

Elektromagnetische Schwingungen sind die Grundlage für Wellen und damit die Basis für jede Form von drahtloser elektrischer Kommunikation (Funk, WLAN, Bluetooth, ...). Im Grundexperiment untersuchen wir anknüpfend an das letzte Kapitel das Entladen eines Kondensators über eine Spule. Warum die Kombination dieser beiden Bauteile "Schwingkreis" heißt, wird bei der Durchführung des Experiments klar.

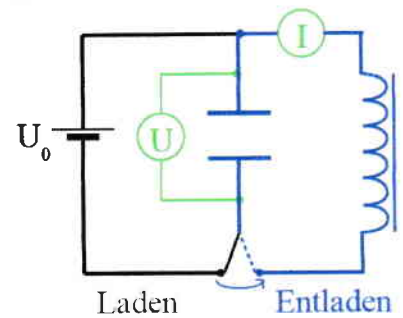
Beschreibe zunächst den Aufbau des Experiments. Beschreibe anschließend die Anzeige der Messgeräte beim Laden und beim Entladen des Kondensators.

5. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

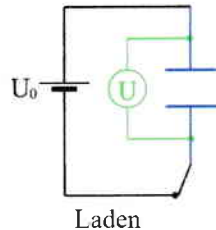
5.1 Gedämpfter Schwingkreis - Prinzip

Aufbau

Ein Schwingkreis (blau) besteht aus einem Kondensator und einer Spule, die in Reihe geschaltet werden.

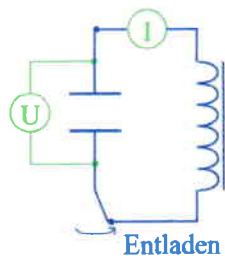


Ladevorgang



Zunächst wird der Kondensator alleine mit einer Stromquelle aufgeladen
→ Anzeige des Voltmeter = Lade- bzw. Kondensatorspannung

Entladevorgang



Legt man den Schalter um, wird der Kondensator über die Spule. Dabei kommt es zu einer Schwingung. Spannung und Stromstärke wechseln mehrfach das Vorzeichen. Dabei werden Maxima und Nullpunkte um 90° phasenverschoben erreicht ($U = U_{\max} \leftrightarrow I = 0$ und umgekehrt).

12 Schwingungen und Wellen 5.1 Schwingung Prinzip

Die beobachtete Schwingung lässt sich in 4 unterschiedliche Phasen einteilen, die sich fortlaufend wiederholen.

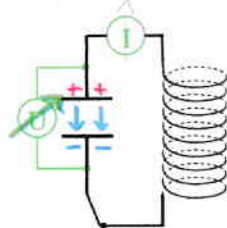
a) Markiere in den 4 Bildchen zunächst jeweils prägnante Zeigerausschläge der Messgeräte, so dass sich insgesamt ein vollständiger Zyklus ergibt. Beginne beim aufgeladenen Kondensator.

b) Stelle die Situation am Kondensator mit Ladungen und mit Pfeilen für das elektrische Feld dar.

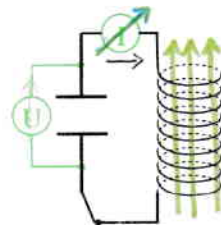
c) Stelle die Situation an der Spule mit einem Pfeil für Stromfluss und mit Pfeilen für das magnetische Feld dar.

d) Erkläre mit den Vorgängen im Kondensator und in der Spule das Prinzip des Schwingkreises insgesamt.

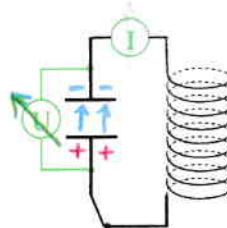
4 Phasen der Schwingung



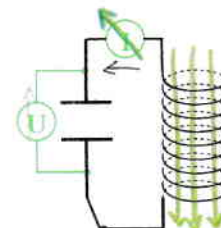
Der Kondensator ist (nach dem Aufladen) voll. Der Stromfluss setzt gerade erst langsam ein, da die Induktionsspannung der Spule (Selbstinduktion) dem Kondensator entgegenwirkt.



Der Strom hat sein Maximum erreicht und wird durch die Induktivität der Spule aufrecht erhalten, obwohl der Kondensator bereits komplett entladen ist.



Durch den weiterlaufenden Strom wurde der Kondensator aufgeladen, allerdings in umgekehrter Richtung. Der Strom hat aufgehört, da das Spulenfeld abgebaut ist.



Der geladene Kondensator ③ konnte wieder einen Stromfluss durch die Spule (langsam) aufbauen, der sein Maximum erreicht, wenn der Kondensator entladen ist.

12 Schwingungen und Wellen 5.1 Schwingung Prinzip

Sage vorher, was sich am Ablauf des Experiments ändert, wenn man die Kapazität des Kondensators bzw. die Induktivität der Spule vergrößert und begründe Deine Vorhersage mit physikalischen Argumenten.
Stelle auch Vermutungen über den Einfluss der verwendeten Versorgungsspannung U_0 an.

Die Formel für die Schwingungsdauer wird hier nicht hergeleitet, sondern nur mitgeteilt.

Vergleiche die Aussage der Formel mit Deinen Vorhersagen im vorigen Abschnitt.

Berechne die Schwingungsdauer für unser Experiment (hier $L = 630 \text{ H}$, $C = 100 \mu\text{F}$) und vergleiche mit Deiner Beobachtung.

Zur Veranschaulichung vergleicht man die elektromagnetische Schwingung häufig mit der mechanischen Schwingung eines Fadenpendels.

a) Welche Größen bei der Pendelschwingung lassen sich mit der Spannung bzw. der Stromstärke beim Schwingkreis vergleichen?
 b) Zeichne 4 Phasen der Pendelschwingung in der entsprechenden Reihenfolge wie beim Schwingkreis auf Folie 2 und formuliere die Entsprechungen zwischen den beiden Modellen für jede Phase in Worten.

Selbst-Check:

- Aufbau eines Schwingkreises
- Verhalten eines Schwingkreises
- Einflussgrößen, Thomsonsche Gleichung
- Vergleich mit Fadenpendel

Einfluss der Bauteilwerte (theoretische Argumentation)

- Eine größere Kapazität lässt den Kondensator mehr Ladung speichern, dann sollte die Entladung länger dauern.
- Eine größere Induktivität der Spule verzögert die Entstehung des Stromes stärker, also ebenso größere Periodendauer.
- Mehr Ladungsspannung führt zu größerer Ladungsmenge aber auch mehr Stromstärke, das könnte sich aufheben.

Thomsonsche Schwingungsgleichung

Die Frequenz eines Schwingkreises lässt sich berechnen mit der Formel:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$


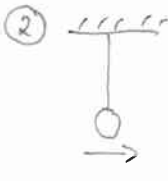

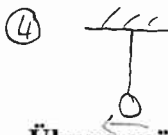
Dabei ist: L = Induktivität der Spule, C = Kapazität des Kondensators

Größere Induktivität und Kapazität machen kleinere Frequenz, also größere Periodendauer ($f = \frac{1}{T}$) ✓

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{630 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}}} = 1,6 \text{ s} \quad \checkmark$$

Training: Vergleich mit einer mechanischen Pendelschwingung

offgeladener Kondensator statisch \leftrightarrow Pendel ausgelenkt
 I: Strom durch Spule dynamisch \leftrightarrow Pendel bewegt sich

- b) ①  • Höhenenergie bleibt gespeichert, bis man Pendel loslässt \leftrightarrow elektrische Energie bleibt gespeichert, bis man Schalter umlegt
- ②  • maximale Geschwindigkeit bedeutet maximale kinet. Energie, dabei $E_{\text{pot}} = 0 \leftrightarrow$ maximale Stromstärke bedeutet maximale magnet. Energie, dabei $E_{\text{el}} = 0$
- ③  • maximale Höhenenergie auf der anderen Seite \leftrightarrow maximale elektrische Energie umgepolt
- ④  • wie ② nur umgekehrte Richtung

Übungsmöglichkeiten:

