeiten sich die Schülerinnen und Schüler die Physik von elektromagnetischen Wellen. Sie werden verstehen, wie die Nachrichtenübermittlung mit Radiowellen und wie ein Mikrowellenofen funktioniert.

Unterrichtsmethode: Leitprogramm

Das Leitprogramm ist ein Selbststudienmaterial. Es enthält alle notwendigen Unterrichtsinhalte, Übungen, Arbeitsanleitungen und Tests, die die Schüler/innen brauchen, um ohne Lehrperson lernen zu können. In einer Werkstatt wird stets etwas konstruiert. Das Ergebnis des Lernprozesses kann man sehen, lesen, anfassen, riechen, spüren oder hören. An jedem Posten finden die Lernenden schriftliche Aufträge und Lernangebote. Sie bearbeiten diese nach individuellem Tempo.

Fachliches Review:

Leonardo Degiorgi, Laboratorium für Festkörperphysik, ETH Zürich

Fachdidaktisches Review:

Wolfgang Grentz, Fachdidaktiker ETH Zürich

Publiziert auf EducETH:

17. April 2008

Rechtliches:

Die vorliegende Unterrichtseinheit darf ohne Einschränkung heruntergeladen und für Unterrichtszwecke kostenlos verwendet werden. Dabei sind auch Änderungen und Anpassungen erlaubt. Der Hinweis auf die Herkunft der Materialien (ETH Zürich, EducETH) sowie die Angabe der Autorinnen und Autoren darf aber nicht entfernt werden.

Publizieren auf EducETH?

Möchten Sie eine eigene Unterrichtseinheit auf EducETH publizieren? Auf folgender Seite finden Sie alle wichtigen Informationen: <http://www.educeth.ch/autoren>

Weitere Informationen:

Weitere Informationen zu dieser Unterrichtseinheit und zu EducETH finden Sie im Internet unter <http://www.educ.ethz.ch> oder unter <http://www.educeth.ch>.

Ein Leitprogramm zu elektromagnetischen Wellen

Physik



Abbildung 1: Heinrich-Hertz-Turm, Hamburg

Ein Leitprogramm zu elektromagnetischen Wellen

Physik

Stufe, Schulbereich: Mittelschule, Grundlagenfach

Fachliche Vorkenntnisse:

Mathematik: Vektoren, Sinusfunktion qualitativ.

Elektrizitätslehre: Ladung, elektrostatische Kraft, Strom, elektrisches Feld, magnetisches Feld.

Grundbegriffe der Wellenlehre: Amplitude, Wellenlänge, Frequenz, Wellengeschwindigkeit. Stehende Wellen (Saite) und laufende Wellen.

Bearbeitungsdauer: 8-10 Lektionen

Verfasst von:

Hanno Gassmann,
Niggitalstrasse 83
8630 Rüti
hanno.gassmann@unibas.ch

Betreuer: Wolfgang Grentz

Schulerprobung: KZO, W.Grentz; Fassung vom 15. 11. 2007,

Einführung

Um was es geht!

Fast in jedem Haushalt steht ein Mikrowellenofen, der Speisen erwärmt. Ein Radio oder ein Fernsehgerät empfängt Nachrichten von einem Sender. Überall werden Mobiltelefone benutzt. Satelliten übermitteln Daten um die Erde. Sonnenlicht scheint auf die Erde. Das sind alles Anwendungsbeispiele von **elektromagnetischen Wellen**.

Wellen kennen Sie bereits. Auch elektrische und magnetische Felder wurden im Unterricht diskutiert. Diese Felder können nun auch in Form einer Welle auftreten und zwar als **elektromagnetische Welle**.

Elektromagnetische Wellen scheinen geheimnisvoll. Abgesehen von Licht können wir sie nicht mit unseren Sinnesorganen erfassen. Sie sind aber im Experiment messbar. Elektromagnetische Wellen sind wichtig. Ihre besonderen Eigenschaften werden in unzähligen technischen Anwendungen ausgenutzt.

Inhalt des 1 Kapitels:

Hier werden Sie den nötigen Stoff zum **Thema Wellen** am anschaulichen Beispiel von Wasserwellen auffrischen. Wenn Sie die Grundeigenschaften von Wellen anhand von Wasserwellen verstanden haben, können Sie diese einfach auf die unanschauliche Situation von elektromagnetischen Wellen übertragen.

Am Schluss des Kapitels erarbeiten Sie sich eine **Übersicht** über die verschiedenen **Erscheinungsformen** von elektromagnetischen Wellen.

Inhalt des 2 Kapitels:

Sie lernen das **physikalische Modell** von elektromagnetischen Wellen kennen und können dann z.B. folgende Fragen beantworten: Wie kann sich ein gesendetes Musikstück durch das Nichts von der Radio-Sendeantenne zum Radio-Empfänger fortpflanzen? Wie funktioniert eine solche **Informationsübertragung**?

Nur diese zwei ersten Kapitel sind Pflichtstoff!

Inhalt des 3 Kapitels (Additum):

Wie funktioniert ein **Mikrowellenofen**? Wie sieht die elektromagnetische Welle darin aus? Wieso kann ein Mikrowellenofen Speisen erwärmen? Diese Fragen zum Thema Mikrowellenofen sind alltagsbezogen und sehr spannend! Das Kapitel ist freiwillig und für die Schnell-Lernerinnen gedacht.

Was Sie insgesamt erreichen:

Mit diesem Leitprogramm erarbeiten Sie sich die Physik von elektromagnetischen Wellen. Speziell werden Sie verstehen, wie die Nachrichtenübermittlung mit Radiowellen und wie ein Mikrowellenofen funktioniert.

Inhaltsverzeichnis

1 Kapitel	7
1.1 Aufrischung einiger Grundbegriffe zum Thema Wellen	8
1.2 Übersicht über die verschiedenen Wellenlängen	13
1.3 Lernkontrolle	15
1.4 Lösungen zu den Aufgaben	16
2 Kapitel	21
2.1 Die ebene em-Welle	22
2.2 Wie verhält sich die ebene em-Welle an verschiedenen Orten	28
2.3 Wie verhält sich die ebene em-Welle zu verschiedenen Zeiten	30
2.4 Informationsübertragung mit einer em-Welle	31
2.5 Lernkontrolle	37
2.6 Lösungen zu den Aufgaben	39
3 Kapitel: Additum	42
3.1 Aufbau eines Mikrowellenofens	43
3.2 Wie sieht die em-Welle im Mikrowellenofen aus?	44
3.3 Wie Verhalten sich verschiedene Materialien im Mikrowellenofen?	47
3.4 Wieso wird Speise warm im Mikrowellenofen?	48
3.5 Lernkontrolle	51
3.6 Lösungen zu den Aufgaben	52
A Kapitel-Tests für den Tutor	55
A.1 Test für Kapitel 1	55
A.2 Lösungen zum Test für Kapitel 1	56
A.3 Test für Kapitel 2	57
A.4 Lösungen zum Test für Kapitel 2	59
B Mediothek, Multimedia für die Schülerinnen und Schüler	61
C Experimentier- und anderes Material für die Lernenden	62
D Von den Autoren benutzte Quellen	63

Arbeitsanleitung für das gesamte Leitprogramm

Erklärung der Symbole

Bei diesem Zeichen sollen Sie eine **Aufgabe** rechnen oder **Fragen** beantworten. Die Lösungen und Antworten finden Sie im Lösungsteil am Ende des Kapitels.



Hier sollen Sie ein für Sie vorbereitetes **Experiment** machen. Schreiben Sie Ihre Beobachtungen auf. Versuchen Sie die Resultate des Experiments physikalisch zu erklären. Vergleichen Sie dann Ihre Erkenntnisse mit den Antworten im Lösungsteil.



Hier wird schliesslich mit einer Mitschülerin oder einem Mitschüler in einer **Zweiergruppe** gearbeitet.



Das ist das Zeichen für die **Lernkontrolle**. Mit dieser können Sie am Schluss jedes Kapitels prüfen, ob Sie bereit sind für den Kapiteltest. Die Lösungen und Antworten der Lernkontrolle finden Sie ebenfalls im Lösungsteil am Ende des Kapitels.



Abkürzung

Von jetzt an werden wir den häufig gebrauchten Begriff **elektromagnetische Welle** mit **em-Welle** abkürzen!

1 Kapitel

Übersicht

Wie Wasserwellen sich fortpflanzen, lässt sich vielerorts beobachten. Deshalb werden hier Wasserwellen zur Repetition der wichtigsten Grundbegriffe zum Thema Wellen verwendet.

Elektromagnetische Wellen, kurz em-Wellen, umfassen ein breites Gebiet der Physik. Sie erarbeiten sich im ersten Kapitel deshalb auch einen Überblick über die wichtigsten Erscheinungsformen von em-Wellen.

Lernziele von Kapitel 1

- Sie sind wieder vertraut mit den Begriffen:
Wellenlänge, Wellengeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude.
- Sie verstehen den Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Frequenz und Geschwindigkeit einer Welle. Sie können ihn formal ausdrücken und Berechnungen damit durchführen.
- Sie haben einen Überblick über die verschiedenen Wellenlängen und die dazugehörigen Erscheinungsformen von em-Wellen. Sie können mindestens fünf solche aufzählen.

1.1 Aufrischung einiger Grundbegriffe zum Thema Wellen

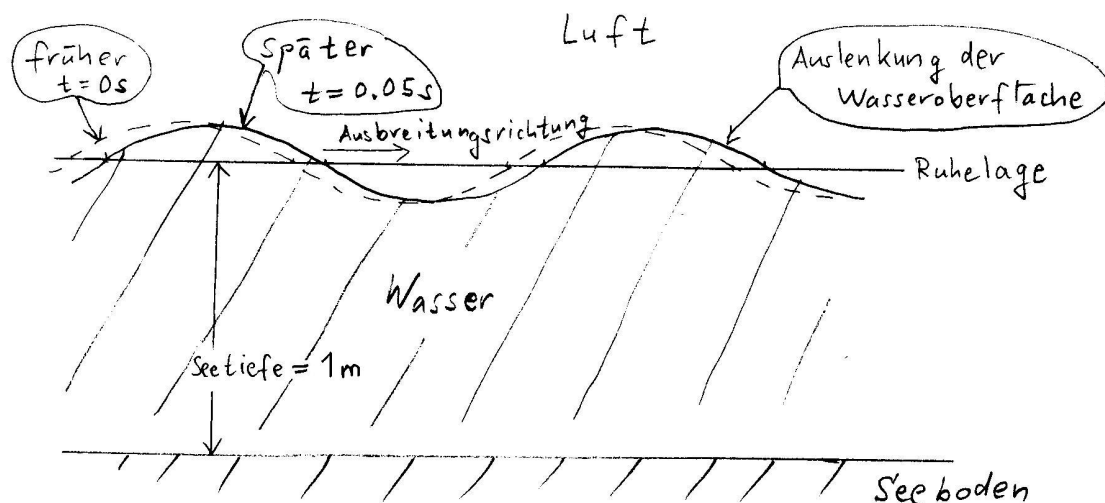
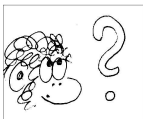


Abbildung 2:

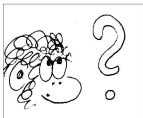
Die Abbildung 2 zeigt einen Querschnitt durch einen See. Eine Wasserwelle bewegt sich in eine Richtung, die gerade mit dem Querschnitt zusammenfällt. Diese Richtung bezeichnen wir als **Ausbreitungsrichtung** der Welle.

Die Wasserwelle ist zu einem früheren (gestrichelte Linie) und einem späteren Zeitpunkt (ausgezogene Linie) gezeichnet. In dieser Zeit legt sie eine bestimmte Strecke zurück. Die zugehörige Geschwindigkeit der Welle heisst **Wellengeschwindigkeit**. Die Auslenkung der Wasseroberfläche relativ zur Ruhelage wird als sinusförmig angenommen. Wenn wir in diesem Leitprogramm von Wellen sprechen, dann meinen wir immer sinusförmige Wellen.

Aufgabe 1.1: Wellengrößen Sie haben sicher schon Wasserwellen, wie in der Abbildung 2 gezeigt, beobachtet, sei es am Strand oder in der Badewanne. Beantworten Sie dazu die Frage: Welche physikalischen Größen müssen Sie einführen, um die Wasserwelle zu beschreiben? Die Antworten finden Sie im Lösungsteil am Ende des Kapitels!



Aufgabe 1.2: Vektor oder Skalar Weshalb muss ein Vektor eingeführt werden, um die Auslenkung des Wassers zu beschreiben? Wieso genügt eine Zahl (Skalar) zur Erfassung der Amplitude? Die Ausbreitungsrichtung der Welle ist natürlich auch ein Vektor. Wie gross ist der Winkel zwischen dem Vektor der Auslenkung und dem Vektor in Ausbreitungsrichtung? Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den Antworten im Lösungsteil am Ende des Kapitels.



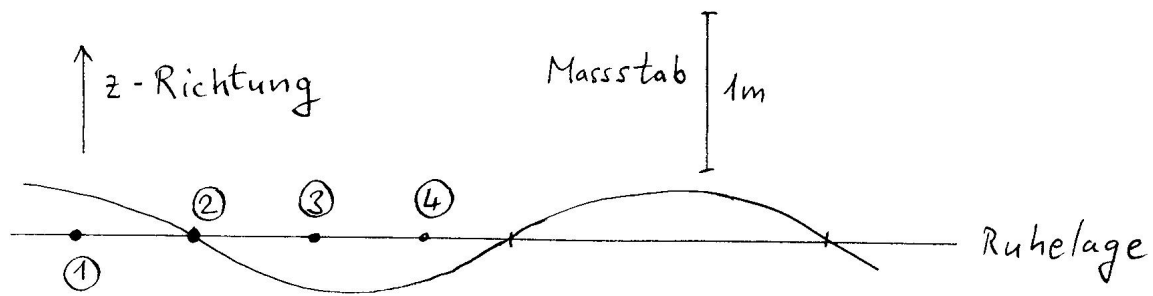
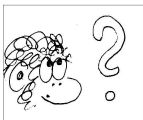


Abbildung 3:

Aufgabe 1.3: Auslenkung der Wasseroberfläche Betrachten Sie die Abbildung 3. Zeichnen Sie die Auslenkungsvektoren an den vier verschiedenen Orten ein. Bestimmen Sie die Länge der Auslenkungsvektoren an den vier verschiedenen Orten und beschreiben Sie mit Worten die Richtung des Auslenkungsvektors.



Bastelaufgabe zum Verständnis der Wellenfrequenz Schneiden Sie den Papierstreifen mit der Sinuskurve und die Papierhülle aus (Bastelbogen in Abbildung 5). Kleben Sie die Papierhülle an der mit Leim angeschriebenen Stelle zusammen. Stecken Sie dann den Papierstreifen mit der Sinuskurve in die Papierhülle mit dem Schlitz. Ziehen Sie den Papierstreifen durch die Papierhülle. Beobachten Sie nun das Verhalten der Welle an festem Ort beim dünnen Spalt in der Papierhülle. Sie sehen die Frequenz der Schwingung an einem festen Ort der Welle. Sie erinnern sich: Die Frequenz beschreibt, wie oft sich eine Schwingung pro Sekunde wiederholt. Die Einheit der Frequenz ist somit pro Sekunde $[f]=1/s=\text{Hertz}$. Heinrich Rudolf Hertz hat übrigens als erster em-Wellen experimentell nachgewiesen! Ein Photo von Heinrich Rudolf Hertz sehen Sie in der Abbildung 4. Wenn sie den Papierstreifen hingegen ohne Papierhülle einfach in Pfeilrichtung bewegen, dann sehen Sie die freie Bewegung der Welle.

Legen Sie Ihre Bastelarbeit nun zur Seite. Sie werden sie später noch einmal brauchen.

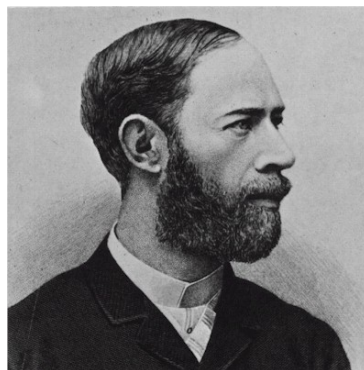
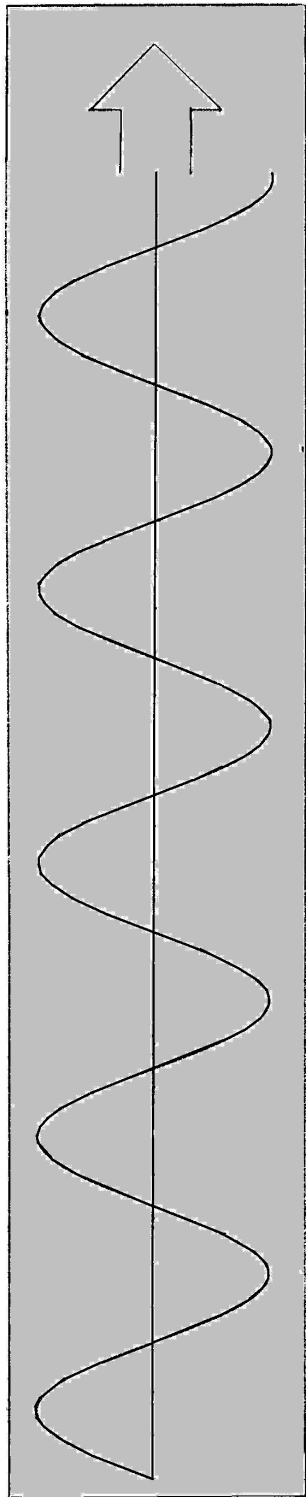
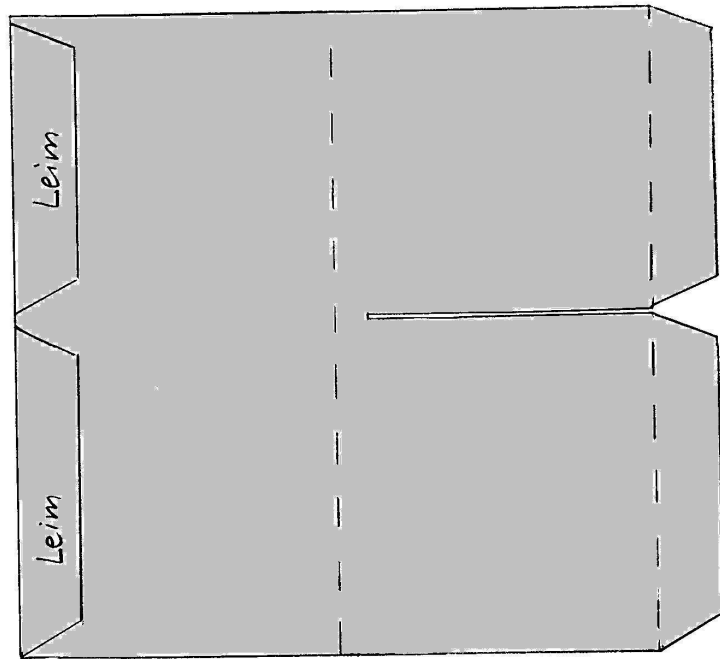


Abbildung 4: Heinrich Rudolf Hertz



Papierstreifen



Papierhülse

Abbildung 5:

Nun haben Sie die Grössen: **Wellenlänge**, **Wellengeschwindigkeit** und **Frequenz** wieder im Griff. Zwischen diesen drei Grössen gilt bekanntlich der Zusammenhang

$$\lambda \cdot f = c. \quad (1)$$

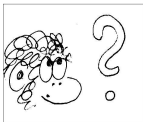
Die Frequenz f kann durch die **Periodendauer** T ausgedrückt werden mit der Beziehung $f = 1/T$. Sie erinnern sich: Die Periodendauer ist die Zeit, nach der sich eine Schwingung periodisch wiederholt. Eingesetzt ergibt sich

$$\lambda = c \cdot T. \quad (2)$$

Aufgabe 1.4: Formel einfach lernen Die obige Formel $\lambda = c \cdot T$ können Sie sich auf einfache Art merken. Überlegen Sie sich: Was ist der Zusammenhang der Formel $\lambda = c \cdot T$ mit der Ihnen aus der Mechanik bekannten Formel $s = v \cdot t$? Hinweis: Vergleichen Sie die Einheiten der verschiedenen Grössen in den beiden Formeln.