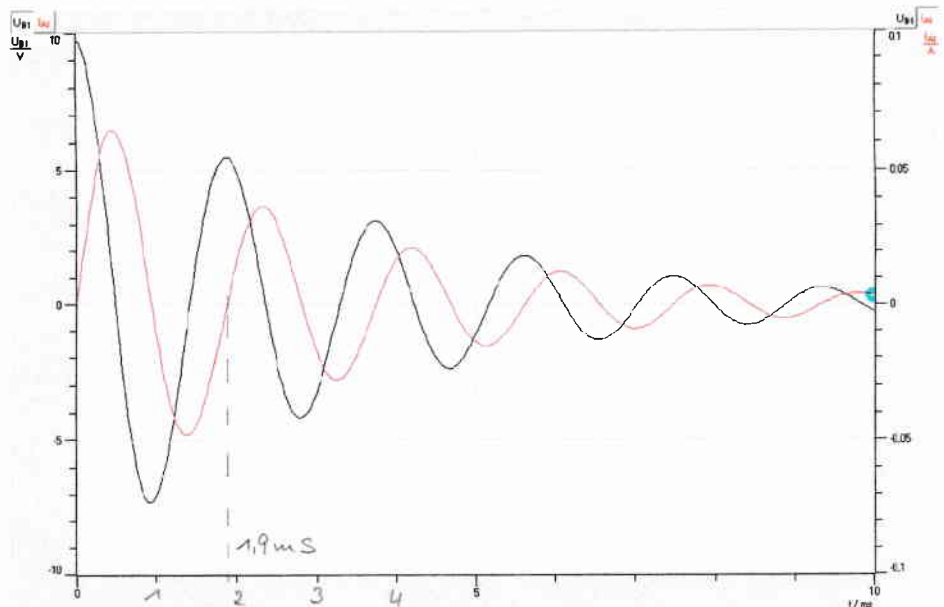
Auch wenn es sich in diesem Kapitel um einen gedämpften Schwingkreis handelt, passen auf Leifiphysik gerade die grünen Aufgaben unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Schwingungen - Elektromagnetischer Schwingkreis ungedämpft Aufgaben besonders gut zum Konzept der Stunde.

In Experiment der letzten Stunde ersetzen wir die Messgeräte durch Sensoren eines Dataloggers. Damit können wir die Messgrößen Spannung und Stromstärke auch in ihrem zeitlichen Verlauf messen und darstellen (siehe Abb.). Spule und Kondensator sind deutlich kleiner als beim letzten Mal.

Vergleiche die beiden Messkurven mit der Beschreibung des Vorganges in der letzten Stunde.

Ermittle aus den Messkurven die Periodendauer der Schwingung. Vergleiche diesen experimentellen Wert mit dem theoretischen Wert, der sich aus der Thomson-Gleichung ergibt (hier: $C = 2,3 \mu\text{F}$, $L = 39,5 \text{ mH}$).

5.2 Schwingkreis - Messkurven



Auswertung:

Spannung- und Stromkurve zeigen jeweils Schwingungen, die um eine Viertel Periode phasenverschoben erfolgen (Strom maximal \rightarrow Spannung 0 und umgekehrt). Die Amplituden nehmen mit der Zeit ab (Energieverlust, Widerst.).

$$T = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \sqrt{39,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}}} = \underline{\underline{1,9 \text{ ms}}}$$

12 Schwingungen und Wellen 5.2 Schwingkreis Messkurven

1

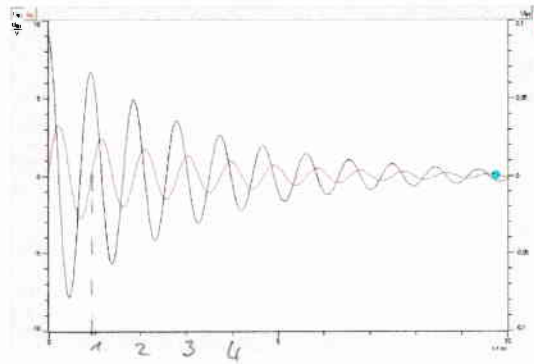
Wir variieren jetzt unseren Schwingkreis durch Verwendung eines kleineren Kondensators bzw. durch Einbringen eines Eisenkerns in die Spule.

a) Erläutere, wie sich die Periodendauer der Schwingung verändert, wenn man die Kapazität des Kondensators auf ein Viertel reduziert.

b) Erläutere, wie sich das Einbringen eines Eisenkerns in die Spule auf die Induktivität und die Periodendauer auswirkt.

An dieser Stelle bietet sich auch die Simulation auf Leifphysik an unter **Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Schwingungen - Versuche - Elektromagnetischer Schwingkreis (Simulation)**.

kleinerer Kondensator (Kapazität geviertelt)

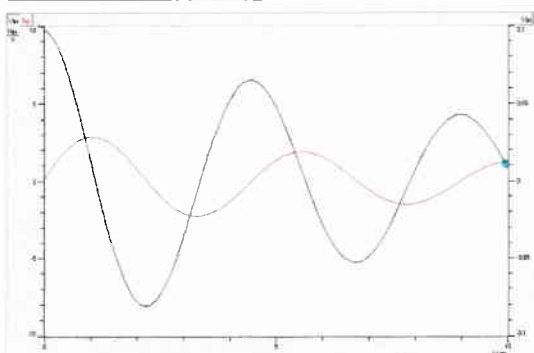


$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

Kapazität auf ein Viertel

$\rightarrow T$ auf $\sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$ des ursprünglichen Wertes

Eisenkern in der Spule



mit Eisenkern

$\rightarrow L$ größer

$\rightarrow T$ größer

12 Schwingungen und Wellen 5.2 Schwingkreis Messkurven

2

Ein Kondensator von $50 \mu\text{F}$ und eine Spule mit 200 mH bilden einen Schwingkreis. Der Kondensator wird zunächst mit $5,0 \text{ V}$ geladen und dann mittels eines Schalters mit der Spule verbunden.

a) Beschreibe die Verläufe von Spannungs- und Stromkurve.

b) Berechne die Schwingungsdauer.

c) Nun ergänzt man den Schwingkreis trickreich so, dass bei der Schwingung keine Energie verloren geht (siehe nächste Folie). Berechne für diesen Fall die Amplitude der Stromkurve.

d) Skizziere Spannungs- und Stromkurve für c) in ein gemeinsames Diagramm für zwei volle Schwingungen.

e) Wie ändert sich die Frequenz, wenn man einen Kondensator mit $100 \mu\text{F}$ Kapazität verwendet.

Training: Berechnungen am Schwingkreis

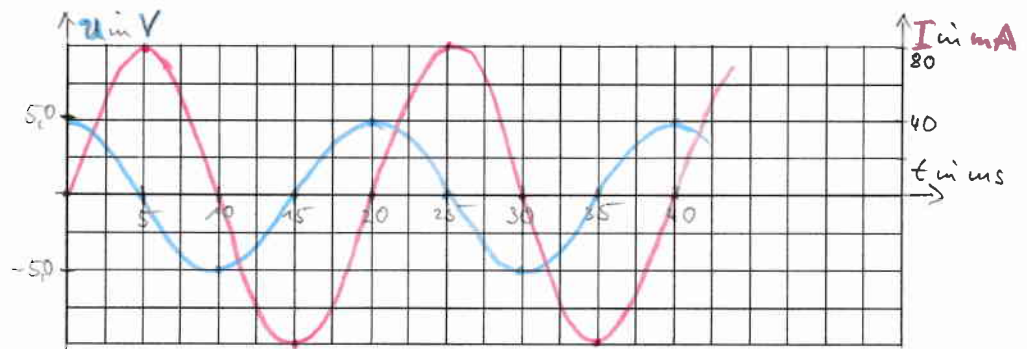
a) Spannung- und Stromkurve zeigen jeweils Schwingungen, die um eine Viertel Periode phasenverschoben erfolgen.

$$b) T = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \sqrt{0,2 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}}} = 0,0199 \text{ s} = \underline{\underline{20 \text{ ms}}}$$

$$c) E_{\text{sp}} = E_{\text{c}}$$

$$\frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} C U^2 \quad | : \frac{1}{2} \quad | : L \quad | \sqrt{\quad}$$

$$I = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot U = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}}}{0,2 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}}} \cdot 5,0 \text{ V} = 0,079 \text{ A} = \underline{\underline{79 \text{ mA}}}$$



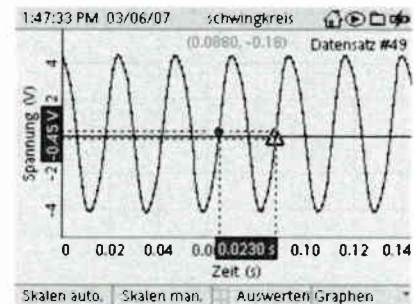
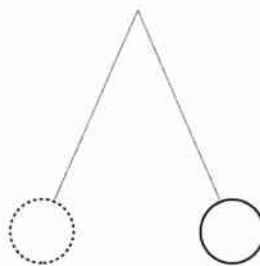
e) $100 \mu\text{F}$ statt $50 \mu\text{F} \rightarrow C$ doppelt so groß
 $\rightarrow T$ wird $\sqrt{2}$ -mal so groß $\rightarrow f$ wird $\frac{1}{\sqrt{2}}$ mal so groß (kleiner)

12 Schwingungen und Wellen 5.2 Schwingkreis Messkurven

3

Wenn im Schwingkreis keine Verluste (durch Widerstände) auftreten würden, wäre der Stromkreis "ungedämpft" und dieser würde mit gleichbleibenden Amplituden immer weiter schwingen. Das ist technisch nicht realisierbar. Der Trick lässt sich aus dem mechanischen Analogon finden: dort muss man nur im richtigen Moment anschubsen (also Energie zuführen), damit die Schwingung immer weiter geht. In der elektrischen Variante besteht die Herausforderung darin, den richtigen Moment zu finden. Hierzu detektiert man mit einer zweiten Spule induktiv die Phase der Schwingkreisspule und steuert mit dieser Information die Energiezufuhr (siehe Abb.).

Ungedämpfter Schwingkreis

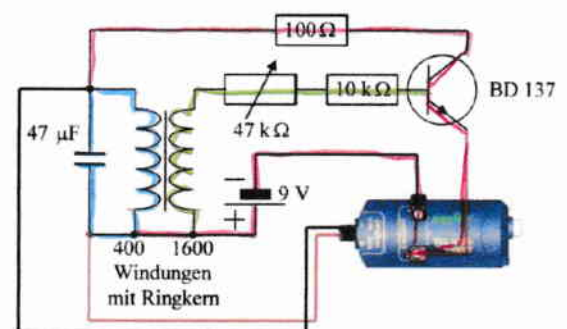


jetzt entgegengesetzt anschubsen

Meißner-Schaltung

Schwingkreis
 Energiezufuhr
 Phasendetektion

besen Farben tauschen



Selbst-Check:

- Messkurven Strom und Spannung
- Variation von Kapazität und Induktivität
- ungedämpfter Schwingkreis

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Schwingungen - Elektromagnetischer Schwingkreis gedämpft Aufgaben eignen sich insbesondere die quantitativen Aufgaben auf Grundkursniveau zum Trainieren und Vertiefen dieser Stunde.

12 Schwingungen und Wellen 5.2 Schwingkreis Messkurven

4

Elektromagnetische Wellen sind die Grundlage für jede drahtlose Informationsübertragung. Wie auch in der Mechanik werden solche Wellen stets von Schwingungen erzeugt (z.B. Saitenschwingung - Schallwelle). Im Einführungsversuch wird die Schwingung einer Spule auf eine andere übertragen, das kennen wir vom Trafo.

Antennen erleichtern die Ablösung von Wellen vom Schwingkreis und auch deren Empfang. Antennen sind tatsächlich selbst Schwingkreise, die nur extrem reduziert sind (siehe Bildfolge). Erläutere, wie sich durch Reduktion von Windungszahl und Plattenfläche die Frequenz ändert.

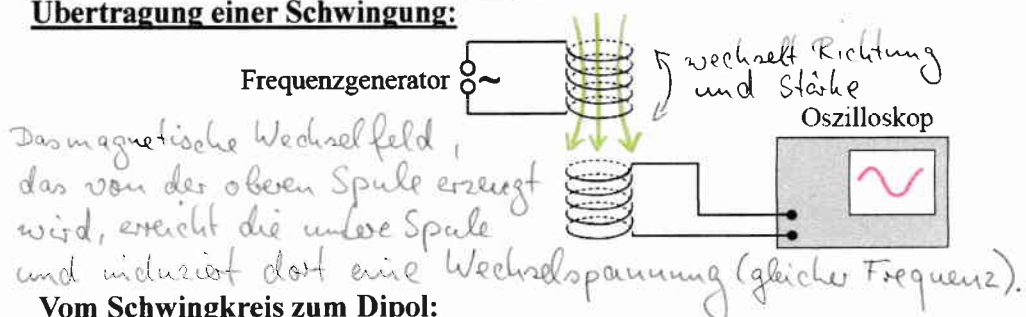
Die folgenden Versuche zum Empfang von Wellen führen wir alle mit reduzierten Schwingkreisen zum Empfang durch. Beschreibe Deine Beobachtung.

Die Stromverteilung im Dipol wird uns durch Lämpchen angezeigt, die wir in den Dipol einbauen. Die Spannungsverteilung können wir durch eine Glühlampe sichtbar machen. Gib an, wo die Stromstärke und wo die Spannung groß ist.

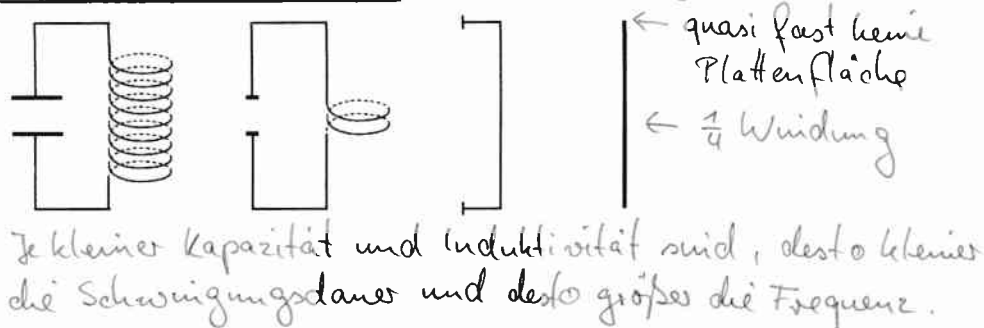
Stromstärke und Spannung an jedem einzelnen Punkt des Dipols sind allerdings nicht konstant, sondern führen jeweils eine Schwingung durch, das haben wir in den letzten beiden Kapiteln zum Schwingkreis kennengelernt. Wir können eine volle Schwingung wieder in vier Phasen unterteilen, in denen beide Größen jeweils zwischen ihren Maximalwerten und Null variieren. Beachte: die x-Achse ist nicht die Zeit, sondern die Position auf der Antenne.

5.3 Wellenausbreitung am Dipol

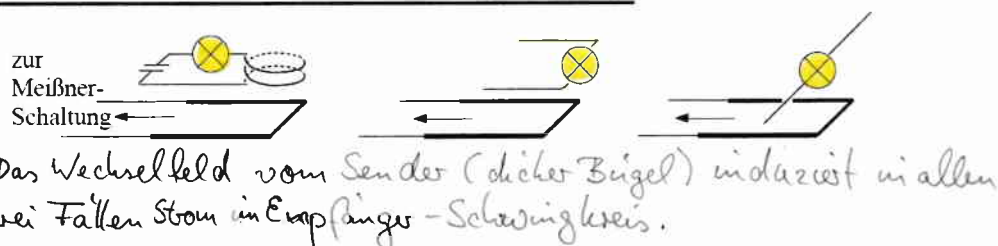
Übertragung einer Schwingung:



Vom Schwingkreis zum Dipol:



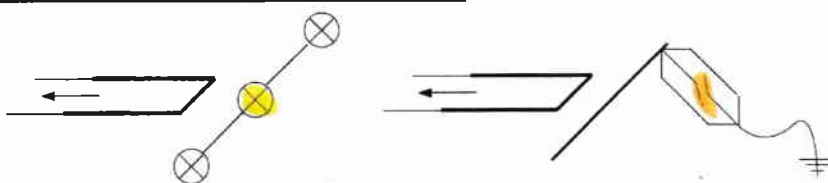
Grundversuch mit dem Dezimeterwellensender:



12 Schwingungen und Wellen 5.3 Wellenausbreitung am Dipol

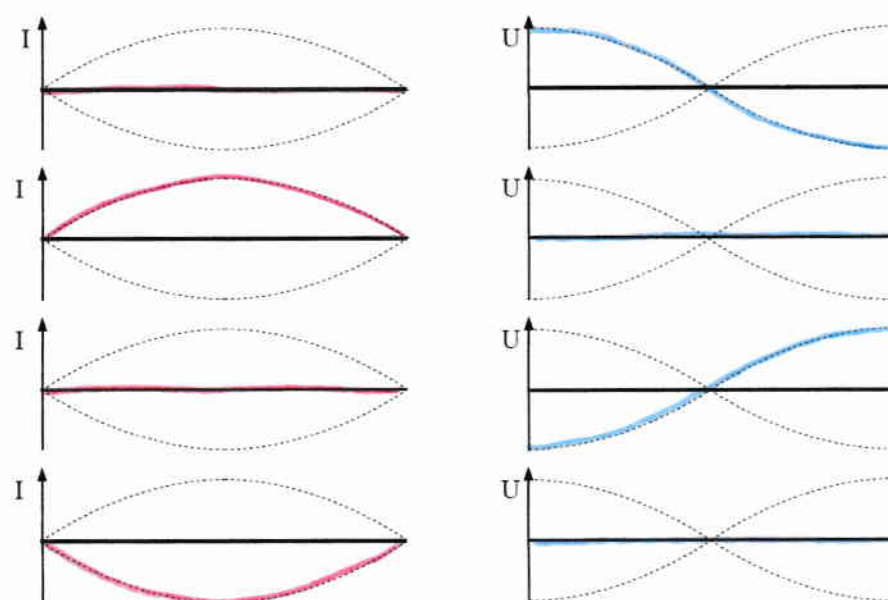
1

Strom und Spannung auf dem Dipol



Die Stromstärke ist in der Mitte des Dipols am größten, die Spannung am Rand.

Schwingungsphasen auf dem Dipol



12 Schwingungen und Wellen 5.3 Wellenausbreitung am Dipol

2

Die Abstrahlung der Welle in den Raum ist eine durchaus komplizierte Angelegenheit (siehe Bildchen). In einer Abfolge wird diese hier Schritt für Schritt erklärt. Dabei zeigt die erste Spalte nur das Magnetfeld, die zweite nur das elektrische Feld und die dritte beide Felder in einer gemeinsamen Zeichnung. Die jeweils auftretende Stromstärke (1. Spalte) und die jeweils auftretende Ladungsverteilung/Spannung (2. Spalte) ergeben sich aus den vier Phasen auf der vorigen Folie. Diese erzeugen wiederum die dargestellten Feldlinien, die sich dann vom Dipol in den Raum ablösen.

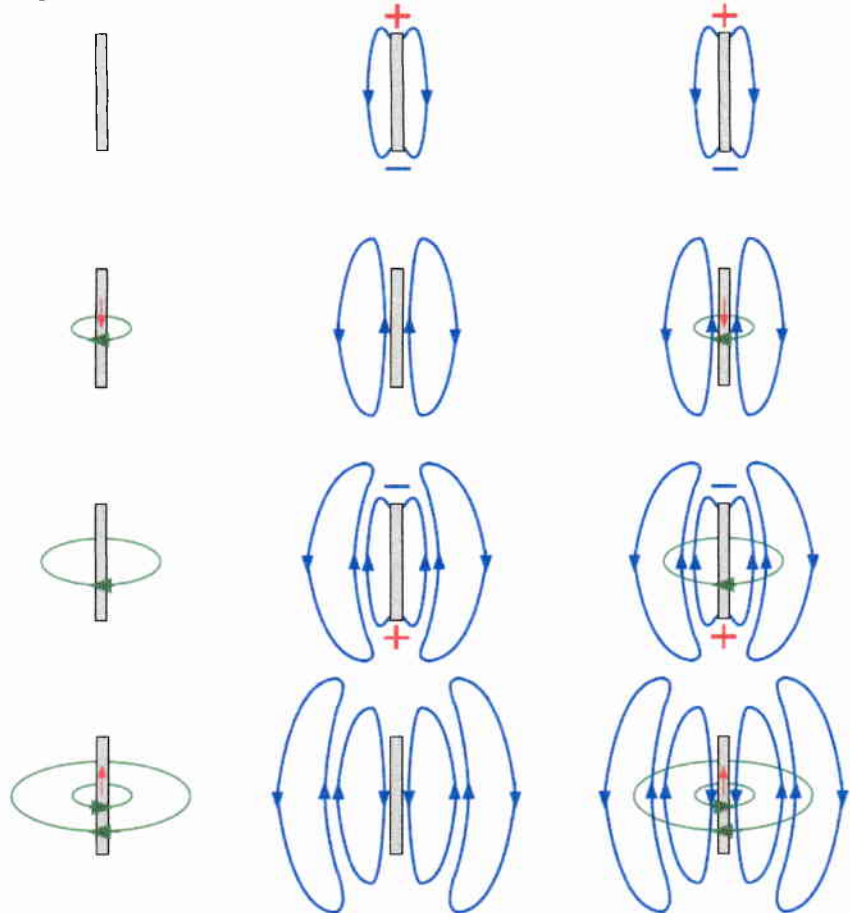
Ein elektrisches bzw. magnetisches Feld aufgrund einer Ladungsverteilung oder eines Stromes füllt nicht sofort den umgebenden Raum aus. Sie müssen sich erst in diesen (mit Lichtgeschwindigkeit) ausbreiten.

Abstrahlung der Welle in den Raum

Magnetfeld allein

elektrisches Feld allein

beide Felder



12 Schwingungen und Wellen 5.3 Wellenausbreitung am Dipol

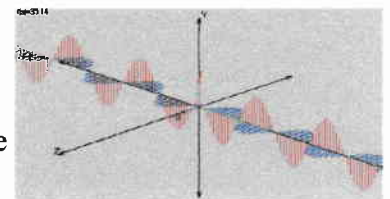
3

Aus der Entwicklung der Felder auf der letzten Folie (auch aus dem Schwingkreiskapitel 5.1) ist ersichtlich, dass sich die Maxima und Minima der Feldstärken zeitlich abwechseln. Dies gilt allerdings nur in unmittelbarer Nähe zum Dipol (Nahfeld), da dort die Ströme und Ladungen mit den Feldern interagieren. Weiter entfernt (Fernfeld) treten dagegen elektrisches und magnetisches Feld synchron in Erscheinung (siehe Abb.), die Erklärung hierfür liegt außerhalb unserer Möglichkeiten.

Die Länge einer Antenne muss auf die Frequenz abgestimmt sein (beim Sender wie beim Empfänger). Der Zusammenhang ergibt sich aus der Stromverteilung (siehe 2. Folie).

Ausbreitung der Welle im Fernfeld

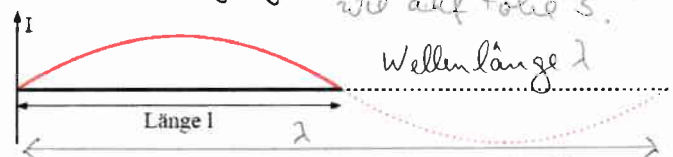
Weiter entfernt vom (hier senkrechten) Dipol laufen elektrisches und magnetisches Feld phasengleich (gleichzeitig maximal bzw. minimal). Die Zeichnung zeigt die Ausbreitung in x-Richtung. Sie erfolgt in gleicher Weise in alle Richtungen der (hier xz-)Ebene, die senkrecht zum Dipol (hier y) verläuft.



Die Berge wandern mit Lichtgeschwindigkeit nach außen. An jedem Raumpunkt vollführen elektr. und magn. Feld also eine Schwingung. Felder senkrecht aufeinander wie auf Folie 3.

Dipollänge

$\frac{\lambda}{2}$ - Dipol



In der Grundschnung entspricht die Dipollänge der ...halben... Wellenlänge. Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit hängen zusammen (siehe 11. Jgst):

$$c = \lambda \cdot f$$

Selbst-Check:

- Schwingkreis und Dipol
- Schwingung und Welle
- Spannungs- und Stromverteilung auf dem Dipol
- Ausbreitung in den Raum

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Wellen - Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Aufgaben eignen sich insbesondere die Aufgaben "Schwingkreis und Wellen" sowie "Strahlungscharakteristik beim Dipol" zum Vertiefen dieser Stunde.