Aufgabe 1.5: Wellenlänge einer Wasserwelle Für eine Wasserwelle in seichtem Wasser betrage die Wellengeschwindigkeit 3m/s. Die Frequenz der Schwingung von Wasser an einem festen Ort sei $f = 2\text{Hz}$. Berechnen Sie die Wellenlänge λ . Haben Sie eine solche Wellenlänge schon einmal auf dem See beobachtet? Ist Ihr Resultat realistisch?



Bis jetzt haben wir noch nicht über em-Wellen gesprochen. Wenn Sie sich aber überlegen, dass eine em-Welle eigentlich nichts anderes ist als eine Welle, dann müsste man die gleiche Aufgabe auch für eine em-Welle genau so stellen und lösen können. Statt der mechanischen Auslenkung von Wasser in der Wasserwelle treten bei der em-Welle elektrische und magnetische Feldvektoren auf. Der Vergleich einer Wasserwelle und einer em-Welle ist in der Abbildung 6 gezeigt.

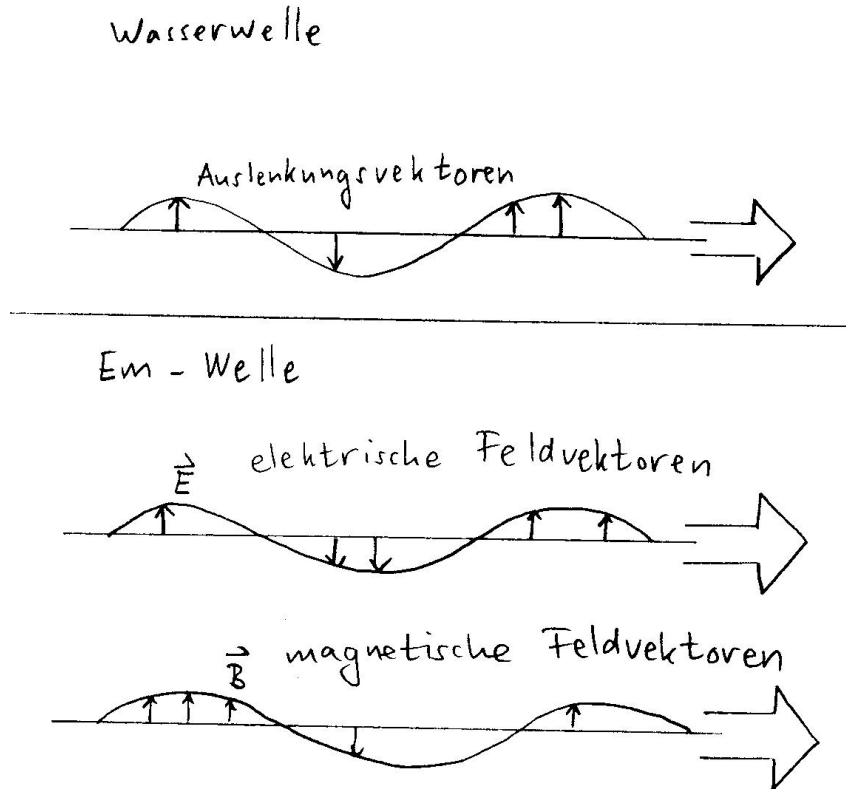


Abbildung 6:

Aufgabe 1.6: Wellenlänge einer em-Welle Für eine em-Welle ist die Wellengeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit. In Luft beträgt sie $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Die Sendefrequenz von Radio Zürisee beträgt im Zürcher Oberland 107.4 MHz. Zur Erinnerung: 1 MHz (sprich ein Megahertz) entspricht einer Million Schwingungen der Felder an einem festen Ort, also $1 \cdot 10^6 \text{ Hz}$. Berechnen Sie die Wellenlänge. Überlegen Sie sich, ob Ihr Resultat realistisch ist, bevor Sie es mit der Lösung vergleichen. Das können Sie wie folgt tun: Damit Ihr Radio die em-Welle optimal empfängt, sollte die Länge der Empfangsantenne eine Länge haben, die der halben Wellenlänge oder einem Viertel der Wellenlänge entspricht. Radioempfangsantennen zum Vergleich gibt es in der Physiksammlung.



Nun haben Sie bereits eine Aufgabe zu em-Wellen lösen können. Dies haben Sie dank dem Vergleich mit einer anschaulichen Wasserwelle geschafft. Als Physikerin oder Physiker ist es sinnvoll und üblich, anschauliche Situationen auf andere Erscheinungen zu übertragen. Das Arbeiten mit einfachen Vergleichen und Modellen ist wichtig!

1.2 Übersicht über die verschiedenen Wellenlängen

Haben Sie gewusst, dass das Telefonieren mit dem Mobiltelefon, die Energieübertragung über die Fahrleitung eines Zuges, der Radioempfang und radioaktive Gammastrahlung mit demselben Modell der em-Wellen erfasst werden kann? Em-Wellen haben verschiedene Erscheinungsformen! Was ist der Unterschied zwischen der em-Welle des Radios und der Gammastrahlung? Sie werden sehen, dass die Unterschiede in der **Wellenlänge** der em-Welle zu finden sind. Eine Übersicht über die verschiedenen Wellenlängen und den zugehörigen Erscheinungsformen stellt man am besten mit einem Spektrum dar. Den wichtigen Begriff Spektrum werden wir kurz anhand des sichtbaren Lichts erklären.



Abbildung 7: James Clerk Maxwell

Spektrum

Ein Regenbogen ist aus verschiedenen Farben zusammengesetzt. Der Physiker James Clerk Maxwell, siehe Abbildung 7, konnte im 19. Jahrhundert zeigen, dass Licht auch eine em-Welle ist. Die verschiedenen Farben entsprechen verschiedenen Wellenlängen des Lichts. Die Wellenlängen liegen im Bereich von 380nm bis 780nm. Die Abbildung 8 zeigt die Farbanteile des sichtbaren Lichts nach den Wellenlängen geordnet. Ein solches Aufteilen des sichtbaren Lichts in seine Farbanteile wird als **Spektrum** des sichtbaren Lichts bezeichnet.

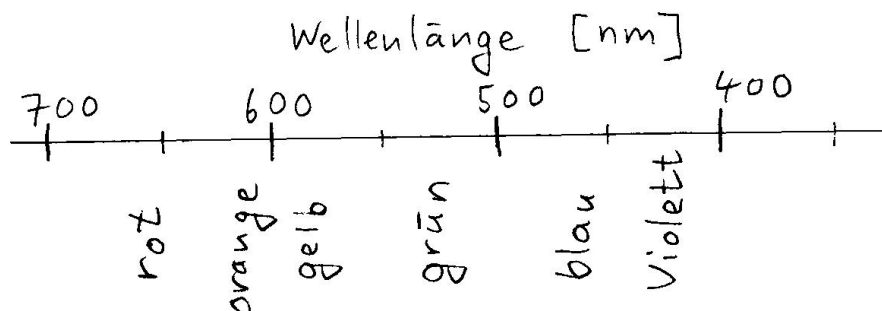


Abbildung 8: Das Spektrum des sichtbaren Lichts

Aufgabe 1.7: Das elektromagnetische Spektrum Wie oben bereits erwähnt, erfassen em-Wellen aber einen viel grösseren Wellenlängenbereich als Licht. Recherchieren Sie in den Physikbüchern der Mediothek oder im Internet, welche Wellenlängenbereiche es gibt. Wie gross ist die Wellenlänge meines Mobiltelefons? Wie gross ist die Wellenlänge für die Fahrleitung eines Zuges? Und wie gross ist die Wellenlänge im Mikrowellenofen?



Machen Sie dann eine Tabelle, in der Sie die gefundenen Resultate wie untenstehend gezeigt zusammenfassen. Erwartet werden mindestens **acht** Wellenlängenbereiche. Achtung: Bei der Suche werden Sie auf viele neue Begriffe stossen. Notieren Sie diese trotzdem. Einiges zu ihrer Bedeutung werden Sie später besser verstehen können. Jetzt geht es nicht darum, alle Einzelheiten zu begreifen, sondern darum, eine Übersicht zu gewinnen.

Bezeichnung	Wellenlänge	Technische Anwendung
Radiowellen	1m bis 10 km	Rundfunk
...
...

Von jetzt an bis zum Ende des Leitprogramms beschränken wir uns auf zwei Wellenlängenbereiche: **Radiowellen** und **Mikrowellen**.

Schreiben Sie sich die zugehörigen Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche noch einmal auf ein Blatt Papier!

1.3 Lernkontrolle

Mit der Lernkontrolle können Sie prüfen, ob Sie das Kapitel beherrschen. Wenn Sie 3 der 4 Aufgaben richtig lösen können, dann sind die Grundlagen für das nächste Kapitel erarbeitet. Sie können sich dann beim Tutor zum Kapiteltest melden.



Aufgabe 1.8: Amplitude oder Auslenkungsvektor? Erklären Sie mit zwei Sätzen den Unterschied zwischen den Begriffen: Amplitude und Auslenkungsvektor.

Aufgabe 1.9: Wellenlänge bestimmen Betrachten Sie noch einmal die Abbildung 2. Sie zeigt eine Wasserwelle zu zwei verschiedenen Zeitpunkten.

- Zeichnen Sie den Weg ein, den die Welle in 0.05 s zurücklegt. Bestimmen Sie aus Weg und Zeit die Wellengeschwindigkeit.
- Bestimmen Sie mit Hilfe der Abbildung die Wellenlänge der Welle.

Aufgabe 1.10: Wellenlänge und Frequenz Damit Sie die Wellenlänge und die Frequenz einer Welle sehen können, brauchen Sie zwei verschiedene Betrachtungsweisen. Welche zwei sind das? Die Wellenlänge und die Frequenz sind bei einer Welle trotzdem miteinander verknüpft. Wie?

Aufgabe 1.11: Das elektromagnetische Spektrum In dieser Aufgabe geht es darum, das elektromagnetische Spektrum graphisch darzustellen. Ordnen Sie die Erscheinungsformen von em-Wellen entlang der in Abbildung 9 gezeigten Achse. Ergänzen Sie zuerst die fehlenden 10er Potenzen entlang der Wellenlängen-Achse. Tragen Sie dann die Erscheinungsformen bei den entsprechenden Wellenlängenbereichen ein. Begrenzen Sie die Bereiche mit senkrechten Strichen bei der richtigen Wellenlänge.

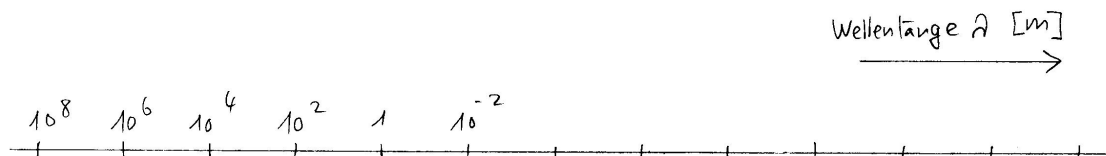


Abbildung 9:

1.4 Lösungen zu den Aufgaben

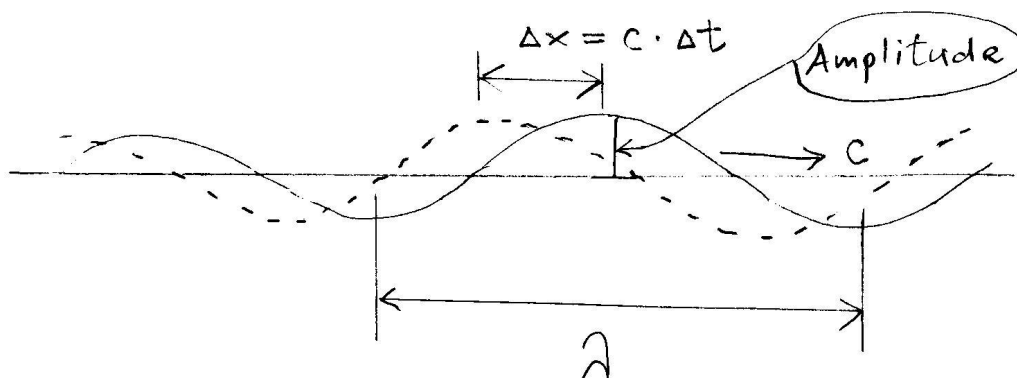


Abbildung 10:

Lösung der Aufgabe 1.1: Wellengrößen Notwendig zur Beschreibung einer Wasserwelle sind die Amplitude, die Wellenlänge und die Wellengeschwindigkeit, siehe Abbildung 10. Die Amplitude beschreibt die grösstmögliche Auslenkung der Welle. Alltagssprachlich gibt die Amplitude an, wie hoch die Welle ist. Die Wellenlänge λ beschreibt den Abstand zwischen zwei Wellenbergen einer sinusförmigen Welle. Schliesslich beschreibt die Wellengeschwindigkeit c , wie schnell sich die Welle fortbewegt.

Lösung der Aufgabe 1.2: Vektor oder Skalar Die Wasserwelle wird an manchen Orten nach oben, anderswo nach unten ausgelenkt. Das sind zwei verschiedene Richtungen. Die Auslenkung ist eine gerichtete Grösse. Deshalb muss ein Vektor zur Beschreibung eingeführt werden. Die Amplitude beschreibt die grösstmögliche Auslenkung der Welle. Offensichtlich genügt eine Zahl, um diese zu erfassen. In einer Wasserwelle steht der Auslenkungsvektor immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Der Winkel beträgt somit 90° .

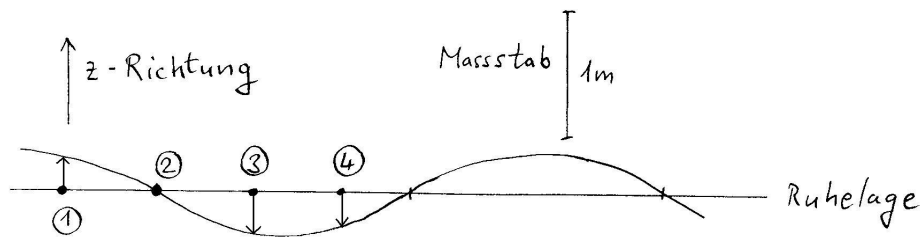


Abbildung 11:

Lösung der Aufgabe 1.3: Auslenkung der Wasseroberfläche Die Abbildung 11 zeigt die richtig eingezeichneten Auslenkungsvektoren an den vier verschiedenen Orten. Die folgende Tabelle fasst die Länge und die Richtung der Auslenkungsvektoren zusammen.

Ort	Länge	Richtung
1	0.25m	nach oben, positive z -Richtung
2	0m	keine Richtung
3	0.325m	nach unten, negative z -Richtung
4	0.25m	nach unten, z -Richtung

Lösung der Aufgabe 1.4: Formel einfach lernen Diese Formel können Sie einfach wie $s = v \cdot t$ lesen. Die Welle legt in der Zeit T mit der Wellengeschwindigkeit c die Strecke einer Wellenlänge λ zurück. Die Wellenlänge λ entspricht der Strecke s . Die Wellengeschwindigkeit c entspricht der Geschwindigkeit v . Die Periodendauer T entspricht der Zeit t .

Lösung der Aufgabe 1.5: Wellenlänge einer Wasserwelle Die Aufgabe ist eine Anwendung der Formel $\lambda \cdot f = c$. Gegeben ist die Wellengeschwindigkeit $c = 3\text{m/s}$ und die Frequenz $f = 2\text{Hz}$. Für die Wellenlänge erhalten wir deshalb

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\text{m/s}}{2\text{Hz}} = \frac{3\text{m/s}}{2/\text{s}} = \frac{3}{2}\text{m} = 1.5\text{m}.$$

Die Wellenlänge ist realistisch. Sie haben sicher schon eine Wasserwelle beobachtet auf dem See, bei der die Wellenberge einen Abstand von 1.5m hatten.

Lösung der Aufgabe 1.6: Wellenlänge einer em-Welle Die Aufgabe ist noch einmal eine Anwendung der Formel $\lambda \cdot f = c$. Die Formel gilt allgemein für Wellen. Es ist daher egal, ob es sich um Wasserwellen oder um em-Wellen handelt. Gegeben ist die Wellengeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8\text{m/s}$ und die Frequenz $f = 107.4\text{MHz} = 107.4 \cdot 10^6\text{Hz} = 1.074 \cdot 10^8\text{Hz}$. Für die Wellenlänge erhalten wir deshalb

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8\text{m/s}}{1.074 \cdot 10^8\text{Hz}} = \frac{3 \cdot 10^8\text{m/s}}{1.074 \cdot 10^8/\text{s}} \approx 2.7932\text{m} \approx 2.8\text{m}.$$

Für eine Radioempfangsantenne wäre ein Viertel der Wellenlänge $2.8\text{m}/4 = 0.7\text{m}$. Das ist ein realistischer Wert.

Lösung der Aufgabe 1.7: Maxwell's Regenbogen

Die Wellenlänge eines Mobiltelefons beträgt typischerweise $0.15\text{m}=15\text{cm}$.

Die Wellenlänge der Fahrleitung eines Zuges beträgt etwa $19'000\text{km}$, berechnet aus der Frequenz 16Hz .

Die Wellenlänge im Mikrowellenofen beträgt etwa $0.12\text{m}=12\text{cm}$.

Bezeichnung	Wellenlänge	Technische Anwendung
Niederfrequenz	$> 10 \text{ km}$	Funknavigation
Radiowellen	1m bis 10km	Rundfunk
Mikrowellen	1mm bis 1m	Radar Mikrowellenofen
Terahertzstrahlung	$30 \mu\text{m}$ bis 3 mm	Radioastronomie Spektroskopie
Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung)	$2.5\mu\text{m}$ bis 1.0mm	IR-Spektrometer Infrarotastronomie
Licht	380nm bis 780nm	Beleuchtung
UV-Strahlen	1nm bis 380 nm	Desinfektion, UV-Licht
Röntgenstrahlen	10pm bis 1nm	medizinische Diagnostik Röntgen-Strukturanalyse
Gammastrahlen	$<10\text{pm}$	

Lösung der Aufgabe 1.8: Amplitude oder Auslenkungsvektor? Der

Auslenkungsvektor beschreibt die Auslenkung der Wellen an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit (Richtung und Länge). Die Amplitude hingegen gibt die grösstmögliche Auslenkung an und wird mit einer Zahl angegeben.

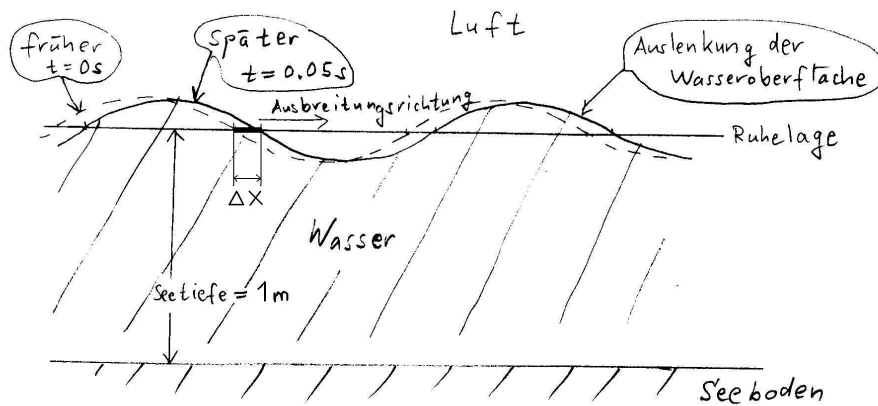


Abbildung 12:

Lösung der Aufgabe 1.9: Wellenlänge bestimmen

- a) Die Wasserwelle ist in Abbildung 12 zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gezeigt: gestrichelte Linie und ausgezogene Linie. Die Zeitdifferenz zwischen diesen beiden Momentaufnahmen ist $\Delta t = 0.05\text{s}$. In dieser Zeit legt die Welle eine Strecke von $\Delta x = (1/8)\text{m}$ zurück. Die Strecke Δx können Sie, wie in Abbildung 12 gezeigt, einzeichnen und ausmessen. Den Massstab ist mit der Seetiefe, die 1m beträgt, gegeben. Daraus finden wir die Wellengeschwindigkeit

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(1/8)\text{m}}{0.05\text{s}} = \frac{20\text{ m}}{8\text{ s}} = 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

- b) Die Wellenlänge lässt sich auch aus der Abbildung herausmessen. Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Orten mit gleicher Auslenkung. Für das Ausmessen der Wellenlänge wählen Sie am einfachsten die Schnittpunkte der Sinuskurve mit der Geraden, die die Ruhelage der Welle kennzeichnet. Diese Schnittpunkte sind Orte, an denen die Welle zum Zeitpunkt $t = 0.05\text{s}$ keine Auslenkung hat. Die Wellenlänge ist $3/2$ mal so gross wie die Seetiefe, also $(3/2) \cdot 1\text{m} = 1.5\text{m}$.

Lösung der Aufgabe 1.10: Wellenlänge und Frequenz

Die Wellenlänge ist ersichtlich für feste Zeiten. Anders ausgedrückt: Um die Wellenlänge zu bestimmen, braucht es eine Momentaufnahme. Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Wellenbergen.

Die Frequenz der Welle wird an festen Orten der Welle sichtbar. Dort tritt eine Schwingung des Auslenkungsvektors auf.

Trotz dieser zwei unterschiedlichen Betrachtungsweisen sind die Wellenlänge und die Frequenz bei einer Welle miteinander verknüpft. Die Welle legt während der Periodendauer T die Strecke einer Wellenlänge λ zurück mit der Wellengeschwindigkeit c . Somit gilt $\lambda = c \cdot T$. Weiter ist die Periodendauer gegeben bei $T = 1/f$. Das ergibt eingesetzt

$$\lambda = c \cdot T = c \cdot \frac{1}{f} = \frac{c}{f}.$$

Daraus folgt nach c aufgelöst

$$c = \lambda \cdot f.$$

Die Frequenz mal die Wellenlänge ist konstant gleich der Wellengeschwindigkeit. So sind die beiden Größen miteinander verknüpft.

Lösung der Aufgabe 1.11: Das elektromagnetische Spektrum Die Abbildung 13 zeigt das elektromagnetische Spektrum.

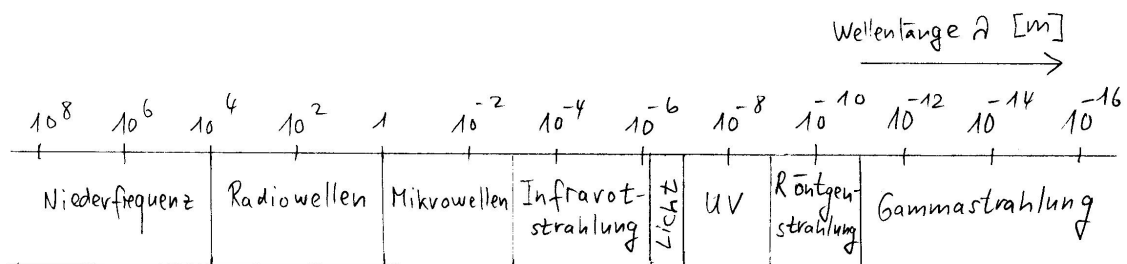


Abbildung 13:

2 Kapitel

Übersicht

Sie haben alle schon oft mit einem Radio Nachrichten oder ein Musikstück empfangen. Auch der Gebrauch eines Mobiltelefons ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Zwischen Sendeantenne und Radioempfänger werden Worte, Musik (oder allgemeiner: Information), durch das Nichts transportiert. Wie ist das physikalisch möglich? Trotz ihrer Alltäglichkeit sind uns diese Dinge fremd. Das ist ein guter Grund sich Fragen folgender Art zu stellen: Was ist das Geheimnis zwischen Sender und Empfänger? Wie geht Information vom Sender zum Empfänger?

Lernziele von Kapitel 2

- Sie können einer anderen Person eine ebene em-Welle erklären: Sie kennen die Anordnung der Feldvektoren an verschiedenen Orten zu einer festen Zeit. Sie kennen das Verhalten der Feldvektoren an einem festen Ort zu verschiedenen Zeiten.
- An einem festen Ort der em-Welle hängt die Länge des elektrischen Feldvektors E von der Länge des magnetischen Feldvektors B ab und umgekehrt. Hier lernen Sie eine Formel kennen, mit der Sie E ausrechnen können, wenn Sie B kennen und umgekehrt.
- Sie wissen wie in einer em-Welle Information übertragen wird.

2.1 Die ebene em-Welle

Was eine laufende Wasserwelle ist, haben Sie im ersten Kapitel ausführlich repetiert: In einer laufenden Welle wird das ganze Wellenbild entlang der Ausbreitungsrichtung mit der Wellengeschwindigkeit verschoben. Bei em-Wellen treten Feldvektoren anstelle der Auslenkungsvektoren bei Wasserwellen auf. Siehe dazu die untenstehende Abbildung 14.

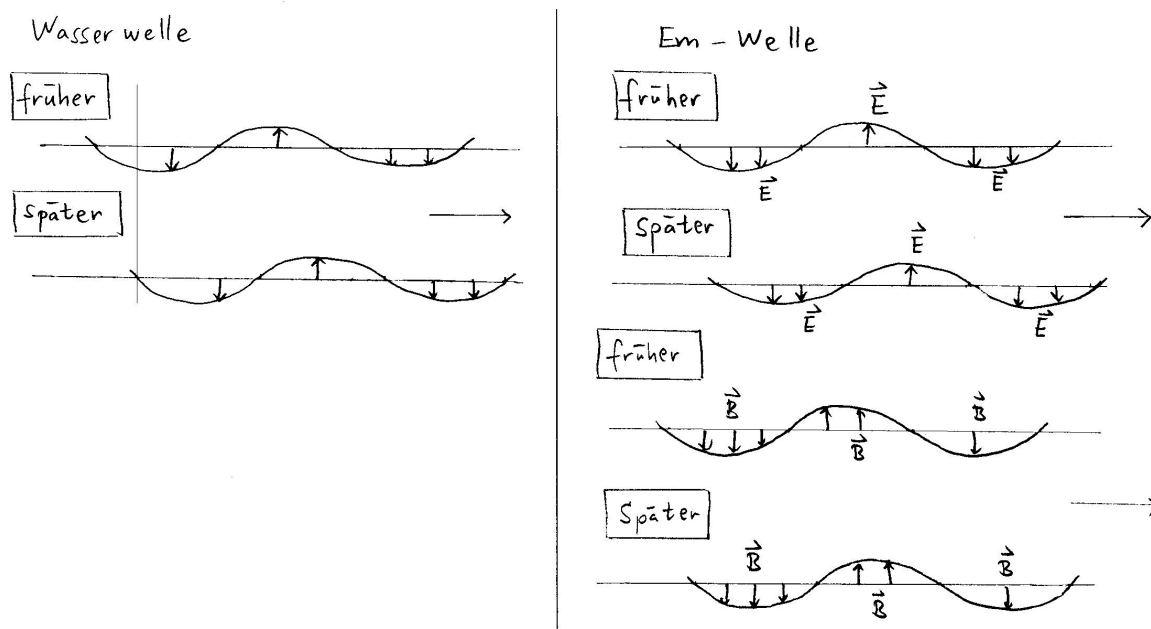


Abbildung 14:

Nun stellt sich die Frage, wie in einer ebenen em-Welle die elektrischen und die magnetischen Feldvektoren zueinander angeordnet sind. Die Antwort gibt die Abbildung 15. In einer ebenen em-Welle stehen die elektrischen und magnetischen Sinuskurven senkrecht zueinander.

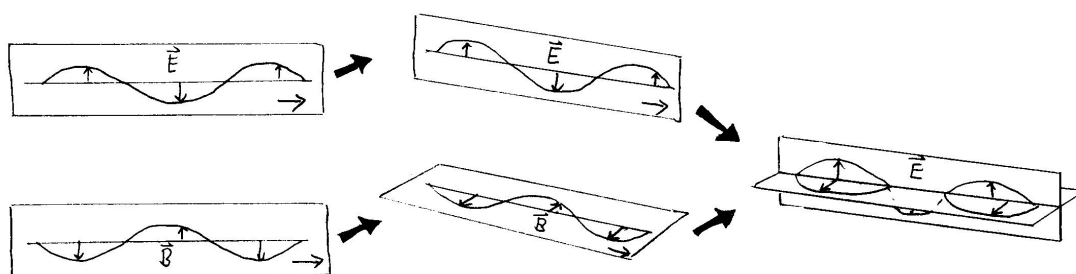


Abbildung 15:

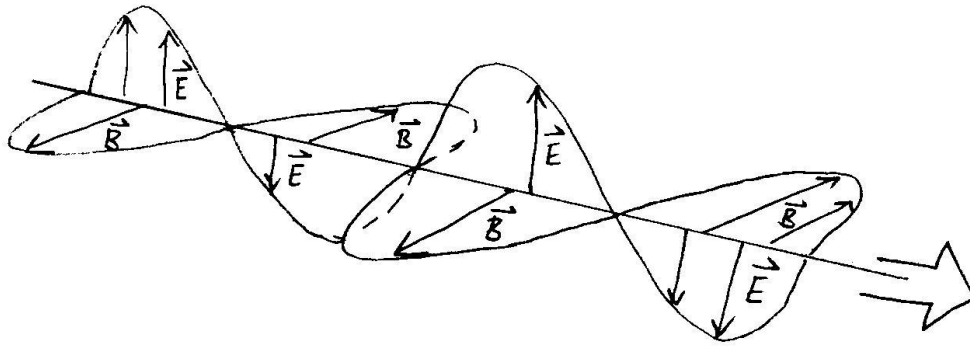


Abbildung 16:

Die Abbildung 16 zeigt noch einmal vergrößert eine **ebene em-Welle** zu einem festen Zeitpunkt. Daraus ersehen Sie, wie die Feldvektoren entlang einer Linie in Ausbreitungsrichtung angeordnet sind. Die Welle breitet sich in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung aus. Die Wellengeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Bemerkung: Die ebene Welle ist wichtig, um die Funktionsweise des Radios zu verstehen. Die em-Welle zwischen Sendeantenne (Abbildung 1, Titelblatt) und Empfangsantenne ist eine ebene em-Welle!

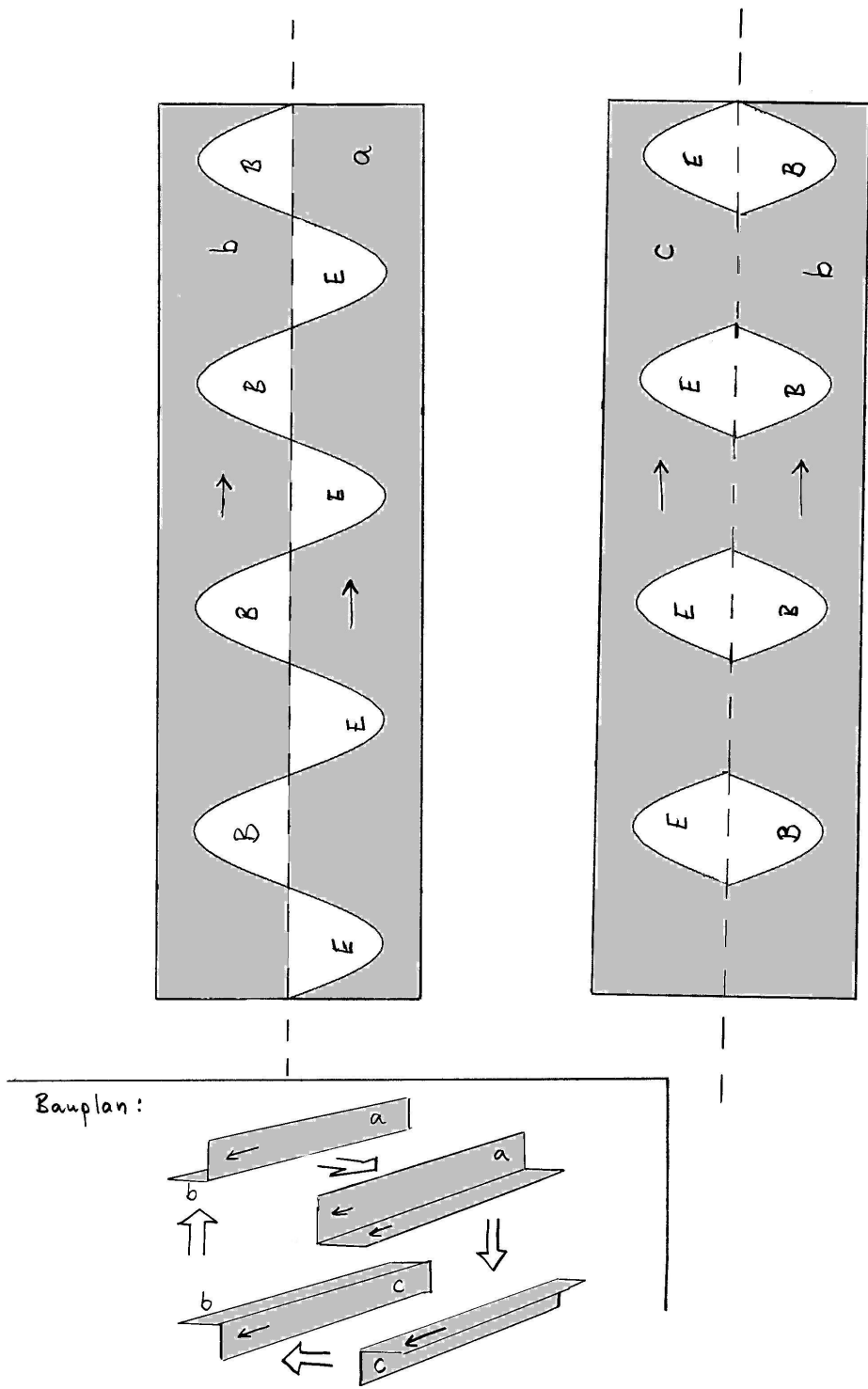
Wenn Sie sich die räumliche Anordnung in der Abbildung 16 noch nicht vorstellen können, macht das nichts. Mit der nächsten Bastelaufgabe erhalten Sie den Durchblick!

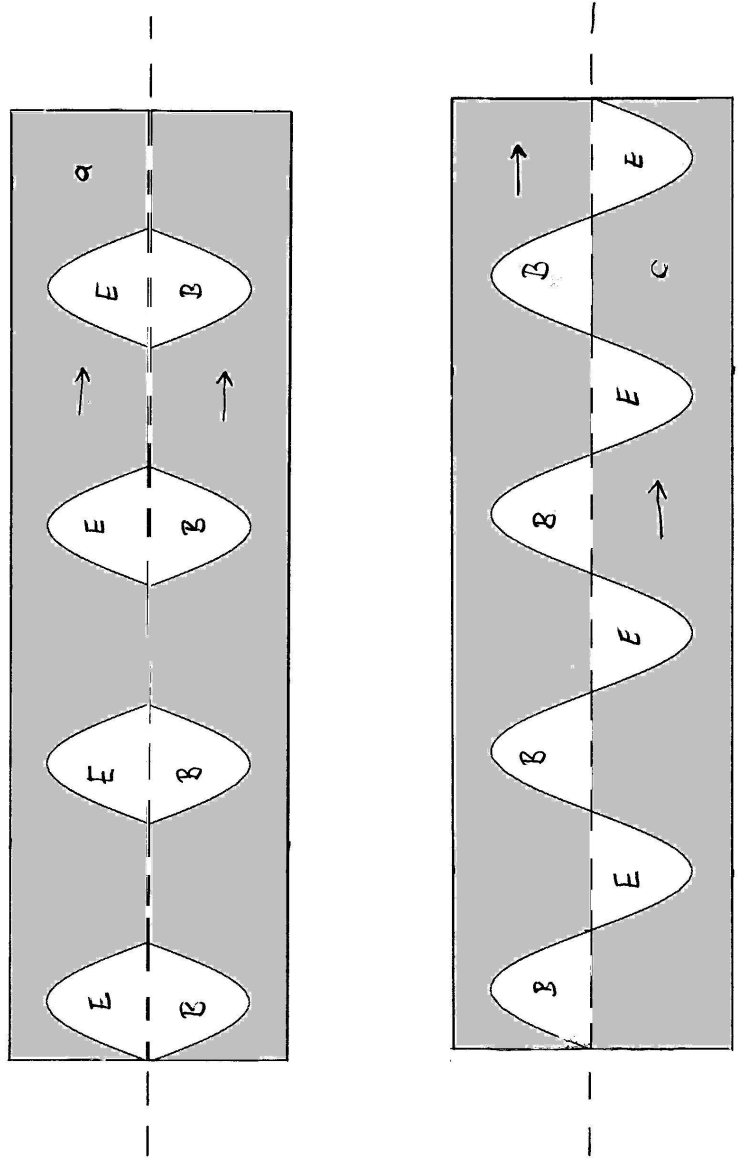
Bastelaufgabe: Felder einer ebenen sinusförmigen em-Welle entlang einer Linie in Ausbreitungsrichtung Auf den folgenden Seiten sehen Sie in den Abbildungen 17 und 18 einen Bastelbogen. Bevor Sie mit dem Ausschneiden beginnen, malen Sie die mit E bezeichneten weissen Felder rot und die mit B bezeichneten weissen Felder blau aus. Schneiden Sie den Bastelbogen aus und leimen Sie das Modell gemäss Bauplan zusammen.