12 Schwingungen und Wellen 5.3 Wellenausbreitung am Dipol

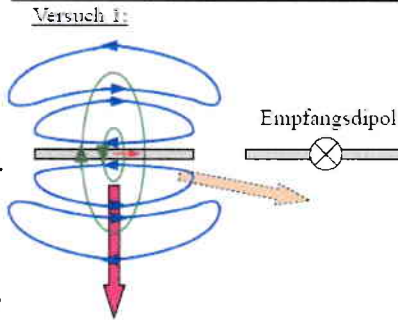
4

Wie alle Wellen können auch elektromagnetische Wellen an Hindernissen reflektiert werden (die bekannteste Welle aus diesem Bereich ist das Licht und dort ist Reflexion ein sehr geläufiges Phänomen, das wir täglich nutzen). In diesem Versuch stellen wir Sende- und Empfangsdipol in Längsrichtung nebeneinander, bei der zweiten Variante platzieren wir eine Wand aus Metall davor. **Beschreibe und erkläre Deine Beobachtungen (nutze hierzu Kap. 5.3 Folie 3).**

In diesem Versuch stehen Sende- und Empfangsdipol parallel zueinander. Wir bewegen den Empfangsdipol zwischen dem Sender und einer Wand aus Metall hin und her. **Notiere Deine Beobachtung unter die Zeichnung.** Für das Verständnis dieses Phänomens müssen wir auf der nächsten Folie erst mal die Begriffe "Reflexion" und "Interferenz" aus der 11. Jahrgangsstufe wiederholen.

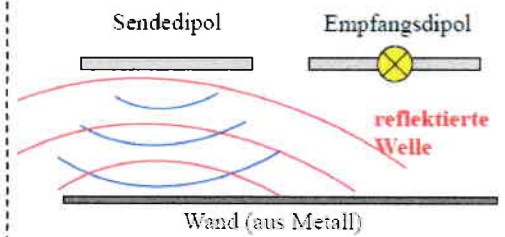
5.4 Interferenz mit Dezimeterwellen

Grundversuch zur Reflexion:



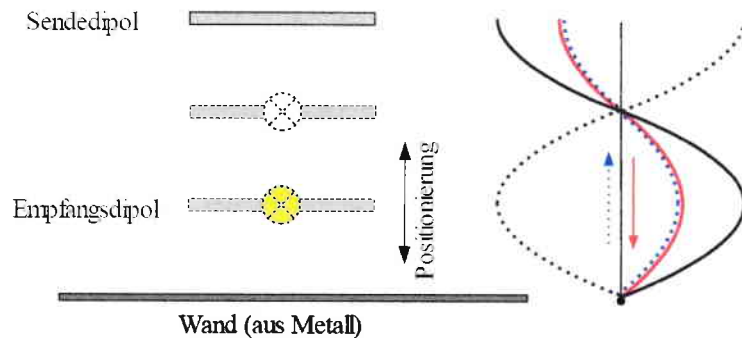
Ausbreitung quer zur Antenne, nicht längs → kein Empfang

Versuch 2:



Welle vom Sender wird an Wand reflektiert → Welle erreicht Sender

Stehende Welle:



An manchen Stellen ist der Empfang sehr gut (Maximum), an anderen Stellen dagegen schlecht (Minimum).

12 Schwingungen und Wellen 5.4 Interferenz (D)

1

Das Grundprinzip für Interferenz besteht aus zwei Aussagen:

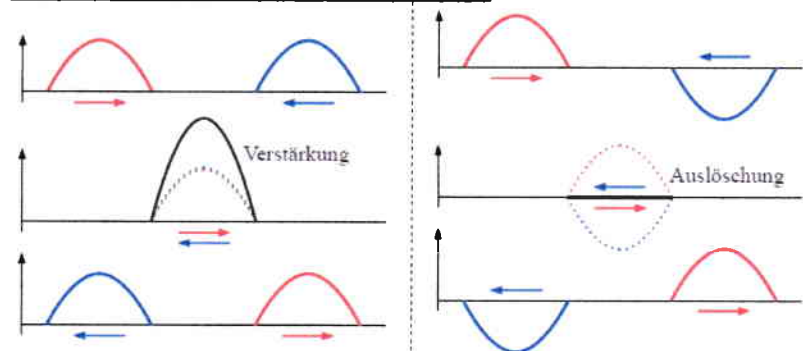
Wenn sich Wellen begegnen, durchlaufen sie sich ohne Störung. Dabei addieren sich an jedem Ort und zu jeder Zeit ihre Auslenkungen.

Die 1. Aussage besagt, dass Wellen nicht kaputtgehen, wenn sie aufeinandertreffen (im Gegensatz zu z.B. Autos). Die 2. Aussage besagt, dass die Wellen während des Treffens ein gemeinsames Konstrukt bilden. **Zeichne jeweils die Gesamtwellen während und nach der Begegnung.** Bei der Reflexion gibt es je nach Medium und Wellenart zwei unterschiedliche Fälle, die hier dargestellt sind. Sie werden in Anlehnung an die Seilwelle als Reflexion "am festen Ende" oder "am losen Ende" bezeichnet.

Am festen Ende kehrt ein Berg als Tal zurück, am losen Ende kehrt ein Berg als Berg zurück.

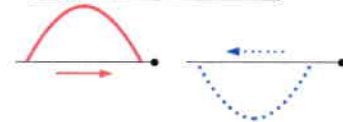
Zeichne in beiden Fällen die entstehende Gesamtwellen ein.

Grundlagen Interferenz (Überlagerung):



Grundlagen Reflexion

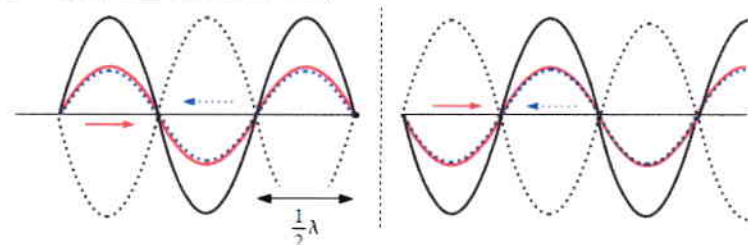
Reflexion am festen Ende



Reflexion am losen Ende



Interferenz durch Reflexion:



Schau Dir das auf jeden Fall als Animation auf Leifiphysik an unter Elektrizitätstheorie – Elektromagnetische Wellen – Stehende Welle (Simulation)

12 Schwingungen und Wellen 5.4 Interferenz (D)

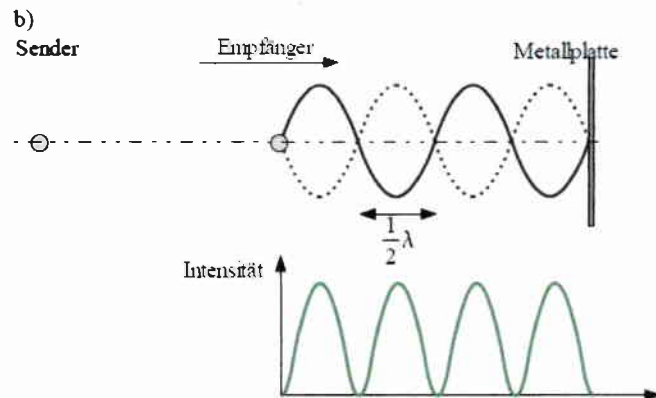
2

Nachdem wir die Beobachtung in unserem Experiment (Folie 1) erklären können, passt diese alte Abituraufgabe (GK By 2000-II-2) zur Vertiefung des Experiments: Ein Sende- und Empfangsdipol liegen parallel zueinander. Die ausgesandte Strahlung hat die Wellenlänge 2,75 cm.

- a) Berechne die Sendefrequenz.
 b) Stelle [die Gesamtwellen in sowie] die vom Empfänger nachgewiesene Intensität unter der Zeichnung im Bereich von 5,5 cm bis 0 cm vor der Platte graphisch dar und erläutere den Verlauf (das mit der Intensität haben wir noch gar nicht besprochen, sie ergibt sich aus der Amplitude der Gesamtwellen).
 c) Nun wird die Metallplatte parallel zu Sender und Empfänger angeordnet. Wird der Empfänger parallel zur Platte verschoben, so beobachtet man, dass die Intensität schwankt. Erkläre an Hand einer Skizze das Zustandekommen dieser Erscheinung.

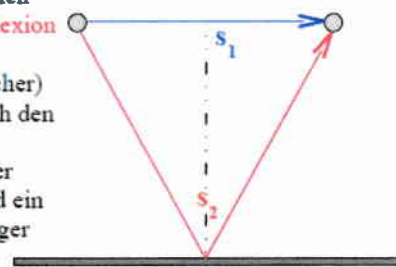
Training: Strahlung auf Metallplatte

$$a) \quad c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{2,75 \cdot 10^{-2} m} = 10,9 \text{ GHz}$$



Durch Interferenz von einlaufender und reflektierter Welle entsteht vor der Wand eine stehende Welle. Knoten (minimaler Empfang) und Bäuche (maximaler Empfang) wechseln ab.
 Anmerkung: Die Intensität enthält als Quadrat der Stromstärke, ist also immer positiv.