Das Modell zeigt Ihnen, wie die Felder in einer ebenen, sinusförmigen em-Welle angeordnet sind. Messen Sie die Wellenlänge aus. Haben Sie 3cm gemessen? Wenn nicht, dann blättern Sie vor zu Abbildung 24. Dort sehen Sie, welche Länge Sie ausmessen müssen! Bewegen Sie das Modell im Raum. Versuchen Sie sich die Bewegung der em-Welle im Raum vorzustellen. Sie bewegt sich entlang der Mittellinie des kreuzförmigen Modells. Die roten Flächen des Modells entsprechen natürlich den elektrischen Feldern und die blauen dem magnetischen Feld. Die Feldvektoren stehen dabei senkrecht auf der Linie und haben eine Länge, die durch den Abstand von der Linie zur Sinuskurve bestimmt ist.

Aufgabe 2.1: Wichtige Eigenschaften der em-Welle Nehmen Sie Ihr Modell zur Hand und beantworten Sie die folgenden vier Fragen. Wie gross ist der Winkel zwischen den elektrischen und magnetischen Feldvektoren an einem Ort? Wie gross ist der Winkel zwischen den elektrischen und magnetischen Feldvektoren zur Ausbreitungsrichtung? Untersuchen Sie jetzt die Orte, an denen die elektrischen und magnetischen Feldvektoren ihre grösste Länge haben. Sind die Orte verschieden? Untersuchen Sie jetzt die Feldvektoren an allen Orten auf der Mittellinie des Modells. Sind die Längen der elektrischen und der magnetischen Feldvektoren unabhängig voneinander?







Vier wichtige Eigenschaften einer ebenen em-Welle noch einmal zusammengefasst:

- (1) Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren stehen überall senkrecht aufeinander.
- (2) Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der em-Welle.
- (3) An Orten, wo der elektrische Feldvektor einen maximalen Betrag hat, hat auch der magnetische Feldvektor einen maximalen Betrag.
- (4) Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren einer em-Welle an gleichen Orten sind nicht unabhängig voneinander! Sie nehmen entlang der Linie miteinander zu und wieder ab.

Die Eigenschaft 4 (Abhängigkeit der Feldvektoren in einer em-Welle an einem festen Ort), kann auch durch die Formel

$$\frac{E}{B} = c \quad (3)$$

ausgedrückt werden. Dabei ist E die Länge des elektrischen Feldvektors, B die Länge des magnetischen Feldvektors und c die Lichtgeschwindigkeit.

Beispielaufgabe Gegeben sind die elektrischen Felder E von drei Alltagsbeispielen (grösst mögliche Werte).

- 1) Sonnenlicht (Erdoberfläche): $E \approx 1000\text{V/m}$
- 2) Radiosender (Leistung 100kW) in 1km Entfernung: $E \approx 2.5\text{V/m}$
- 3) Mikrowellenofen: $E \approx 5000\text{V/m}$

Wie gross ist das magnetische Feld B am selben Ort, wo diese elektrischen Feldstärken gemessen wurden?

Lösung Die Formel in Gleichung 3 ergibt nach B aufgelöst für Sonnenlicht

$$B = \frac{E}{c} = \frac{1 \cdot 10^3\text{V/m}}{3 \cdot 10^8\text{m/s}} = 3.3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 3.3 \cdot 10^{-6}\text{T} = 3.3\mu\text{T}.$$

Für die em-Welle des Radiosenders finden wir auf gleichem Wege $B \approx 8.3 \cdot 10^{-9}\text{T}$. Für die em-Welle des Mikrowellenofens erhalten wir $B \approx 1.7 \cdot 10^{-5}\text{T}$.

Regel: Wenn Sie die Länge E des elektrischen Feldvektors an einem Ort kennen, dann können Sie sofort die Länge B des magnetischen Feldvektors ausrechnen, und umgekehrt.

2.2 Wie verhält sich die ebene em-Welle an verschiedenen Orten

Sie wissen nun, wie die elektrischen und magnetischen Feldvektoren in einer ebenen em-Welle entlang einer Linie in Ausbreitungsrichtung angeordnet sind. Nehmen Sie nun an, diese em-Welle würde zum Beispiel ein Volumen von einem Kubikmeter ausfüllen. Wie wäre dann das Verhalten des elektrischen und des magnetischen Feldes in anderen Raumpunkten? Wir setzen dabei voraus, dass die em-Welle nirgendwo abgeschwächt wird. Die Antwort auf diese Frage folgt aus der Abbildung 19.

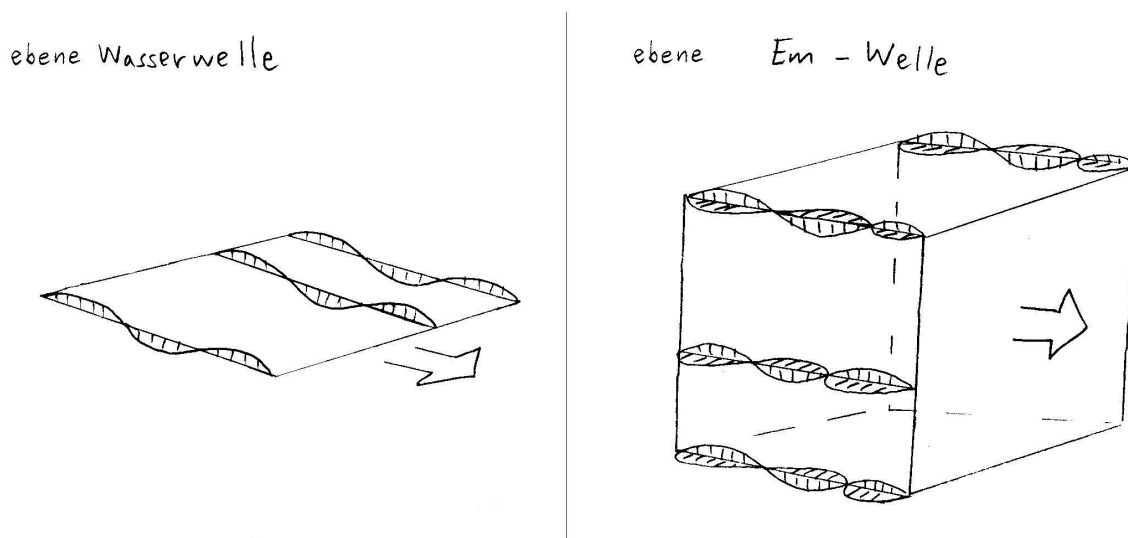


Abbildung 19:

Bei der ebenen Wasserwelle (Abbildung 19 links) verändert sich das Wellenbild nicht, wenn die Sinuskurve parallel zur Ausbreitungsrichtung entlang der Wasseroberfläche verschoben wird. Bei einer ebenen em-Welle ist es etwas anders. Die em-Welle füllt den ganzen Raum aus. Sie können die sinusförmige Feldverteilung (die vorherige Bastelarbeit) nach oben und nach unten parallel zur Ausbreitungsrichtung verschieben gemäss Abbildung 19 (rechte Seite). Aus der Verteilung entlang einer Linie können Sie sich den Rest der Feldvektoren konstruieren !

Der grosse Pfeil in der Abbildung 19 gibt jeweils die Ausbreitungsrichtung der gesamten Welle an.

Schauen Sie sich nun die Abbildung 20 an: In Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sind die elektrischen Feldvektoren in jedem Punkt der Ebene gleich gerichtet und gleich lang. Dasselbe gilt auch für die magnetischen Feldvektoren: Daher kommt auch der Name: **ebene** em-Welle!

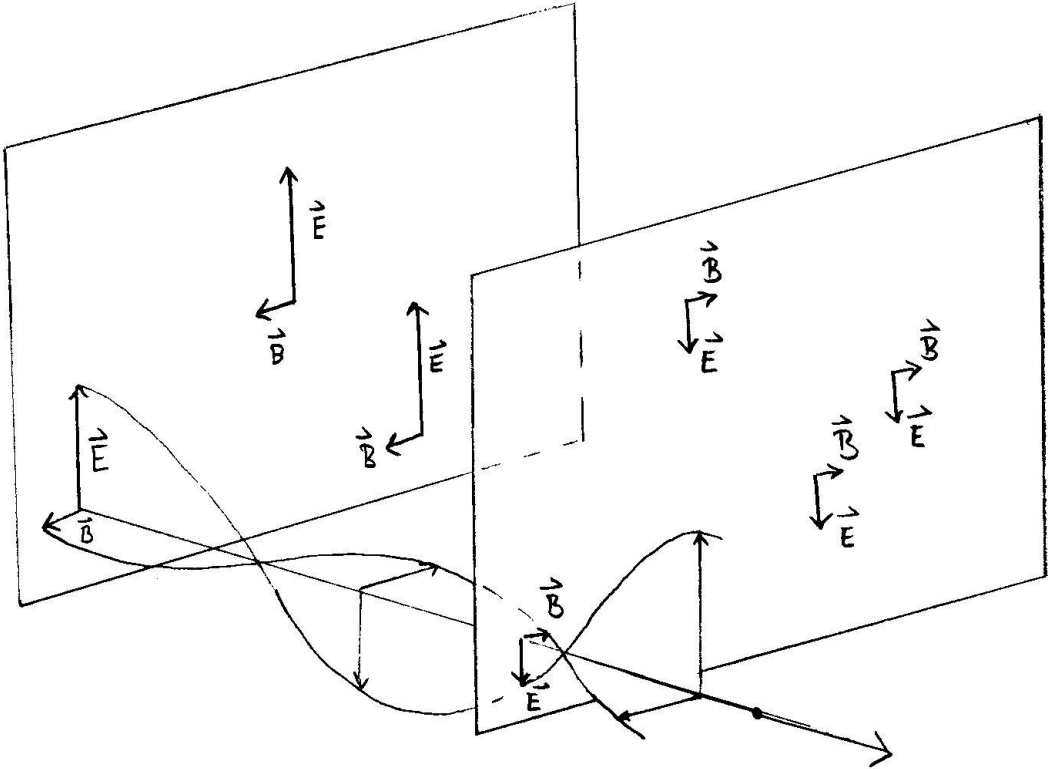


Abbildung 20:

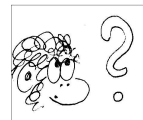
2.3 Wie verhält sich die ebene em-Welle zu verschiedenen Zeiten

Sie haben jetzt eine gute Vorstellung davon, wie eine ebene em-Welle aussieht und wie sie sich fortpflanzt. Können Sie sich aber auch vorstellen, was mit einem Feldvektor an einem festen Ort passiert, während sich die em-Welle fortbewegt?

Das untersuchen wir mit der folgenden Aufgabe. Ein magnetischer Feldvektor zeigt übrigens das gleiche Verhalten.

Aufgabe 2.2: Das elektrische Feld der ebenen em-Welle an einem festen Ort

Nehmen Sie wieder die Bastelarbeit aus dem ersten Kapitel zur Hand, den beweglichen Sinuszug in der Papierhülle. Zeichnen Sie nun elektrische Feldvektoren auf den Papierstreifen mit der Sinuskurve. Die Feldvektoren sind natürlich die, die bei der Linie gemessen würden. Ihre Länge ist jeweils der Abstand zwischen der Linie und der Sinuskurve. Ziehen Sie den Papierstreifen durch die Papierhülle. Beschreiben Sie dann wie sich das elektrische Feld einer em-Welle an einem festen Ort verhält. Wie schnell müssten Sie das Papier durch die Papierhülle ziehen, damit es einer wirklichen em-Welle entspräche?



Das zeitliche Verhalten der Feldvektoren an einem festen Ort einer ebenen em-Welle lässt sich also wie folgt zusammenfassen:

Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren führen an festen Orten ein sinusförmige Schwingung aus mit der Frequenz f . Die Periodendauer der Schwingung ist $T = 1/f$.

2.4 Informationsübertragung mit einer em-Welle

Als Einstieg schauen wir uns zwei Möglichkeiten der Übertragung von Information gemäss der folgenden Abbildung 21 an.

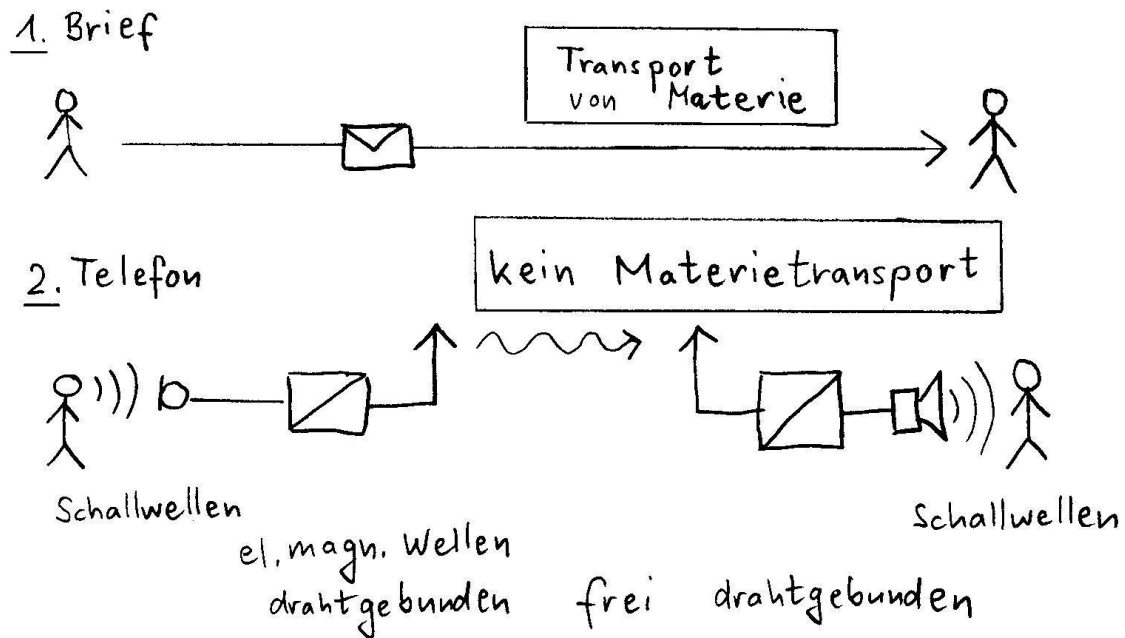


Abbildung 21:

Das Teilchen (hier ein Brief) und die Welle (hier Schallwellen und elektromagnetische Wellen) sind zwei fundamentale Konzepte der klassischen Physik:

- (1) **Teilchen:** Materiekonzentration, Transport von Masse (hier im Beispiel der Transport eines Briefs)
- (2) **Welle:** Energieverteilung, die den ganzen Raum ausfüllt. Die Energie wird in der Bewegung der Feldvektoren transportiert und es findet kein Transport von Masse statt.

Wenn Sie am Seeufer sitzen und sich eine Wasserwelle auf Sie zubewegt, dann haben Sie das Gefühl, die Wasserwelle transportiere trotzdem Masse (Wasser). Diese Sicht ist falsch und das werden wir nun kurz erklären.

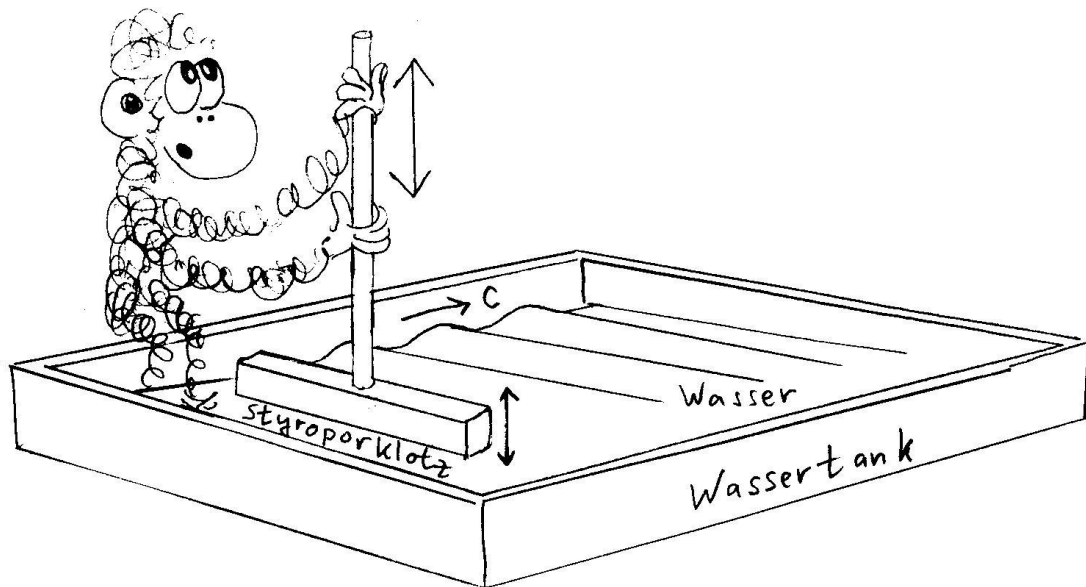


Abbildung 22:

Experiment mit Wasserwelle Benutzen Sie jetzt den vorbereiteten Wassertank für ein kurzes Experiment. Eine Skizze dieses Experiments sehen Sie in der Abbildung 22. Erzeugen Sie eine sinusförmige Welle mit dem Balken. Werfen Sie dann die bereitgelegten Pflanzensamen ins Wasser. Beobachten Sie das Verhalten der schwimmenden Pflanzensamen, während sich die Wasserwelle ausbreitet. Im Lösungsteil am Schluss des Kapitels finden Sie eine Antwort zum Vergleich.



Weshalb wir soviel über Wasserwellen reden

Vielleicht fragen Sie sich, wieso in diesem Leitprogramm so viel über Wasserwellen geschrieben wird, anstatt über em-Wellen. Ist das nötig? Wir denken schon! Eine Wasserwelle können Sie sich gut vorstellen. Trotzdem war es Ihnen vielleicht nicht auf Anhieb klar, dass die Information oder Energie, die die Wasserwelle mit sich bringt, nur in der Auslenkung übertragen wird. Was sich in einer Wasserwelle fortpflanzt, ist nicht Wasser in der Ausbreitungsrichtung, sondern die Auslenkung der Wasserteilchen. Die Auslenkung nach oben und nach unten haben wir durch den Auslenkungsvektor erfasst. Wir könnten deshalb auch sagen: In der Wasserwelle pflanzen sich Auslenkungsvektoren fort. Je länger die Auslenkungsvektoren sind, desto mehr Energie überträgt die Wasserwelle. Behalten Sie dieses Bild der Auslenkungsvektoren im Kopf, wenn wir uns nun den em-Wellen zuwenden. Hier ist kein Wasser mehr vorhanden, em-Wellen bewegen sich im luftleeren Raum. Denken Sie dabei zum Beispiel an Radiosignale vom Mond oder Licht von fernen Sternen. In Kapitel 1 haben Sie gelernt, dass dies alles em-Wellen sind! Für em-Wellen haben wir schliesslich nur noch die unanschauliche Situation einer Fortpflanzung von elektrischen und magnetischen Feldvektoren. Die von der em-Welle übertragene Energie hängt zusammen mit der Länge der elektrischen und magnetischen Feldvektoren. Ähnlich wie bei der Wasserwelle stellen wir fest: Je länger die Feldvektoren sind, desto mehr Energie überträgt die em-Welle.

Gedankenexperiment zur Informationseübertragung von laufenden Wasserwellen

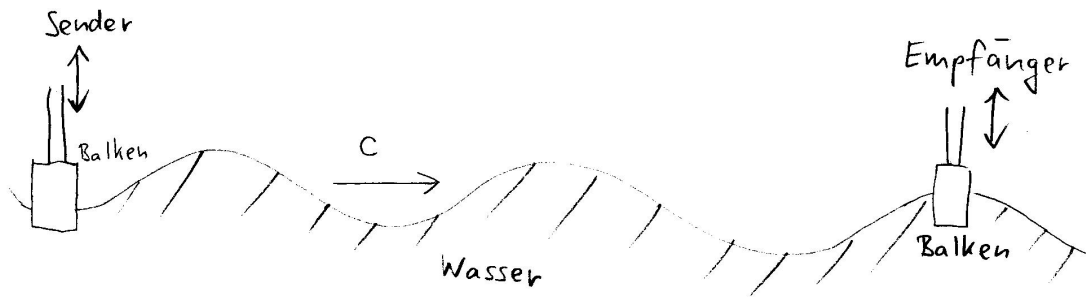


Abbildung 23:

Ein Wassertank wird auf einer Seite mit einem Balken angeregt gemäss Abbildung 23. Der Balken erzeugt oder sendet eine Wasserwelle. Die Welle pflanzt sich durch den Wassertank fort. Auf der anderen Seite des Wassertanks kann die Energie mit einem Balken wieder abgegriffen werden. Der die Wasserwelle empfangende Balken erfährt wie ein Boot einen Auftrieb im Wasser. Das ist ein vereinfachtes Bild für einen Sender und Empfänger.

Informationsübertragung mit einer em-Welle

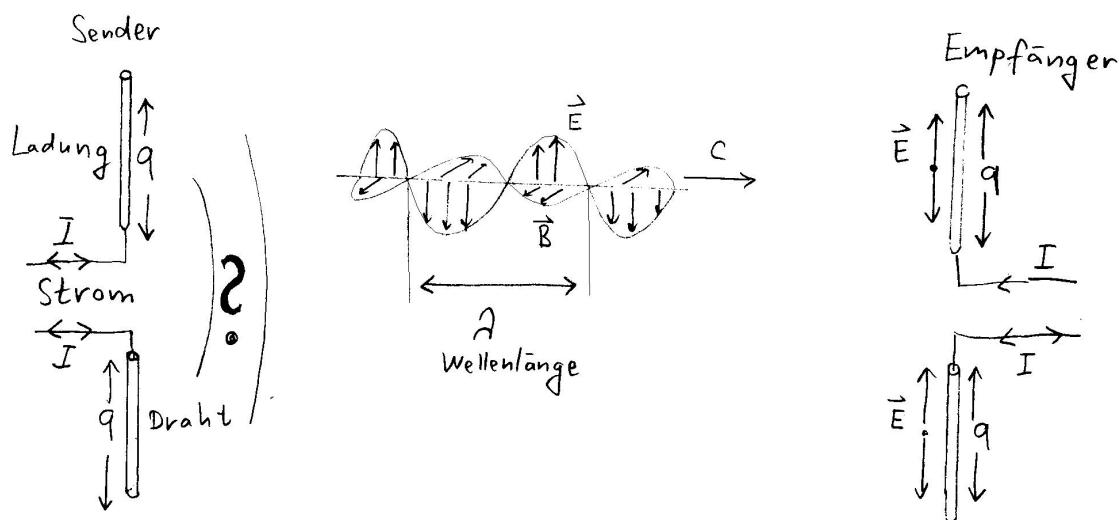


Abbildung 24:

Die Energietransfer mit einer em-Welle können Sie sich vereinfacht gleich wie im vorherigen Gedankenexperiment vorstellen. Betrachten Sie dazu die Abbildung 24. Eine Antenne, hier vereinfacht ein Draht, wird mit einem Strom gespeist. Ein Strom ist bewegte Ladung. Beim Sender wird also in einem Draht Ladung bewegt. Der Strom sei sinusförmig mit einer bestimmten Frequenz. Der Verlauf dieser Bewegung enthält Energie und Information. Diese Information soll zum Empfänger übertragen werden. Die bewegten Ladungen erzeugen nun auch ein em-Feld. Wie das Feld in der Nähe des Drahtes aussieht (Umgebung des schwarzen Fragezeichens), können Sie in den folgenden Büchern nachschauen: *Fundamentals of physics* auf Seite 99 (Figure 38-4), *Physik* Tipler auf Seite 1009, oder *Metzler Physik* auf Seite 287 (Abbildung 287.2). Die Bücher finden Sie in der Mediothek. In einer gewissen Entfernung (die ein paarmal der Wellenlänge entspricht) sieht die em-Welle genau so aus, wie die bisher diskutierte ebene em-Welle. Diese breitet sich nun mit der Wellengeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) aus und erreicht dann die Empfangsantenne. Die Empfangsantenne ist auch ein Draht. Im Draht werden nun durch die Einwirkung der Felder auch wieder Ladungen bewegt. Sie kennen elektrische Kräfte auf Ladungen! Damit wird die Information und Energie wieder aufgefangen und kann als Strom weiter verarbeitet werden.

Noch eine kurze Bemerkung: Zur Bewegung der Ladung in der Empfangsantenne sind die magnetischen Felder eigentlich nicht nötig. Es ist Ihnen vielleicht im Moment nicht klar, welche Rolle die magnetischen Felder in der Welle und bei der Informationsübertragung spielen. Bei der Wasserwelle war ja schliesslich auch nur ein Typ von Vektoren nötig, die Auslenkungsvektoren, um die Welle zu beschreiben. Wieso treten in der em-Welle elektrische und magnetische Feldvektoren auf? Der Grund ist, dass die Natur so geschaffen ist, dass ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld immer ein magnetisches Feld erzeugt und umgekehrt. Zeitlich veränderliche Felder können nicht unabhängig voneinander auftreten. Die Feldvektoren einer ebenen em-Welle haben also nicht nur die Eigenschaften einer Welle, sondern erzeugen sich auch gegenseitig. Dieses gegenseitige Erzeugen wird mit den von James Clerk Maxwell (Abbildung 7, Kapitel 1)

gefundenen und nach ihm benannten Maxwellgleichungen beschrieben. Em-Wellen sind spezielle Lösungen der Maxwellgleichungen. Wir beschränken uns in diesem Leitprogramm aber auf die Welleneigenschaften von ebenen em-Wellen und gehen nicht näher auf diese Sache ein. Mit einem Blick zurück in die Geschichte der Physik möchten wir noch erwähnen, dass Maxwell mit seinen Gleichungen theoretisch voraussagen konnte, dass im Elektromagnetismus Wellen möglich sind. Das war noch bevor Heinrich Rudolf Hertz (Abbildung 4, Kapitel 1) em-Wellen als erster experimentell nachgewiesen hat.

Damit nicht alles bei Worten bleibt, können Sie im nächsten Experiment eine Energie- und Informationsübertragung mit einer em-Welle ausprobieren!

Experiment zu ebener em-Welle

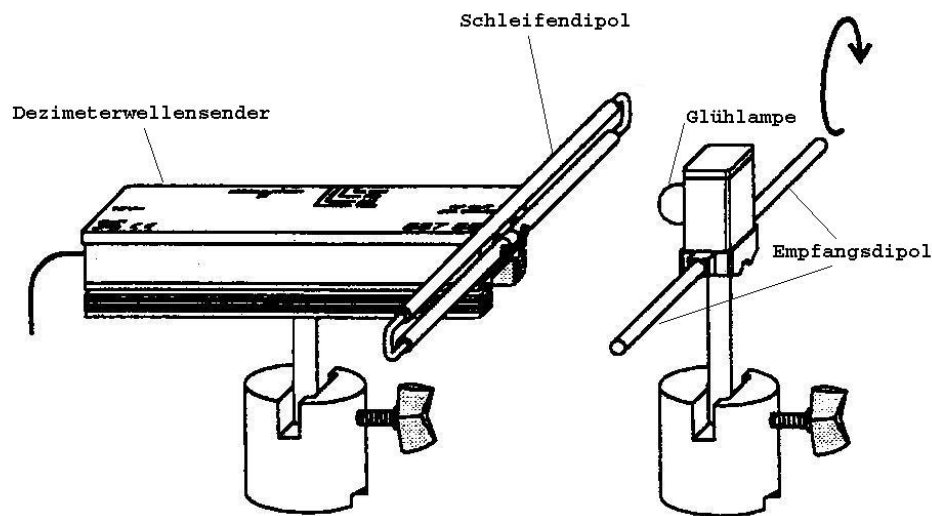


Abbildung 25:

Bauen Sie das Experiment wie in Abbildung 25 auf. Wählen Sie einen festen Abstand von ungefähr 20 cm zwischen dem Dezimeterwellensender und dem Empfangsdipol.

- Der Empfangsdipol mit der Glühlampe soll zuerst parallel zum Schleifendipol ausgerichtet werden, so dass die Glühlampe hell leuchtet.
- Drehen Sie nun den Empfangsdipol mit der Glühlampe. Beobachten Sie die Helligkeit der Glühlampe.

Schreiben Sie jetzt Ihre Beobachtung auf. Versuchen Sie eine physikalische Erklärung für Ihre Beobachtung zu geben. Im Lösungsteil am Schluss des Kapitels finden Sie eine Antwort.



2.5 Lernkontrolle

Mit der Lernkontrolle können Sie prüfen, ob Sie das Kapitel beherrschen. Wenn Sie 3 der 4 Aufgaben richtig lösen können, dann sind die Grundlagen für das nächste Kapitel erarbeitet. Sie können sich dann beim Tutor zum Kapiteltest melden.

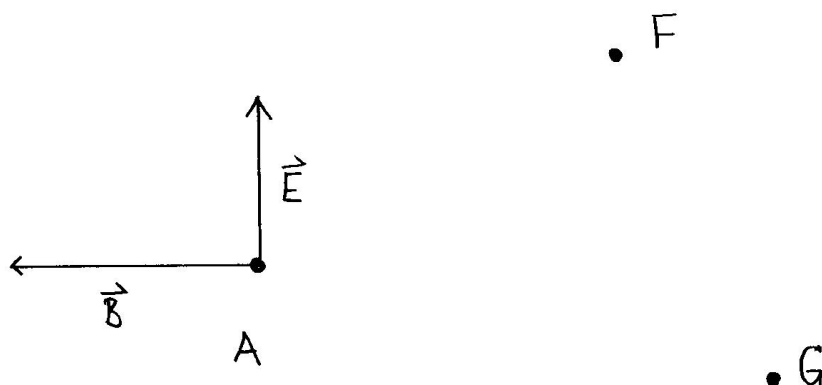


Abbildung 26:

Aufgabe 2.3: Wellen-Ebenen Die Abbildung 26 zeigt einen elektrischen und einen magnetischen Feldvektor einer ebenen em-Welle im Punkt A zu einer bestimmten Zeit. Beide liegen in der Blattebene. Können Sie ohne weitere Information die Feldvektoren in den Punkten F und G herausfinden? Wenn nein, wieso? Wenn ja, dann zeichnen Sie die entsprechenden Feldvektoren mit der richtigen Richtung und Länge ein!

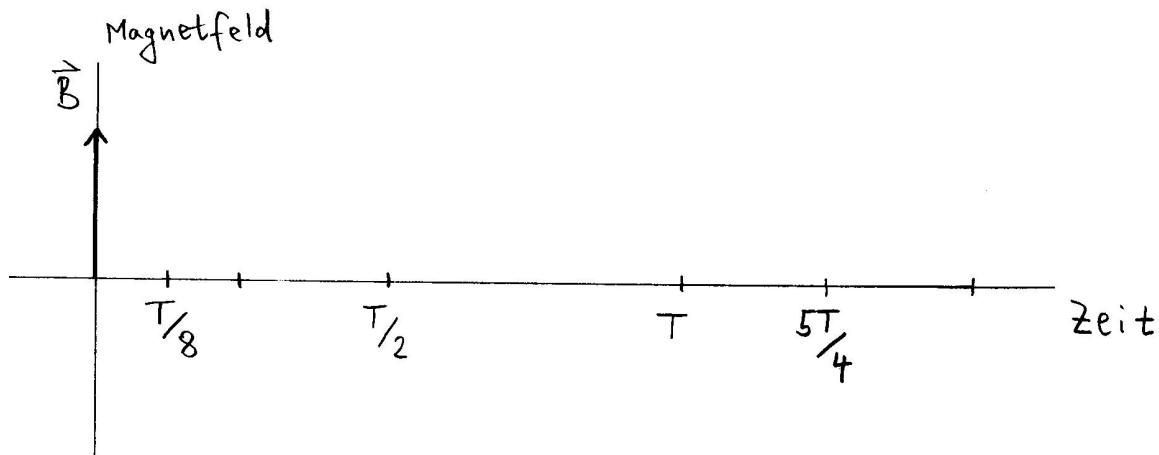


Abbildung 27:

Aufgabe 2.4: Schwingung Hier sollen Sie von einer ebenen em-Welle die magnetischen Feldvektoren herausfinden zu verschiedenen Zeitpunkten an einem festen Ort. Zum Zeitpunkt $t = 0$ habe der magnetische Feldvektor seinen grösstmöglichen Wert nach oben. Bestimmen Sie die Länge und Richtung der anderen Feldvektoren zu den Zeitpunkten $T/2$, T , $5T/4$. Tragen Sie die Feldvektoren in die Abbildung 27 ein. Können Sie das Problem auch für die Zeit $T/8$ lösen?

Aufgabe 2.5: Elektrosmog Eine Bekannte von Ihnen regt sich über einen neu gebauten Radiosendemast auf. Deshalb würde sie sich gerne zwei Messgeräte kaufen, um die elektromagnetischen Feldstärken zu messen. Mit dem einen Messgerät könnte sie an einem Ort elektrische Felder messen. Mit dem anderen könnte sie magnetische Felder an einem Ort bestimmen. Was sagen Sie dazu? Nehmen wir an, Ihre Bekannte hätte die Messung gemacht. Ihr Resultat wäre $E \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{V/m}$ und $B \approx 2 \text{pT}$. Widersprechen diese Messresultate Ihrem Wissen über em-Wellen oder nicht?

Aufgabe 2.6: Leonardo da Vinci Schon Leonardo da Vinci kannte das Prinzip der Wellen: *Es geschieht oft, dass die Welle (Wasserwelle) dem Ort ihrer Entstehung entflieht, das Wasser aber bleibt; ähnlich sehen wir, wie sich die vom Wind erzeugten Wellen über ein Kornfeld ausbreiten, während die Ähren an ihrem Platz bleiben.* Welche wichtige Eigenschaft von Wellen hat Leonardo da Vinci erkannt mit seiner Aussage?

2.6 Lösungen zu den Aufgaben

Lösung der Aufgabe 2.1: Wichtige Eigenschaften der em-Welle Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren stehen an jedem Ort senkrecht aufeinander. Der Winkel ist also 90° . Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren stehen auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. An Orten, wo der elektrische Feldvektor einen maximalen Betrag hat, hat auch der magnetische Feldvektor einen maximalen Betrag. Die beiden elektrischen und magnetischen Feldvektoren in einer em-Welle an gleichen Orten sind nicht unabhängig voneinander! Sie nehmen entlang der Linie miteinander zu und wieder ab.

Lösung der Aufgabe 2.2: Das elektrische Feld der ebenen em-Welle an einem festen Ort An einem festen Ort führt ein elektrischer Feldvektor eine Schwingung aus. Die Frequenz dieser Schwingung ist die Frequenz der em-Welle! Sie müssten den Papierstreifen mit Lichtgeschwindigkeit durch die Papierhülse ziehen. Mit einem Papierstreifen ist das natürlich praktisch und physikalisch unmöglich. Eine em-Welle hingegen bewegt sich tatsächlich mit Lichtgeschwindigkeit.

Experiment mit Wasserwelle

Beobachtung: Die Pflanzensamen bleiben an ihrem Ort stehen, obwohl sich die Wasserwelle vorwärts bewegt.

Erklärung: In jeder Welle wird im zeitlichen Mittel keine Masse transportiert. Was sich fortpflanzt ist die Auslenkung des Wassers.

In einer Wasserwelle wird über die Zeit gemittelt kein Wasser transportiert oder fortbewegt. Noch einmal: Was sich fortpflanzt, ist die Auslenkung des Wassers. Genau gleich können Sie sich das Ausbreiten einer em-Welle vorstellen. Auch hier wird keine Masse transportiert. Was sich fortpflanzt, ist die Auslenkung elektrischer und magnetischer Feldvektoren.

Experiment zu ebener em-Welle

Beobachtung: Sind der Schleifendipol und der Empfangsdipol parallel ausgerichtet, dann leuchtet die Glühlampe am hellsten. Wird der Empfangsdipol abgedreht, nimmt die Helligkeit der Glühlampe zuerst wenig ab, dann aber plötzlich sehr stark.

Erklärung: Der elektrische Feldanteil der vom Schleifendipol abgestrahlten em-Welle liegt parallel zum Schleifendipol. Diese em-Welle kommt dann beim Empfangsdipol mit der Glühlampe an und kann am meisten Ladung bewegen, falls der Empfangsdipol parallel zum elektrischen Feld liegt. Wird der Empfangsdipol abgedreht, dann ist nur noch die elektrische Feldkomponente in Richtung des Empfangsdipols wirksam. Die verschobene Ladung wird kleiner, der Strom nimmt im Empfangsdipol ab und die Glühlampe leuchtet weniger. Mit dem Experiment können Sie feststellen, dass in einer ebenen Welle alle elektrischen Feldvektoren parallel zueinander stehen.

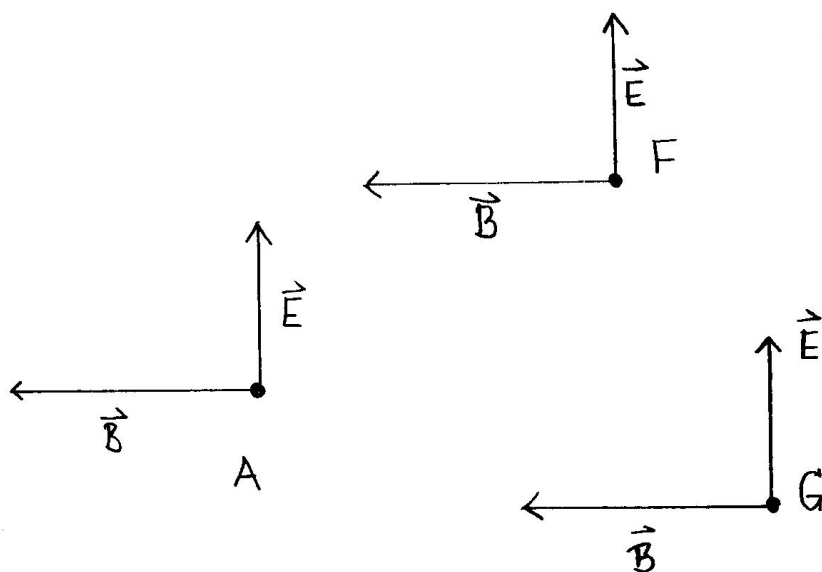


Abbildung 28:

Lösung der Aufgabe 2.3: Wellen-Ebenen Sie können ohne weitere Information die Feldvektoren in den Punkten F und G bestimmen. Der Grund ist, dass es sich um eine **ebene Welle** handelt. In den Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der em-Welle sind die Feldvektoren in jedem Punkt gleich. Die Abbildung 28 zeigt die Anordnung der Feldvektoren in den anderen Punkten F und G als Folge dieser Überlegung.