- c) Die elektromagnetischen Wellen gelangen **direkt** und über **Reflexion** zum Empfangsdipol. Auslöschungen (Empfangslöcher) ergeben sich dann, wenn durch den Wegunterschied sowie einem Phasensprung von 180° bei der Reflexion immer ein Berg und ein Tal gleichzeitig beim Empfänger eintreffen.



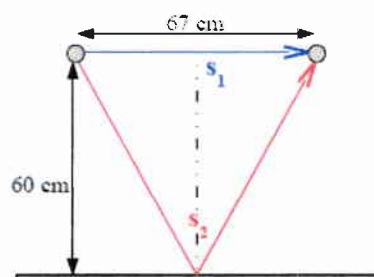
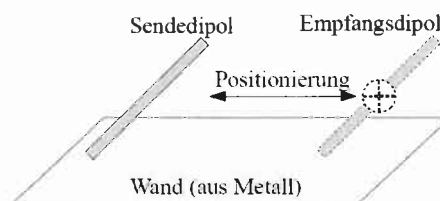
12 Schwingungen und Wellen 5.4 Interferenz (D)

3

Hier stellen wir die letzte Teilaufgabe von Folie 3 in einem Experiment nach. Dabei suchen wir nach der ersten Position des Empfangsdipols, bei dem eine Auslöschung (minimaler Empfang) auftritt.

- a) Berechne die Wellenlänge aus der Sendefrequenz 434 MHz.
 b) Skizziere die Geometrie der Anordnung in einer Seitenansicht und trage die gemessenen Abstände ein. Berechne daraus den Wegunterschied zwischen "direktem Weg" und "Reflexion an Metallwand".
 c) Erläutere, weshalb die Werte in a) und b) im scheinbaren Widerspruch zur Beobachtung stehen und finde eine Erklärung auf Folie 2.

Ein kniffliges Experiment zum letzten Teil der Abituraufgabe



$$\Delta s = s_2 - s_1$$

$$\frac{1}{2} s_2 = \sqrt{(60 \text{ cm})^2 + (33,5 \text{ cm})^2} = 68,7 \text{ cm}$$

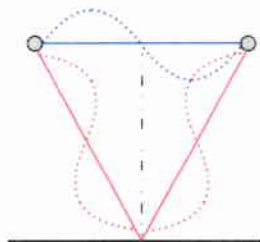
$$\Delta s = 2 \cdot 68,7 \text{ cm} - 67 \text{ cm} = 70,4 \text{ cm}$$

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{434 \cdot 10^6 \frac{1}{s}} = 69 \text{ cm}$$

Der Wegunterschied entspricht ziemlich genau einer ganzen Wellenlänge. Dann müssten im Empfangsdipol jeweils zwei Berge bzw. 2 Täler gemeinsam einlaufen und sich verstärken!

Erklärung:

Die Reflexion ist vom Typ „festes Ende“, es findet dort also ein Phasensprung um 180° (halbe Wellenlänge) statt (aus Berg wird Tal und umgekehrt).
 → damit treffen jeweils ein Berg und ein Tal gleichzeitig am Empfänger ein → Auslöschung



Selbst-Check:

- Reflexion
- stehende Welle
- Interferenz
- Experimente

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Wellen - Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Aufgaben eignen sich die Abituraufgaben "Wellenlängenmessung" sowie "Plattenallerlei" (beide leicht). Ambitionierter ist schon "Interferenz von Dipolstrahlung".

12 Schwingungen und Wellen 5.4 Interferenz (D)

4

Im Gegensatz zum letzten Kapitel arbeiten wir hier mit elektromagnetischen Wellen deutlich kleinerer Wellenlänge (cm-Bereich). Hierbei nutzen wir einen anderen Sender (Klystron). In den meisten Versuchen unterstützen Trichter die gerichtete Aussendung und den Empfang der Wellen. **Notiere, welche Materialien Mikrowellen durchlassen, welche nicht.**

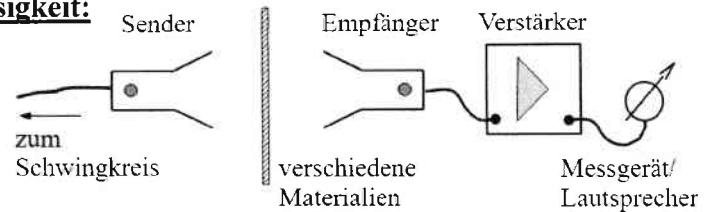
Die gerichtete Abstrahlung erlaubt eine ordentliche Messung der auftretenden Winkel. **Beschreibe Deine Beobachtung. Zeichne den Empfänger in den Bereich des besten Empfanges. Welche Regel (Optik Mittelstufe) können wir damit bestätigen?** Dieses Experiment erlaubt uns, die Wellenlänge der eingesetzten Strahlung quantitativ zu messen. Beachte: in der Draufsicht ist der Empfangsdipol ein kleiner Kreis, tatsächlich ist er ein kleiner Stab (Antenne). **Beschreibe Deine Beobachtung und bestimme mit unserem Messwert die Wellenlänge.**

Der Empfänger wird so außerhalb des Strahlkegels positioniert, dass kaum Strahlung zu ihm gelangt. Dann bringt man das Prisma aus Acrylglas wie gezeichnet in den Strahlengang. **Beschreibe Deine Beobachtung. Stelle mit einer Linie (Strahlmodell) dar, wie die Strahlung vom Sender zum Empfänger gelangt. Zitiere die entsprechende Regel aus der Mittelstufen-Optik.**

Für diesen Versuch wird der Verstärker zunächst so eingestellt, dass das Messgerät nur einen kleinen Ausschlag anzeigt. Dann bringt man die Linse aus Acrylglas wie gezeichnet in den Strahlengang. **Beschreibe Deine Beobachtung und erkläre sie. Unterstützte Deine Ausführung durch eine aussagekräftige Zeichnung unter Verwendung des Strahlmodells.**

5.5 Versuche mit Mikrowellen

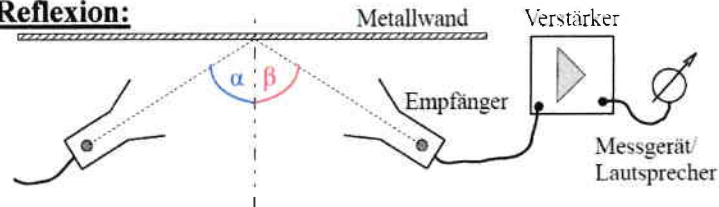
Durchlässigkeit:



durchlässig: Papier, Karton, Kunststoff, Körpergewebe

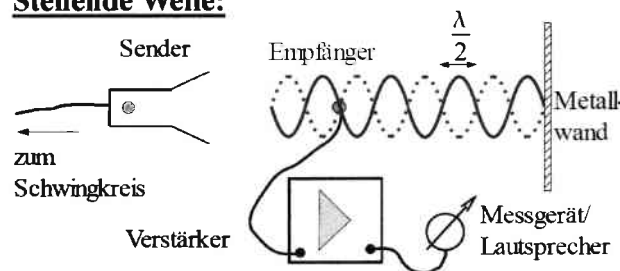
undurchlässig: Stahlblech, Bleiplatten

Reflexion:



Reflexionsgesetz: Einfallswinkel = Reflexionswinkel
 $\alpha = \beta$

Stehende Welle:



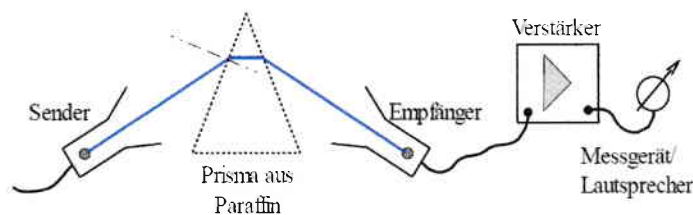
Nacheinander Punkte mit maximalem und minimalem Empfang (stehende Welle durch Interferenz von einlaufender und reflektierter Welle).