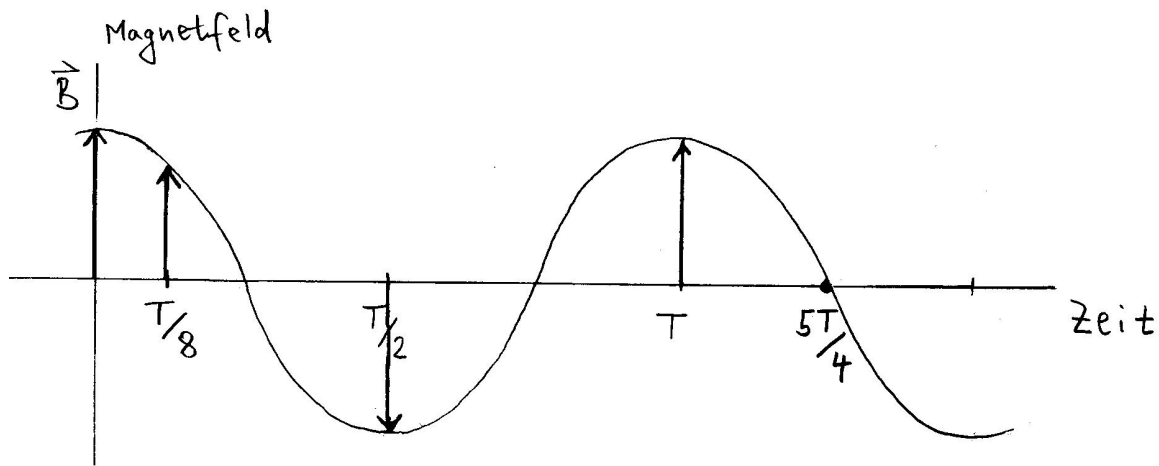


Abbildung 29:

Lösung der Aufgabe 2.4: Schwingung Die Idee zum Lösen dieser Aufgabe ist es, zu erkennen, dass die Feldvektoren an einem festen Ort der ebenen em-Welle ein sinusförmige **Schwingung** ausführen. Das gilt sowohl für die elektrischen als auch für die magnetischen Feldvektoren! Im ersten Schritt wird also eine sinusförmige Kurve skizziert gemäss Abbildung 29. Anschliessend können Sie die magnetischen Feldvektoren zu den verschiedenen Zeitpunkten eintragen. Das ist auch möglich für den Zeitpunkt $T/8$!

Lösung der Aufgabe 2.5: Elektromog Ein Messgerät für das elektrische oder das magnetische Feld genügt, denn das elektrische und das magnetische Feld sind in einer ebenen em-Welle durch die Formel $E = B \cdot c$ miteinander verknüpft. Daher können wir uns ein Messgerät sparen!

Ob die Messung stimmt, wird deutlich, wenn wir die Messresultate in die gleiche Formel $E = B \cdot c$ einsetzen. Der Bruch E/B muss der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ entsprechen:

$$\frac{E}{B} = \frac{6 \cdot 10^{-4} \text{V/m}}{2 \text{pT}} = \frac{6 \cdot 10^{-4} \text{V/m}}{2 \cdot 10^{-12} \text{Vs/m}^2} = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}.$$

Das Messresultat entspricht unserer Formel und damit unserem Wissen über EM-Wellen.

Lösung der Aufgabe 2.6: Leonardo da Vinci Leonardo da Vinci erkannte das Prinzip der Wellen: In einer Welle wird keine Materie (Masse) transportiert. Was sich fortplanzt ist die Auslenkung der Welle.

Kein Transport von Materie: *...das Wasser aber bleibt... und ...während die Ähren an ihrem Platz bleiben.* Die Auslenkung der Welle planzt sich fort: *...die Welle dem Ort ihrer Entstehung entflieht... und ...die vom Wind erzeugten Wellen über ein Kornfeld ausbreiten...*

3 Kapitel: Additum

Übersicht

Wieso wird die Speise in einem Mikrowellenofen erwärmt? Das ist eine interessante Frage! Deshalb schauen wir uns diesen Vorgang etwas genauer an.

Wie der Name sagt, werden die Speisen in einem solchen Ofen mittels Mikrowellen erwärmt. Sie lernen hier, wie die em-Welle in einem Mikrowellenofen aussieht.

Schliesslich werden wir uns auch mit der Frage beschäftigen, wie die Energie der em-Welle von der Speise aufgenommen wird und sie erwärmt. Sie werden verstehen, wieso die Speise Energie aufnimmt und was für Voraussetzungen dazu erfüllt sein müssen. Das führt uns zu der allgemeinen Frage, wie verschiedene Materialien, wie zum Beispiel Aluminium, Wasser oder Plastik, auf Mikrowellen reagieren.

Lernziele von Kapitel 3

- Sie haben eine Vorstellung davon, wie eine em-Welle im Mikrowellenofen aussieht.
- Sie kennen das Verhalten von drei wesentlich verschiedenen Materialien im Mikrowellenofen.
- Sie wissen, wie der Mikrowellenofen mit einer em-Welle Speisen erwärmen kann.

3.1 Aufbau eines Mikrowellenofens

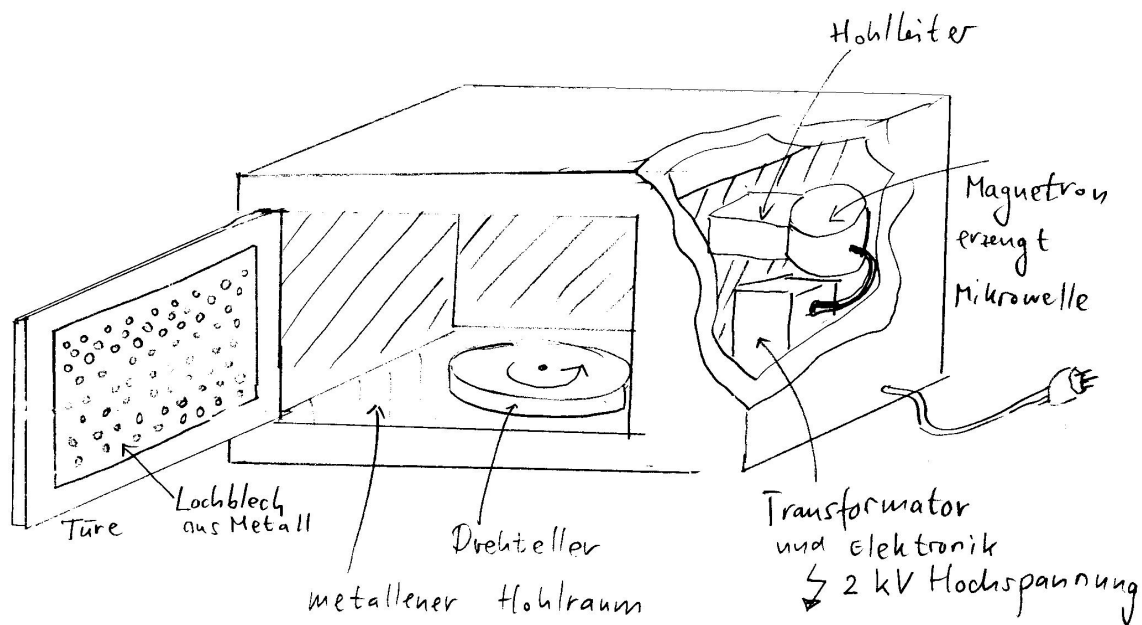


Abbildung 30:

Die Abbildung 30 zeigt den Aufbau eines Mikrowellenofens. Wichtige Bestandteile sind der metallene Hohlraum und die ebenfalls metallene Lochblechtüre. Hier wird die em-Welle "eingesperrt". Wichtig ist auch der Drehteller, auf den die Speise gelegt wird. Dabei wird sie wie ein Poulet am Grill gedreht. Schliesslich muss die Energie, die die Speise erwärmt, auch wieder nachgeliefert werden. Das Magnetron, der Transformator und die Elektronik, dienen ausschliesslich der Erzeugung der em-Welle und Nachlieferung der Energie. Das Magnetron funktioniert auf eine sehr komplizierte Weise. Für uns ist im Moment nur wichtig, dass damit Mikrowellen erzeugt werden können, mehr nicht. Diese Mikrowellen werden über den Hohlleiter (metallenes rechteckiges Rohr) in den metallenen Hohlraum geführt.

Zwei Gefahrenhinweise:

- 1) Das Magnetron braucht zum Betrieb Hochspannung, etwa 2000 Volt Gleichspannung! Diese Hochspannung wird mit dem Transformator und der Elektronik erzeugt. Eine Berührung mit diesem Teil des Mikrowellenofens kann lebensgefährlich sein!
- 2) Es ist auch sehr gefährlich, das Magnetron ohne Mikrowellenofen frei zu betreiben. Sie selber würden gebraten, statt der Speise! Mikrowellen können Verbrennungen unter der Haut verursachen. Treffen Mikrowellen das Auge, dann verbrennt die wasserhaltige Horn- und Netzhaut!

3.2 Wie sieht die em-Welle im Mikrowellenofen aus?

Es ist jetzt kein Geheimnis mehr, dass im Mikrowellenofen eine em-Welle produziert wird. Sie wissen auch bereits, dass deren Wellenlänge etwa 12 cm beträgt. Allerdings besteht ein wesentlicher Unterschied zu der im vorhergehenden Kapitel behandelten Radiowelle. Die Radiowelle ist eine **laufende** em-Welle. Die em-Welle im Mikrowellenofen ist eine **stehende** Welle! Ob eine Welle stehend oder laufend ist, hat nichts mit der Wellenlänge zu tun. Es gibt sowohl laufende wie auch stehende Mikrowellen.

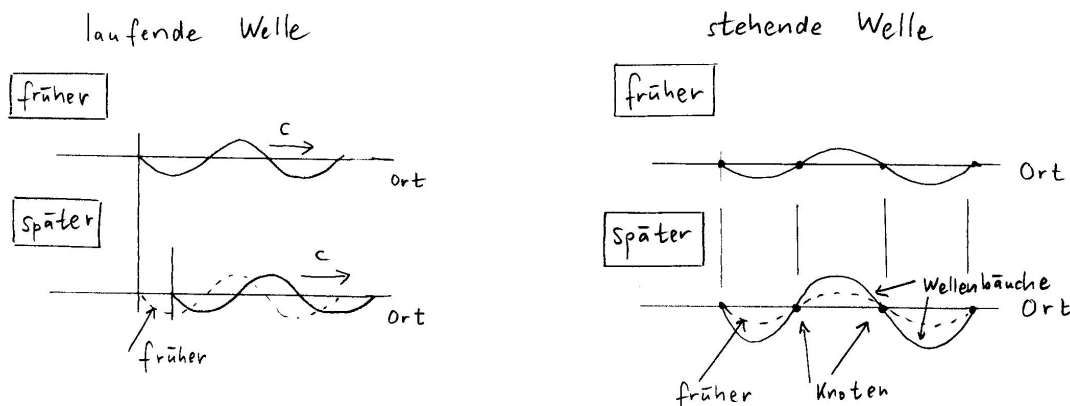


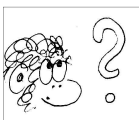
Abbildung 31:

Diese beide Formen von Wellen kennen Sie bereits aus dem Unterricht. Zur Auffrischung Ihrer Erinnerung zeigt die Abbildung 31 noch einmal die wichtigsten Unterschiede: Bei einer laufenden Welle bewegt sich ein Wellenzug. Bei einer stehenden Welle entstehen Knoten. Die Knoten bleiben fest an ihrem Ort. Die Wellenbäuche hingegen werden grösser und dann wieder kleiner. Ein Beispiel einer stehenden Welle ist die Schwingung einer Saite eines Musikinstruments.

Experiment: Stehende Seilwelle Auf dem Boden liegt ein Seil oder eine lange Schraubenfeder. Spannen Sie das Seil oder die Feder etwas und bewegen Sie das nicht befestigte Ende des Seiles oder der langen Feder parallel zum Boden rasch hin und her. Bei bestimmten Frequenzen werden Sie stehende Wellen beobachten.



Aufgabe 3.1: Stehende em-Welle Überlegen Sie sich, wie Sie sich eine stehende em-Welle vorstellen müssen. Benutzen Sie ein anschauliches Beispiel für Ihre Überlegungen. Nehmen Sie die Saite zum Vergleich. Beschreiben Sie dann das Verhalten der stehenden em-Welle an einem festen Ort.



Weshalb brauchen wir denn überhaupt eine stehende Welle im Mikrowellenofen?

Eine laufende Welle würde die Speise auch erwärmen, wie Sie weiter unten lesen werden. Nur würde ein Teil die Küche erreichen und dort noch andere Dinge erwärmen. Das will aber niemand. Die em-Welle muss wie eine Saite, die nur über die Länge der Gitarre schwingt, im Mikrowellenofen eingeschlossen werden. Deshalb brauchen wir eine

stehende em-Welle. In folgenden Experiment werden Sie verstehen, wie das mit dem **metallinen** Hohlraum im Mikrowellenofen erreicht wird.

Erinnern Sie sich aber vor dem Experiment an das Folgende. Auch stehende Wellen haben etwas mit laufenden Wellen gemeinsam: *Stehende Wellen entstehen aus einer Addition von zwei entgegengesetzt laufenden Wellen mit gleicher Amplitude*. Genau das wird beim Mikrowellenofen ausgenutzt.

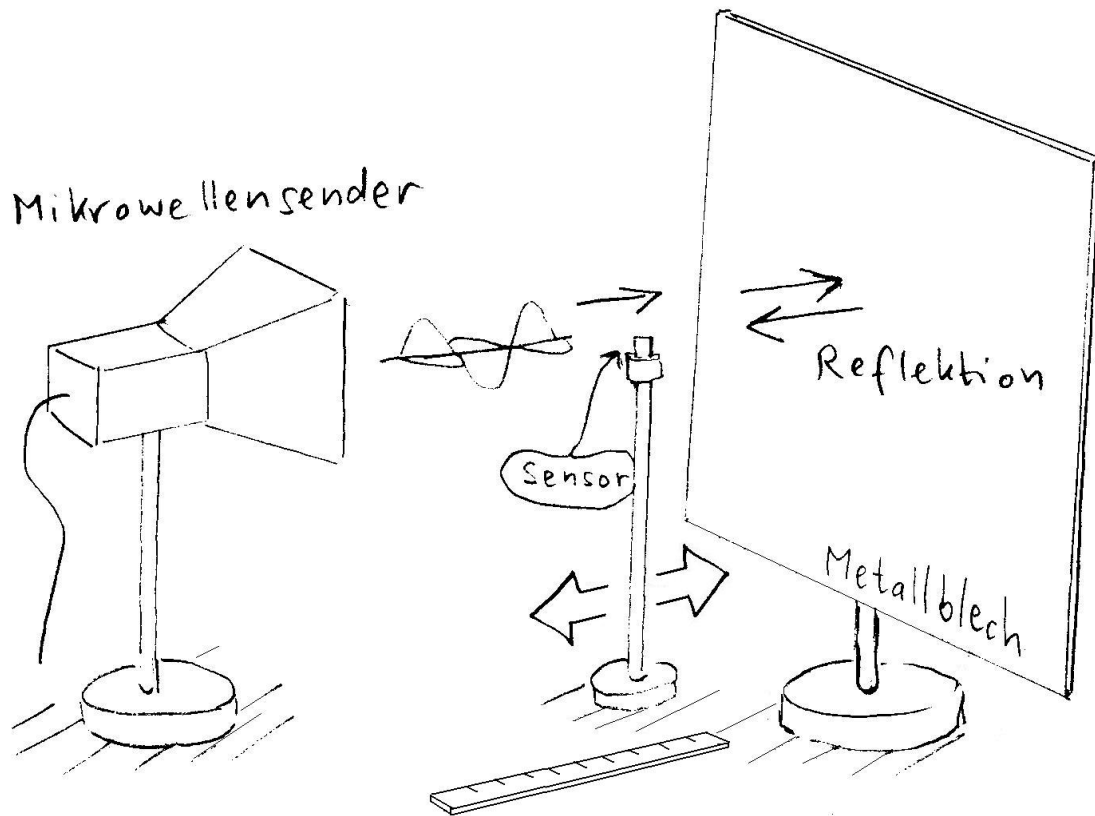


Abbildung 32:

Experiment: Stehende Mikrowellen Eine Metallwand ist für eine Mikrowelle das, was ein Spiegel für Licht ist. Die Metallwand reflektiert Mikrowellen. Das sehen Sie in diesem Experiment. Die einfallende und die reflektierte Welle laufen genau in die entgegengesetzte Richtung. Die Amplituden der beiden Wellen sind ziemlich genau gleich gross. Was entsteht, ist eine stehende em-Welle! Prüfen Sie das nach mit dem Aufbau, der in der Abbildung 32 gezeigt ist. Es gibt Knoten, wo die Felder verschwinden und Orte, wo die Felder maximale Amplitude erreichen. So wie dies eben bei einer stehenden em-Welle sein sollte. Mit dem Sensor können Sie das Feld an verschiedenen Orten in der Nähe des Bleches ausmessen. Bestimmen Sie die Wellenlänge der verwendeten Mikrowellen. Tipp: Verschieben Sie den Sensor nur langsam, die Wellenlänge ist nicht sehr gross.



Durch was ist die Frequenz der em-Welle im Mikrowellenofen festgelegt?

Damit eine Saite eines Musikinstruments mit einer gewünschten Frequenz schwingt, müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein. Die Saite muss beispielsweise die richtige Länge haben.

Ganz ähnlich müssen bei einem Mikrowellenofen die Abmessungen des Hohlraumes stimmen. Bei der richtigen Wahl der Abmessungen schwingt die stehende Welle mit ganz bestimmter Frequenz. Es gibt wie bei einer Saite eine Grundschwingung und Oberschwingungen. Allerdings ist alles ein bisschen komplizierter als bei einer Saite. Im Mikrowellenofen müssen Sie nicht nur die Länge anpassen, sondern auch die Höhe und Tiefe des Hohlraumes.

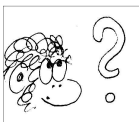
Im Mikrowellenofen beträgt die gewünschte Frequenz 2.45 GHz. Weshalb die Frequenz genau mit diesem Wert gewählt wird, verstehen Sie später im Kapitel. Hier möchten wir nur soviel sagen, dass die Frequenz der Welle mit der Frequenz der zu erwärmenden Wassermoleküle abgestimmt sein muss, damit eine Erwärmung stattfindet. Wie stark diese ist, hängt mit der Länge der Feldvektoren, also der Stärke der Felder zusammen.

Ein Experiment, das die stehende em-Welle des Mikrowellenofens sichtbar macht:

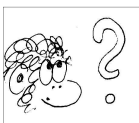
Experiment: Thermofaxpapier Thermofaxpapier hat die Eigenschaft, dass es sich verdunkelt, wenn es erwärmt wird. Dadurch lassen sich Temperaturverteilungen sichtbar machen. Legen Sie nun ein Thermofaxpapier in den Mikrowellenofen. Das Thermofaxpapier soll dabei mit einem nassen Papierhandtuch und mit Styropor unterlegt sein. Das Ganze soll nicht auf den Drehteller gelegt werden! Schalten Sie den Mikrowellenofen ein. Erklären Sie das Resultat des Experiments. Hinweis: Wasser wird von den Mikrowellen erwärmt, Styropor hingegen nicht.