Knotenabstand: 1,6 cm
 Wellenlänge: 3,2 cm

12 Schwingungen und Wellen 5.5 Versuche mit Mikrowellen

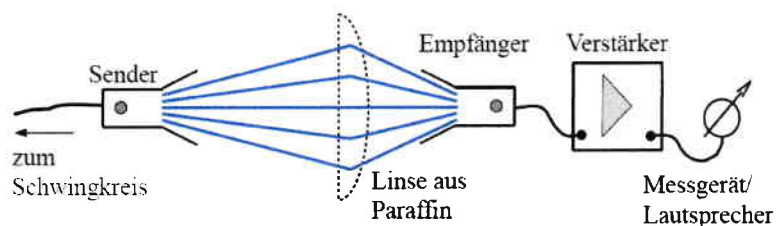
1

Brechung



Beim Eintritt in das dichtere Medium wird die Ausbreitungsrichtung zum Lot hin gebrochen. beim Eintritt in das dünnere Medium vom Lot weg. → Prisma verändert die Ausbreitungsrichtung.

Sammellinse



Ohne Linse ist der Empfang schwach, mit Linse verbessert sich der Empfang erheblich. → Die Linse bündelt die elektromagnetische Strahlung (aufgrund der Brechung), somit gelangt wesentlich mehr Leistung zum Empfänger.

Für die Entstehung der Brechung (letzte Folie) ist letztendlich die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Acrylglas verantwortlich. Maxwell konnte in seiner umfassenden Theorie über elektromagnetische Felder nachweisen, dass diese Geschwindigkeit mit den schon ermittelten Feldkonstanten zusammenhängt, im Vakuum ebenso wie in Materie.

Die Mikrowellen haben eine Schwingungsrichtung, die sich aus der Orientierung der Sendeanenne ergibt (in diesem Bild senkrecht dargestellt). Dieser Versuch untersucht diese sogenannte Polarisation. Wir halten einen Rahmen mit parallelen Metalldrähten zwischen Sender und Empfänger, zunächst wie gezeichnet, dann um 90° gedreht (so dass die Drähte senkrecht orientiert sind). **Beschreibe Deine Beobachtungen und versuche eine Erklärung.**

Den Effekt der Beugung haben wir schon in der 11. Jahrgangsstufe kennengelernt. Er ist z.B. dafür verantwortlich, dass wir "um die Ecke hören können". Das funktioniert auch bei elektromagnetischen Wellen, allerdings ist der Effekt oft so schwach ausgeprägt, dass wir das z.B. bei Licht im Alltag nicht wahrnehmen können. Die Beugung ist die Grundvoraussetzung für die Interferenz am Doppelspalt, mit diesem Versuch bereiten wir schon das nächste Kapitel vor. **Beschreibe Deine Beobachtung und gehe insbesondere darauf ein, weshalb diese intuitiv höchst merkwürdig ist. Erkläre Deine Beobachtung mit Deinem Wissen aus der 11. Jahrgangsstufe.**

Selbst-Check:

- Durchgang durch Material
- stehende Welle
- Reflexion und Brechung
- Polarisation
- Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Beugung am Spalt

Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit

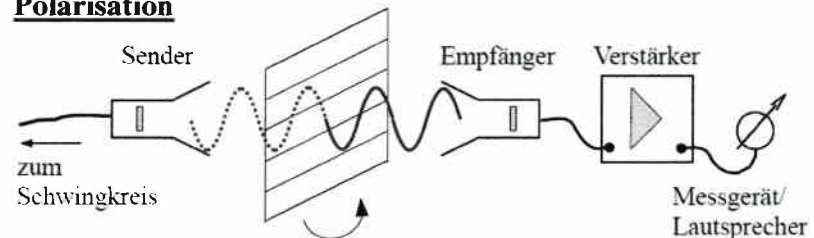
Lichtgeschwindigkeit aus. Dieser Wert steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Feldkonstanten für elektrische bzw. magnetische Felder:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Für die Lichtgeschwindigkeit in Medien ergibt sich:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

Polarisation



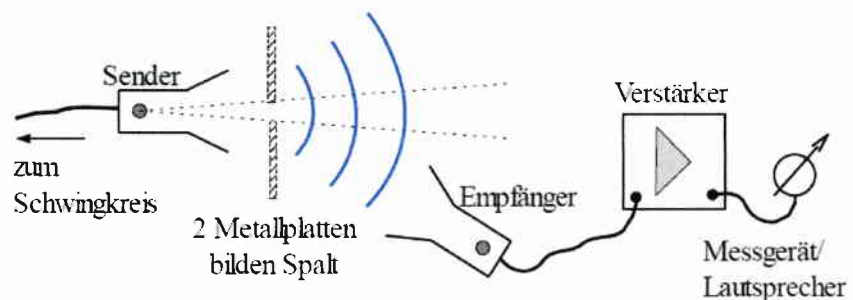
In der gezeichneten Orientierung gehen die Mikrowellen fast ungehindert durch das Gitter. Stehen die Gitterstäbe parallel zur Antenne, geht die Strahlung nicht hindurch, sondern wird reflektiert.

Grund: Bei paralleler Orientierung wird in den Gitterstäben eine Schwingung angeregt, die dadurch ausgesandte Welle löscht die durchgehende Welle aus (Phasenverschiebung 180°).

12 Schwingungen und Wellen 5.5 Versuche mit Mikrowellen

3

Beugung



Durch die Metallplatten vor dem Sender wird die Abstrahlung noch mehr behindert, dennoch verbessert sich der Empfang an der eingezeichneten Stelle.

Erklärung:

Hinter einem Spalt weitet sich das Strahlungsfeld (**Beugung**).
→ Die Welle tritt auch in den geometrischen Schattenraum ein.

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Wellen - Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Aufgaben** kannst Du im "Quiz zu Mikrowellenstrahlung" die meisten Aufgaben schon lösen (außer denen zum Doppelspalt, den widmen wir das nächste Kapitel).

12 Schwingungen und Wellen 5.5 Versuche mit Mikrowellen

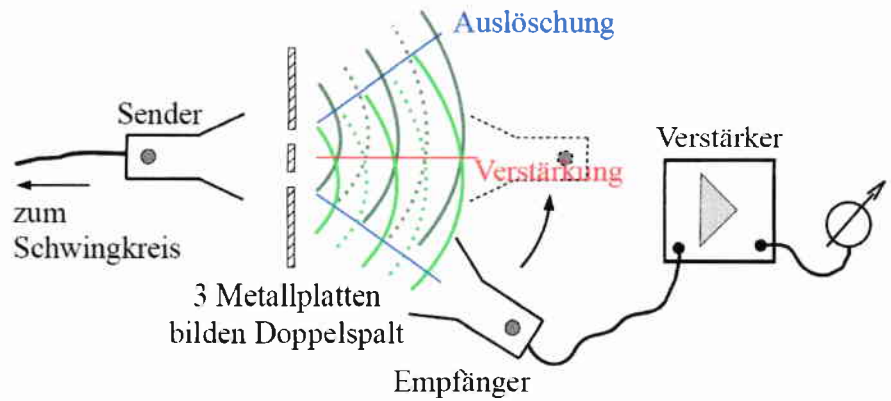
4

Diesen Versuch solltest Du (mit Wasserwellen und auch mit Licht ausgeführt) schon aus der 11. Jahrgangsstufe kennen. Das Phänomen ist die Grundlage für eine Vielzahl von modernen bildgebenden Verfahren zur Materialuntersuchung. Durch Metallplatten wird die Ausbreitung der Mikrowellen behindert. Lediglich durch zwei Öffnungen (Spalte) können die Mikrowellen zum Empfänger gelangen.

Beschreibe Deine Beobachtung und notiere auch die gemessenen Winkel für maximalen und minimalen Empfang. Erläutere die Empfangsintensität, wenn sich der Empfänger in der gestrichelten Position befindet und gehe dabei vor allem auf die Merkwürdigkeit dieser Beobachtung ein. Erläutere kurz das Prinzip des beobachteten Effektes und stelle hierzu die Wellenfronten, die von den beiden Spalten ausgehen, in der Zeichnung dar.

5.6 Interferenz am Doppelspalt mit Mikrowellen

Doppelspaltversuch



Schwenkt man den Empfänger wie gezeichnet, so durchläuft er Stellen mit maximalem und minimalem Empfang.

In der gestrichelten Position ist der Empfang gut, obwohl die mittlere Platte eine direkte Verbindung gerade verhindert.

Erklärung:

An beiden Spalten entstehen Kreiswellen, die anschließend miteinander **interferieren**.