Aufgabe 3.2: Kochtempo Wieso müssen Sie mit einem Mikrowellenofen weniger lange auf das Essen warten, als mit einem herkömmlichen Kochherd?



Aufgabe 3.3: Drehteller In einem typischen Mikrowellenofen wird die Speise auf einen Drehteller gelegt und während dem Kochvorgang gedreht. Weshalb dieser Drehteller? Ist es derselbe Grund wie beim Pouletdrehen im Grill?



3.3 Wie Verhalten sich verschiedene Materialien im Mikrowellenofen?

Den Abschnitt 3.3 werden Sie in **Zweiergruppen** bearbeiten. Suchen Sie dazu eine Mitschülerin oder einen Mitschüler, der in der Bearbeitung des Leitprogramms gleich weit ist wie Sie! Wenn Sie niemanden finden, dann sagen Sie das Ihrem Lehrer. Beginnen Sie mit dem Durchlesen der Experimente und Aufgaben.



Im Mikrowellenofen darf das Essen nicht in Gefässen aus beliebigem Material erwärmt werden. Es spielt eine Rolle, ob ein Teller aus Plastik oder Aluminium verwendet wird. Die Frage, ob etwas warm wird, ist also eine Frage des Materials. Schliesslich ist das Ziel, nur das Essen zu erwärmen und nicht das Geschirr. Also stellt sich die Frage, welche Materialien durch Mikrowellen erwärmt werden und welche nicht. **Diese Frage wollen wir anhand von Experimenten klären.** Schreiben Sie bei jedem Experiment Ihre Beobachtungen und Ihre Erklärung dazu auf. Vergleichen Sie Ihr Resultat danach mit der Antwort im Lösungsteil.

Experiment: Tasse mit Wasser Stellen Sie eine leere Tasse in den Mikrowellenofen. Danach eine, die mit Wasser gefüllt ist. Schalten Sie den Mikrowellenofen ein. Was geschieht mit dem Wasser? Was passiert mit der Tasse?



Film: Was geschieht mit metallischen Gegenständen im Mikrowellenofen?

Wir haben im letzten Kapitel Sendeantenne und Empfangsantenne kennengelernt. Antennen sind aus Metall. Metallgegenstände im Mikrowellenofen können sich wie Empfangsantennen verhalten. Die em-Welle im Mikrowellenofen wird optimal aufgenommen oder empfangen, falls die Abmessung des Metallgegenstands genau mit der Wellenlänge übereinstimmt (im Mikrowellenofen beträgt die Wellenlänge 12 cm). Die em-Welle bewegt Ladungen im Metallgegenstand. Das Bewegen von Ladungen hat zwei Folgen.



- 1) Die Metallgegenstände werden warm.

Das entspricht dem Erwärmen eines stromdurchflossenen Widerstandes. Dünne Metallschichten wie Alufolie oder Geschirr mit metallischen Verzierungen (Goldrand) erhitzen sich schnell. Dickere Metallgegenstände wie Besteck erwärmen sich mässig schnell.

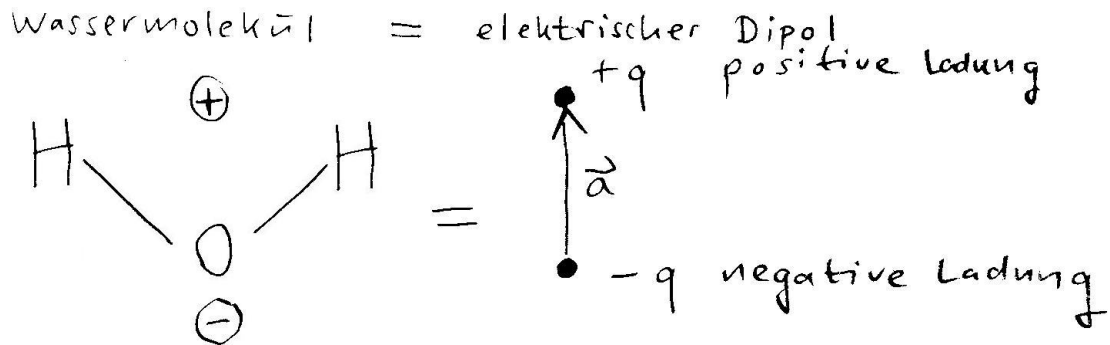
- 2) Es können hohe Feldstärken entstehen.

Hohe elektrische Feldstärken können zu Funkenüberschlägen führen. In Luft reicht eine Spannung von 10000 Volt über einen Abstand von 1cm für einen Funkenüberschlag. Das entspricht einem kritischen elektrischen Feld von $10000 \text{ V/cm} = 10^6 \text{ V/m}$. Bei einer Gabel zum Beispiel ist ein Funkenüberschlag zwischen zwei Zinken beobachtbar.

Experimente mit Metallgegenständen sind zu gefährlich, um sie selber durchzuführen. Tipp: Probieren Sie das nicht selber aus! Sehen Sie sich die kurzen Filme an. Die Filmaufnahmen zeigen ihnen, wieso sie die Experimente nicht selber zu Hause machen sollten!

3.4 Wieso wird Speise warm im Mikrowellenofen?

Wir haben jetzt gesehen, dass Wasser durch die Mikrowellen erwärmt wird. Wieso gerade Wasser?



Das Wassermolekül ist ein elektrischer Dipol

Das Wassermolekül hat eine besondere elektrische Eigenschaft: es ist ein elektrischer Dipol, siehe Abbildung 33. Ein solcher besteht aus einer positiven und einer negativen Ladung, die einen festen Abstand haben. Die beiden Ladungen sind entgegengesetzt gleich gross. Die Lage des Wassermoleküls lässt sich durch den Vektor \vec{a} beschreiben. Die Richtung von \vec{a} zeigt von der negativen zur positiven Ladung. Die Länge von \vec{a} gibt den festen Abstand der Ladungen an.

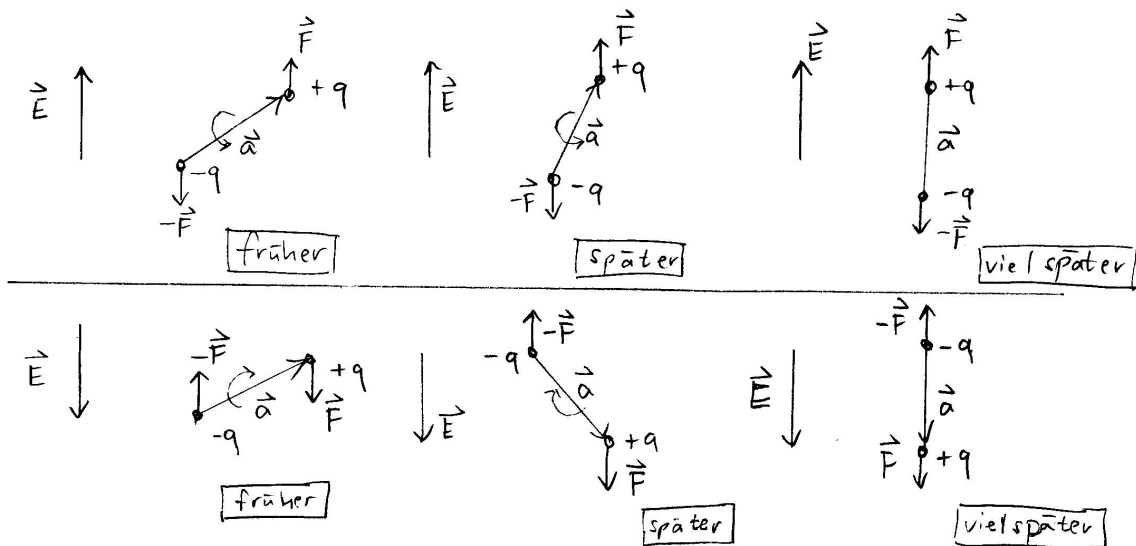


Abbildung 34:

Wie verhält sich ein Wassermolekül in einem elektrischen Feld?

Bringen Sie ein Wassermolekül als elektrischen Dipol in ein elektrisches Feld, dann richtet sich der Dipol in Feldrichtung aus. Dies geschieht aufgrund der elektrostatischen Kräfte auf die beiden Ladungen, siehe Abbildung 34.

Wie verhält sich das Wassermoleküle in einer em-Welle?

Schauen Sie sich dazu zuerst das Applet auf der Internetseite <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/applets/h2o.html> an. Mit dem Power-Regler können Sie die Länge der Feldvektoren verändern. Probieren Sie es aus!

Bei der em-Welle im Mikrowellenofen führt der elektrische Feldvektor an einem festen Ort eine Schwingung aus. Er wechselt periodisch seine Richtung. Der Dipol des Wassermoleküls möchte sich immer in Feldrichtung ausrichten, was das Wassermolekül dreht.

Die Dipoleigenschaft allein genügt noch nicht für die Anregung der Drehbewegung. Auch die Frequenz der Schwingung des elektrischen Feldvektors und die Frequenz der Drehschwingung des Wassermolekül müssen übereinstimmen.



Abbildung 35:

Um das zu verstehen, betrachten wir ein Alltagsbeispiel. Wir denken dabei an eine Schaukel. Wie bringe ich eine Schaukel in Bewegung? Immer wenn die Schaukel hinten oben ist, gebe ich Energie dazu, indem ich sie wieder anstosse. Es müssen zwei Frequenzen aufeinander abgestimmt sein: Die Frequenz, mit der die Schaukel gerne schwingen möchte, und die Frequenz, mit der ich anstosse. Die Schaukel ist ein Pendel. Die Frequenz, mit der es gerne schwingen möchte, ist die Frequenz dieses Pendels!

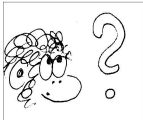
Das Gleiche können Sie sich für ein Wassermolekül denken. Dieses macht eine Drehschwingung mit einer festen zu ihm gehörenden Frequenz. So ist die Frequenz von 2.45 GHz der em-Welle im Mikrowellenofen genau die Frequenz des Wassermoleküls.

Wieso wird das Wasser warm?

Wärme bedeutet nichts anderes als eine heftigere Drehbewegung der Wassermoleküle. Aus atomarer Sicht bedeutet dies Wärme. Der Mikrowellenofen bringt die Wassermoleküle in Drehbewegung und das Wasser erwärmt sich.

Speisen bestehen grösstenteils aus Wasser. Die durch die em-Welle in Rotation gebrachten Wassermoleküle stossen an ihre Nachbarmoleküle und bringen so auch diese in Bewegung. Auf diese Weise wird deutlich, weshalb der Mikrowellenofen nicht nur das Wasser in der Speise, sondern auch den Rest erwärmt.

Aufgabe 3.4: Ist Mikrowellennahrung ungesund? Natürlich können Sie dazu keine vollständige Antwort geben, da Sie hier nur die physikalische Sicht kennenlernten. Beantworten Sie diese Frage mit dem Wissen, das Sie sich jetzt erarbeitet haben. Vergleichen Sie den Kochvorgang mit Erhitzen auf dem Feuer oder auf der Herdplatte. Was sind die wesentlichen Unterschiede?



3.5 Lernkontrolle

Aufgabe 3.5: Metallener Hohlraum Zählen Sie zwei Gründe auf, weshalb ein Mikrowellenofen einen metallenen, geschlossenen Hohlraum braucht. Begründen Sie Ihre Antwort mit Ihrem physikalischen Wissen aus dem letzten Kapitel.



Aufgabe 3.6: Stehende Welle Beschreiben Sie das Verhalten der Feldvektoren an einem festen Ort in einer stehenden em-Welle. Gibt es Unterschiede im Verhalten an einem festen Ort zu der in Kapitel 2 behandelten laufenden em-Welle?

Aufgabe 3.7: Drei Typen von Materialien

Nennen Sie jeweils ein Material, das Mikrowellen stark absorbiert, stark reflektiert und fast ungeschwächt durchlässt.

Aufgabe 3.8: Erwärmung von Speise Erklären Sie in eigenen Worten, wie und wieso eine em-Welle im Mikrowellenofen Speisen erwärmen kann.

3.6 Lösungen zu den Aufgaben

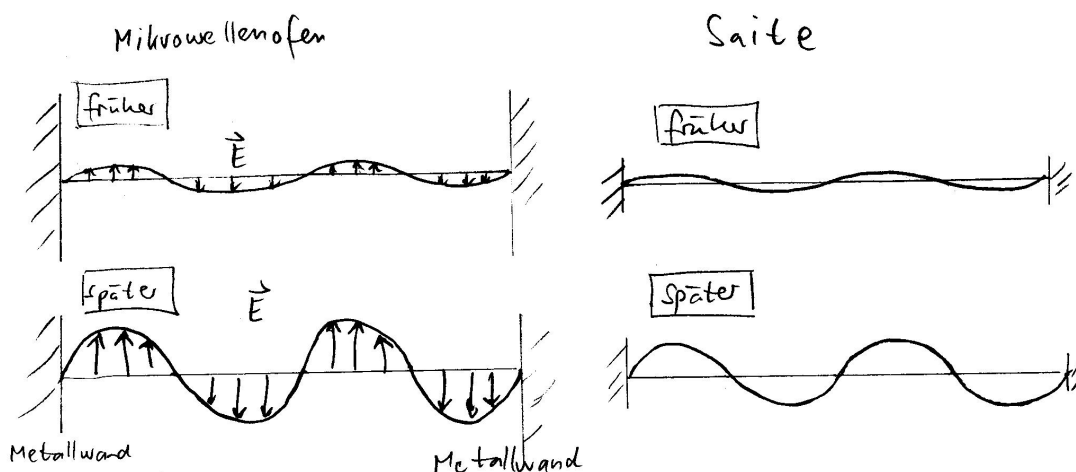


Abbildung 36:

Lösung der Aufgabe 3.1: Stehende em-Welle Die Abbildung 36 zeigt, wie eine stehende em-Welle im Vergleich zu einer stehenden Welle auf einer Saite aussieht. Zur Vereinfachung sind nur die elektrischen Feldvektoren dargestellt. An festen Orten führen die Feldvektoren eine Schwingung aus. Das ist wie bei einer laufenden Welle. Der einzige Unterschied ist, dass die Amplitude der Schwingung an jedem Ort verschieden ist. Es gibt Orte mit einer grösstmöglichen Amplitude. Das sind die Wellebäuche. Es gibt Orte, an denen die Amplitude gleich Null ist. Das sind die Knoten der stehenden Welle.

Experiment: Stehende Mikrowellen

Lösung: Abstand zwischen zwei Knoten 1.6 cm, Wellenlänge 3.2 cm.

Experiment: Thermofaxpapier

Beobachtung: Es gibt dunkle Stellen auf dem Thermofaxpapier.

Erklärung: Der Mikrowellenofen erwärmt die Speisen nicht an allen Stellen gleichmässig. Das Thermofaxpapier wird an Stellen, wo die Felder stärker sind, stärker erwärmt. An Orten, wo Knoten auftreten, bleibt es kalt. Somit können Sie die Struktur der stehenden em-Welle im Mikrowellenofen sehen.

Bemerkung: Sie sehen, dass die Knoten nicht in regelmässigen Abständen verteilt sind, wie bei einer Saite. Die stehende em-Welle hat hier eine etwas komplizierte Struktur. Es wird nicht nur eine Schwingung angeregt, sondern auch Oberschwingungen. Diese haben leicht unterschiedliche Frequenzen. Das Bild der stehenden em-Welle, das Sie mit dem Thermofaxpapier erhalten haben, zeigt eine Addition dieser verschiedenen Schwingungen.

Lösung der Aufgabe 3.2: Kochtempo Die em-Welle durchdringt die Speise. Sie kann die inneren Teile und die Oberfläche gleichzeitig erwärmen. Der herkömmliche Kochherd wärmt die Speise nur an der Oberfläche. Es braucht Zeit, bis auch das Innere warm ist. Darum dauert es beim Kochherd länger, Speisen zu erwärmen.

Lösung der Aufgabe 3.3: Drehteller

Mikrowellen werden an den metallenen Wänden im Ofen reflektiert. Dadurch entsteht eine **stehende** em-Welle. An den Knoten der stehenden Welle verschwindet das elektrische Feld und die Speise bleibt kalt. An den Bäuchen der stehenden Welle ist es umgekehrt.

Wird die Speise auf einem Drehteller gedreht, dann erwärmt sich die Speise gleichmässiger. Kein Teil der Speise bleibt kalt oder verbrennt. So gesehen dreht sich ein Poulet beim Grillieren aus demselben Grund.

Experiment: Tasse mit Wasser

Beobachtung: Die Tasse ohne Wasser wird nicht heiss. Bei der mit Wasser gefüllten Tasse, wird das Wasser und die Tasse heiss.

Erklärung: Das Wasser nimmt Energie der em-Welle (Mikrowelle) auf. Man sagt, Wasser absorbiert Mikrowellen. Die Tasse muss aus einem Material bestehen, das die elektromagnetische Energie der Mikrowellen nicht aufnimmt oder absorbiert. Sie wollen das Tasse schliesslich nicht schmelzen. Die em-Welle geht ohne Reaktion durch die Tasse hindurch. Diese muss die em-Welle durchlassen, damit das Wasser (die Speise) warm wird. Die Tasse gefüllt mit Wasser wird warm, weil sie vom heissen Wasser erhitzt wird. Die Tasse wird aber nicht direkt durch die Mikrowelle erwärmt.

Lösung der Aufgabe 3.4: Ist Mikrowellennahrung ungesund?

Beim Kochen auf der Herdplatte oder auf einem Feuer wird die Speise von aussen her aufgewärmt. Die Wärme dringt von aussen nach innen. Alle Moleküle bewegen sich heftiger, zuerst aussen, nachher überall. Nicht nur die Wassermoleküle werden angeregt. Beim Mikrowellenofen durchdringt die em-Welle die gesamte Speise. Die Wassermoleküle werden überall in der Speise, nicht nur an der Oberfläche zum Rotieren gebracht. Diese Bewegung überträgt sich auf die restlichen Moleküle: Die gesamte Speise wird erwärmt. Sowohl bei der herkömmlichen Wärmequelle, als auch den Mikrowellen werden Speisen lediglich erwärmt. Von daher gesehen ist Mikrowellennahrung sicher nicht ungesünder als herkömmlich erwärmte Speisen. Mehr können Sie mit Ihrem Wissen nicht dazu sagen.

Lösung der Aufgabe 3.5: Metallener Hohlraum

Die zwei Gründe sind:

- 1) Es braucht Metall, damit die Mikrowellen reflektiert werden. Die Addition der einfallenden und der ausfallenden Welle ergibt eine stehende Welle.
- 2) Der Hohlraum muss geschlossen sein, damit die Mikrowellen im Mikrowellenofen bleiben. Ähnlich wie bei der Saite ermöglicht der Hohlraum eine stehende Welle mit der gewünschten Frequenz.

Lösung der Aufgabe 3.6: Stehende Welle Die Feldvektoren führen bei der stehenden Welle eine Schwingung an einem festen Ort aus. Das ist genau gleich wie bei einer laufenden, ebenen em-Welle aus Kapitel 2.

Allerdings ist die Amplitude bei der stehenden Welle an jedem Ort verschieden. Bei Knoten gibt es überhaupt keine Schwingung. Bei Bäuchen hat die Schwingung die grösstmögliche Amplitude.

Bei einer laufenden, ebenen em-Welle hingegen tritt die Schwingung der Feldvektoren an jedem Ort mit der gleichen Amplitude auf.

Lösung der Aufgabe 3.7: Drei Typen von Materialien

Eine mögliche Antwort wäre:

- 1) Aluminium **reflektiert** Mikrowellen stark
- 2) Wasser **absorbiert** Mikrowellen.
- 3) Porzellan **lässt** Mikrowellen praktisch ungeschwächt **durch**.

Lösung der Aufgabe 3.8: Erwärmung von Speisen Zuerst muss erklärt werden, wie eine stehende em-Welle auf ein Wassermolekül einwirkt. An einem festen Ort schwingt ein elektrischer Feldvektor immer hin und her. Das Wassermolekül ist ein elektrischer Dipol, der immer versucht, sich im elektrischen Feld auszurichten. Die Richtung des elektrischen Feldes ändert aber dauernd mit der Frequenz 2.45GHz. Das bringt die Wassermoleküle zum Drehen, weil diese Frequenz der Schwingung gerade mit der Frequenz der Wassermoleküle übereinstimmt. Eine Drehbewegung der Wassermoleküle ist nichts anderes als Wärme. Diese Wärme überträgt sich dann auf den Rest der Speise.

A Kapitel-Tests für den Tutor

A.1 Test für Kapitel 1

Aufgabe 1: Wellenlängenbereiche Zählen Sie fünf verschiedene Erscheinungsformen von em-Wellen auf.

Aufgabe 2: Radiowellenmessung Eine Fernmeldetechnikerin misst mit einem Messgerät eine Radiowelle an einem bestimmten Ort aus. Ihr Messgerät zeigt die Zeit an, nach der sich die Schwingung eines Feldvektors wiederholt. Die Zeit, die sie misst, beträgt 10^{-8} s. Berechnen Sie die Wellenlänge der Radiowelle.
Hinweis: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radiowelle ist $3 \cdot 10^8$ m/s.

Aufgabe 3: Wellengrößen

- a) Zählen Sie vier der sechs Größen auf, die wir im ersten Kapitel zum Thema Wellen repetiert haben.
- b) Erklären Sie die Eigenschaften dieser vier Größen mit eigenen Worten.

A.2 Lösungen zum Test für Kapitel 1

Lösung der Aufgabe 1: Wellenlängenbereiche (K1) Mögliche Erscheinungsformen sind Niederfrequenz, Radiowellen, Mikrowellen, Terahertzstrahlung, Infrarotstrahlung, Licht, UV-Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung. Eine Auswahl von fünf Begriffen genügt zum Erfüllen der Aufgabe.

Lösung der Aufgabe 2: Radiowellenmessung (K2,K3) Die Zeit, die die Fernmeldetechnikerin ausgemessen hat, ist die Periodendauer T der Schwingung der Welle an einem festen Ort. Daraus lässt sich die Frequenz $f = 1/T = 1 \cdot 10^8 \text{Hz} = 100 \text{MHz}$ errechnen. Schliesslich wissen wir, dass sich eine Radiowelle (oder allgemeiner em-Wellen) in Luft mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Mit der Formel $\lambda \cdot f = c$ können wir die Wellenlänge ausrechnen. Wir erhalten

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{1 \cdot 10^8 \text{Hz}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{1 \cdot 10^8 1/\text{s}} = 3 \text{m}.$$

Lösung der Aufgabe 3: Wellengrössen

a) (K1) Mögliche Antworten sind: die Frequenz, die Periodendauer, die Wellenlänge, die Wellengeschwindigkeit, die Amplitude und der Auslenkungsvektor. Vier dieser sechs Begriffe geben die volle Punktzahl.

b) (K2) **Frequenz** Die Frequenz beschreibt die Anzahl der Schwingungen des Auslenkungsvektors pro Sekunde an einem festen Ort der Welle.

Die **Periodendauer** ist die Zeit, nach der sich die Schwingung des Auslenkungsvektors an einem festen Ort der Welle wiederholt.

Die **Wellenlänge** ist der Abstand zwischen zwei Orten, an denen die Auslenkungsvektoren die gleiche Länge und die gleiche Richtung haben.

Die **Wellengeschwindigkeit** ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine Welle ausbreitet.

Die **Amplitude** ist die Länge der grösstmöglichen Auslenkung der Auslenkungsvektoren der Welle.

Der **Auslenkungsvektor** gibt die Auslenkung der Welle an zu einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Ort. Der Auslenkungsvektor ist eine gerichtete Grösse, ein Vektor.

A.3 Test für Kapitel 2

Hilfsmittel: Gebastelte Modelle.

Aufgabe 1: Informationsübertragung Welche zwei grundlegenden Arten von Informationsübertragung haben Sie kennengelernt? Was ist der wesentliche Unterschied?

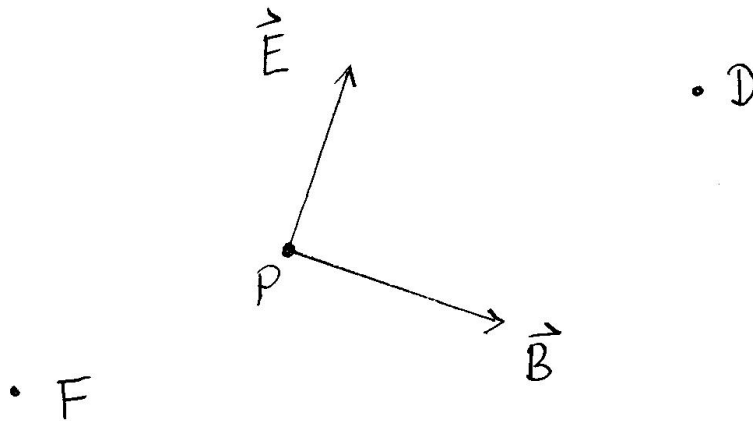


Abbildung 37:

Aufgabe 2: Feldvektoren der ebenen em-Welle Die Abbildung 37 zeigt eine ebene em-Welle von hinten, die senkrecht in die Zeichenebene hineinläuft. Die Welle wird zu einer festen Zeit betrachtet. Die Blattebene liegt senkrecht zu Ausbreitungsrichtung. Der Punkt D liegt in der gleichen Ebene wie der Punkt P. Der Punkt F liegt in einer Ebene, die um eine halbe Wellenlänge nach hinten verschoben ist.

Sie kennen die Lage des elektrischen und des magnetischen Feldvektors im Punkt P. Zeichnen Sie die elektrischen und die magnetischen Feldvektoren an den beiden Punkten D und F. Nehmen Sie auch Ihr Modell zu Hilfe.

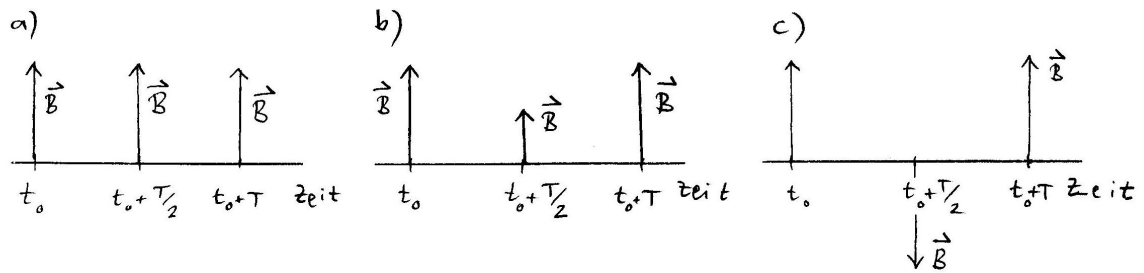


Abbildung 38:

Aufgabe 3: Sind das Vektoren einer ebenen Welle? Untersuchen Sie die Abbildung 38. Es wird das zeitliche Verhalten einer ebenen Welle an einem festen Ort der Welle gezeigt. Dabei ist t_0 irgend ein willkürlicher Zeitpunkt und T die Periodendauer der Schwingung der Feldvektoren an einem festen Ort. Können die in a) b) c) gezeigten Feldvektoren solche einer ebenen em-Welle sein? Begründen Sie Ihre Antwort!

Aufgabe 4: Behauptung Ein Bekannter von Ihnen behauptet: *”Wenn man bei einer ebenen em-Welle den elektrischen Feldvektor kennt, dann kennt man auch die Richtung des magnetischen Feldvektors. Über die Länge des magnetischen Feldvektors hingegen, kann man nichts aussagen.”*

Bewerten Sie diese Aussage. Versuchen Sie die Aussage noch etwas präziser zu formulieren, damit Sie auch wirklich mit Ihrem Wissen argumentieren können.

A.4 Lösungen zum Test für Kapitel 2

Lösung der Aufgabe: Informationsübertragung (K1) Die zwei Arten der Informationsübertragung sind

- (1) der Materietransport
- (2) und die Übertragung mit einer Welle.

(K2) Der wesentliche Unterschied ist, dass bei einer Welle kein Transport von Materie stattfindet. In einer Welle pflanzt sich die Auslenkung fort.

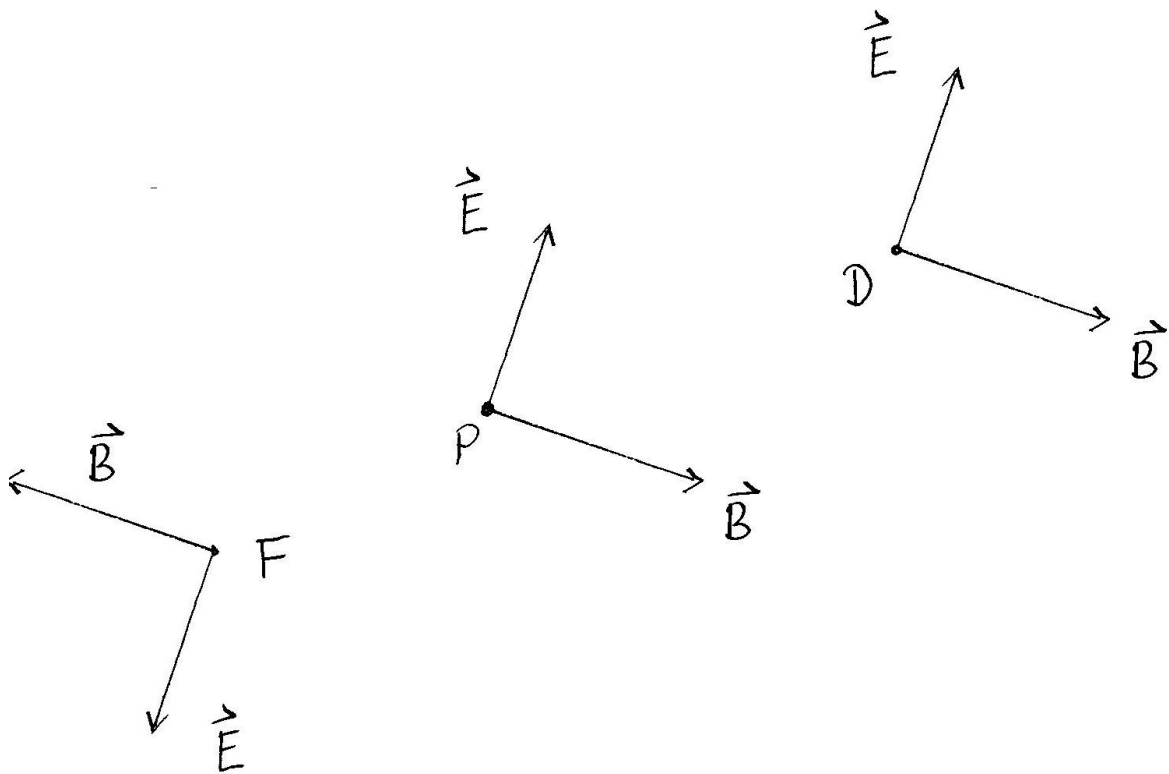


Abbildung 39:

Lösung der Aufgabe 2: Feldvektoren der ebenen em-Welle (K3) In der Abbildung 39 ist die Anordnung der gesuchten Feldvektoren gezeigt. Im Punkt D müssen die beiden Feldvektoren gleich aussehen wie im Punkt P, da sie in der gleichen Ebene liegen. Im Punkt F schauen die Feldvektoren entgegengesetzt zu den Feldvektoren im Punkt P. Die Ebene F ist um eine halbe Wellenlänge zurückversetzt!

Lösung der Aufgabe 3: Sind das Vektoren einer ebenen Welle?

- a) (K3) Nein, das sind keine Feldvektoren einer ebenen Welle. Zum Zeitpunkt $t_0 + T/2$ muss der Feldvektor nach unten zeigen. Die Länge des Feldvektors ist richtig.
- b) (K3) Nein, das sind keine Feldvektoren einer ebenen Welle. Zum Zeitpunkt $t_0 + T/2$ muss der Feldvektor nach unten zeigen. Die Länge des Feldvektors ist zu kurz. Der Feldvektor müsste gleich lang sein, wie die zwei anderen. Oder die zwei äusseren müssten gleich lang sein wie der mittlere.
- c) (K3) Ja, diese drei Feldvektoren können zu einer ebenen Welle gehören. Die zwei äusseren Feldvektoren liegen nämlich zeitlich eine Periodendauer T auseinander und zeigen in die gleiche Richtung und haben die gleiche Länge. Der Feldvektor bei $t_0 + T/2$ hat den gleichen Betrag wie die beiden äusseren und zeigt in die entgegengesetzte Richtung.

Andererseits könnte man auch b) als Welle ansehen, weil es die richtige Periodizität aufweist. Physikalisch ausgedrückt: b) ist eine Welle mit überlagertem homogenem Magnetfeld.

Lösung der Aufgabe 4: Behauptung (K5) Zur präziseren Formulierung: Zuerst muss der Bekannte einmal sagen, dass er die Zeit festhält. Weiter muss er auch sagen, dass er die Vektoren an einem bestimmten Ort, in einem Punkt, untersucht. Ausserdem lässt sich über die Richtung des Vektors nur soviel sagen, dass der magnetische Feldvektor in einem Punkt senkrecht auf dem elektrischen Feldvektor steht. Wenn man die Ausbreitungsrichtung der ebenen Welle kennt, dann kann man die Richtung exakt bestimmen. Über die Länge lässt sich sehr wohl eine Aussage machen. Mit der Formel $E = B \cdot c$ kann man diese exakt berechnen.

B Mediothek, Multimedia für die Schülerinnen und Schüler

Für Wasserwellen

M. Van Dyke, *An Album of Fluid Motion* (Parabolic Press, Stanford, 1997).

Für em-Wellen

P. A. Tipler, *Physik* (Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1991).

J. Grehn, J. Krause, *Metzler Physik* (Schroedel Verlag, Hannover, 1998).

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1993).

Langenscheidts Taschenwörterbuch, Englisch-Deutsch.

Leybold Gebrauchsanweisung 587 55.

C Experimentier- und anderes Material für die Lernenden

Experiment mit Wasserwelle Wassertank oder Wasserwanne in dem Wasserwellen erzeugt werden können. Der Balken wird am besten mit einem Motor bewegt.

Experiment zu ebener em-Welle Die Abbildung 40 zeigt nötigen Bestandteile des Experiments.

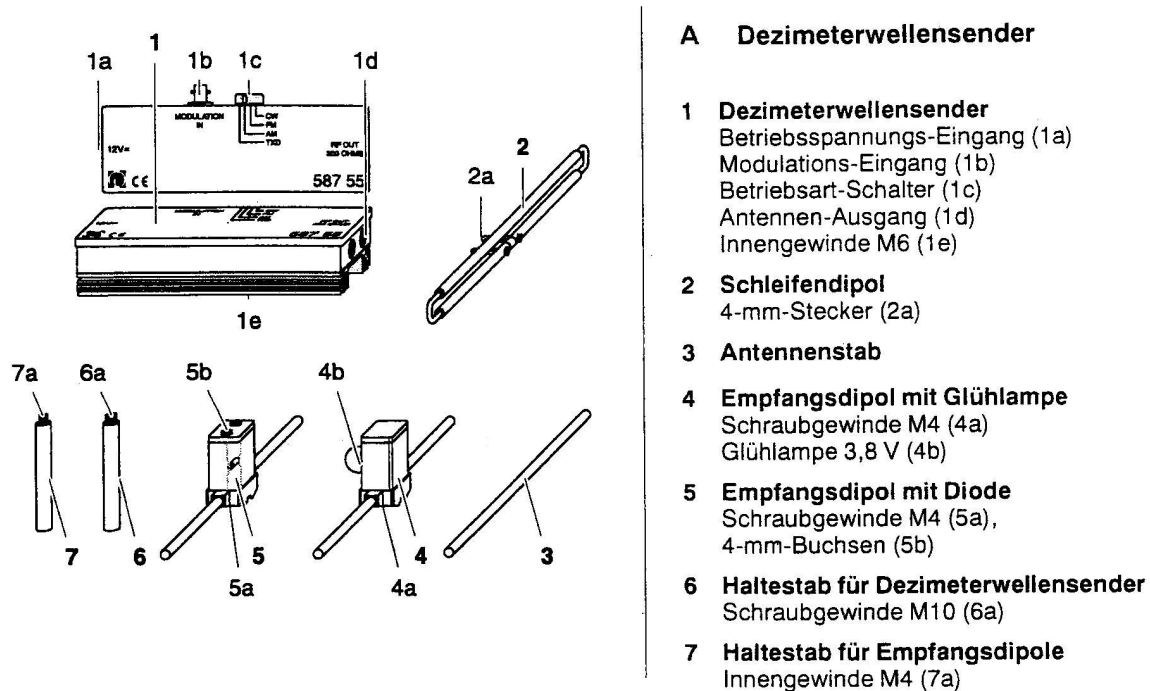


Abbildung 40:

Experiment: Mikrowellensender und Empfänger Mikrowellensender (Trichter, Wellenlänge 2,8cm). Metallblech. Mikrowellensensor (Diode).

Experiment: Thermofaxpapier Mikrowellenofen. Styroporunterlage. Papierhandtücher. Thermofaxpapier.

D Von den Autoren benutzte Quellen

Für Wasserwellen

M. Van Dyke, *An Album of Fluid Motion* (Parabolic Press, Stanford, 1997).

A. Sommerfeld *Mechanik der deformierbaren Medien* (Verlag Harry-Deutsch, Thun-Frankfurt/M., 1992).

Für Em-Wellen

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1993).

H. Baggenstos, P. Leuchtmann, *Skript zur 4. Sem.-Vorlesung, Elektrotechnik IV* (1996).

J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1975).

F. K. Kneubühl, *Repetitorium der Physik* (Teubner, Stuttgart, 1994).

Leybold Gebrauchsanweisung 587 55.

H. Meinke, F. W. Gundlach, *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik* (Springer, Berlin, 1968).

Bilder vom Internet

Abbildung 1: <http://de.wikipedia.org/wiki/Heinrich-Hertz-Turm>

Abbildung 4: <http://www.nrao.edu/whatisra/images/hertz.jpg>

Abbildung 7: <http://www.jcmax.com/images/maxwell.jpg>

Abbildung 31: <http://www.ferienhof-weber.de/images/schaukel.jpg>