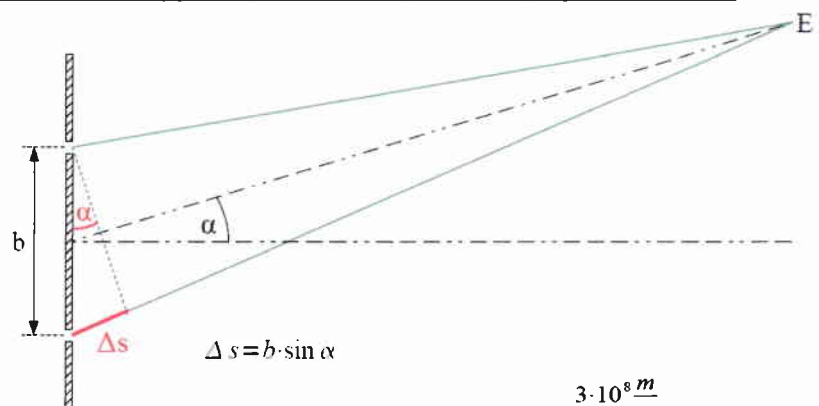
Der Doppelspaltversuch ist ein Klassiker, bei der Entwicklung des Verständnisses für die Wellen ebenso wie bei Abituraufgaben. Schlüssel bei der Analyse ist der Vergleich der Wege, die Wellen von beiden Spalten bis zum Empfangspunkt zurücklegen müssen.

- Markiere in der Zeichnung den Unterschied Δs der beiden grün-gezeichneten Wegstrecken farbig. Leite eine Formel für diesen Wegunterschied. Verwende hierzu das markierte (fast recht-winklige) kleine Dreieck am Doppelspalt.
- Berechne die Wellenlänge für die Sendefrequenz 9,45 GHz.
- Berechne die Winkel für das 1. Minimum und das 1. Maximum des Empfangs für $b = 8,0 \text{ cm}$ Spalt-mittenabstand (das Maximum auf der Achse zählen wir als 0. Maximum) und vergleiche mit der Messung.

Verstärkung bei $\Delta s = k \cdot \lambda$

Auslöschung bei $\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

Berechnung des Wegunterschiedes für die beiden Spalte



$$1. \text{ Wellenlänge: } c = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9,45 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} = 3,2 \text{ cm}$$

$$2. \text{ erste Auslöschung: } \Delta s = \frac{\lambda}{2}$$

$$b \cdot \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}$$

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{2b} = \frac{0,032 \text{ m}}{2 \cdot 0,08 \text{ m}} = 0,2 \rightarrow \alpha = 12^\circ$$

$$3. \text{ erste Verstärkung: } \Delta s = \lambda$$

$$b \cdot \sin \alpha = \lambda$$

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{b} = \frac{0,032 \text{ m}}{0,08 \text{ m}} = 0,4 \rightarrow \alpha = 24^\circ$$

$$4. \text{ zweite Auslöschung: } \Delta s = \frac{3}{2} \lambda$$

$$b \cdot \sin \alpha = \frac{3}{2} \lambda$$

$$\sin \alpha = \frac{3\lambda}{2b} = \frac{3 \cdot 0,032 \text{ m}}{2 \cdot 0,08 \text{ m}} = 0,6 \rightarrow \alpha = 37^\circ$$

Die hier vorgestellte Aufgabe ist angelehnt an die Abituraufgabe GK A2-2, 1996), die bestens dazu geeignet ist, das Verfahren zu üben. Diese findet sich auf Leifiphysik (siehe Folie 4).

In einem Experiment wie auf Folie 1 beträgt der Spaltmittenabstand 20 cm. Für das 0. und das 1. Maximum werden $\alpha_1 = 0^\circ$ und $\alpha_2 = 16^\circ$ gemessen.

a) Berechne die verwendete Sendefrequenz f .

b) Untersuche, wie viele Maxima insgesamt gefunden werden können.

c) Nun wird ein anderer Sender verwendet, der ein ganzes Frequenzspektrum von 3,0 GHz bis 7,0 GHz ausstrahlt.

Berechne den Winkelbereich, in dem sich das 1. Maximum befindet, und ebenso den Bereich für das 2. Maximum. Interpretiere das Ergebnis.

Training: Doppelspaltversuch mit Mikrowellen

a) 1. Maximum: $\lambda = \Delta s$

$$\lambda = b \cdot \sin \alpha = 0,20 \text{ m} \cdot \sin 16^\circ = 0,055 \text{ m} = 5,5 \text{ cm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,055 \text{ m}} = 5,44 \text{ GHz}$$

b) $k \cdot \lambda = \Delta s = b \cdot \sin \alpha$

$$k = \frac{b \cdot \sin \alpha}{\lambda} \leq \frac{b \cdot 1}{\lambda} \quad \text{da } \sin \alpha \leq 1$$

$$k \leq \frac{b}{\lambda} = \frac{0,20 \text{ m}}{0,055 \text{ m}} = 3,63 \rightarrow k_{\max} = 3$$

\rightarrow 0. Max + auf jeder Seite 1.-3. Max \rightarrow insgesamt 7 Maxima

c) 1. Maximum: $b \cdot \sin \alpha = \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \sin \alpha = \frac{c}{b \cdot f}$

$$3,0 \text{ GHz: } \sin \alpha = \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,20 \text{ m} \cdot 3,0 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} = 0,50 \rightarrow \alpha = 30^\circ \quad (\sin^{-1}!)$$

$$7,0 \text{ GHz: } \sin \alpha = \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,20 \text{ m} \cdot 7,0 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} = 0,21 \rightarrow \alpha = 12^\circ$$

2. Maximum: $b \cdot \sin \alpha = \Delta s = 2\lambda = 2 \frac{c}{f} \rightarrow \sin \alpha = \frac{2c}{b \cdot f}$

$$3,0 \text{ GHz: } \sin \alpha = \frac{2 \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,20 \text{ m} \cdot 3,0 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} = 1 \rightarrow \alpha = 90^\circ$$

$$7,0 \text{ GHz: } \sin \alpha = \frac{2 \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,20 \text{ m} \cdot 7,0 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} = 0,42 \rightarrow \alpha = 25^\circ$$

die Bereiche überlappen sich (es gibt überall Empfang)

12 Schwingungen und Wellen 5.6 Interferenz am Doppelspalt (M)

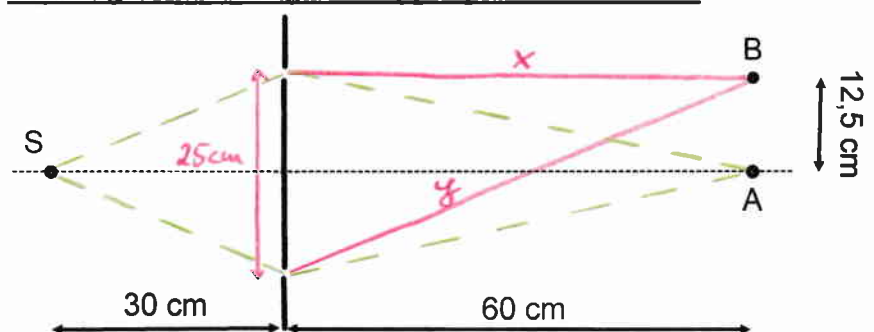
Auch dieses Beispiel ist von einer Abituraufgabe inspiriert (BY Ph11 A2-3, 2011). In dieser Aufgabe bietet sich aufgrund der geometrischen Situation die Berechnung der Wege mit dem Pythagoras an.

Mikrowellenstrahlung mit 2 cm Wellenlänge trifft auf einen Doppelspalt mit 25 cm Spaltmittenabstand.

Empfänger und Sender befinden sich auf der Mittelsenkrechten zum Doppelspalt, der Sender 30 cm davor, der Empfänger 60 cm dahinter. a) Erläutere, weshalb sich im Punkt A maximaler Empfang ergibt, obwohl das mittlere Blech genau im Weg steht.

b) Nun wird der Empfänger um 12,5 cm senkrecht zur Achse zu Punkt B verschoben. Zeige durch Rechnung, dass dort kein Empfang erfolgt.

Training: Berechnung am Doppelspalt ohne "Sinus"



a) Für Punkt A sind beide Wege (gestrichelt) gleich lang $\rightarrow \Delta s = 0 \lambda \rightarrow$ Verstärkung (Maximum)

b) Für B sind die beiden Wegstücke links vom Doppelspalt ebenfalls gleich, der Wegunterschied ergibt sich nur durch die Wegstücke rechts davon
 $x = 60 \text{ cm}$, $y = \sqrt{x^2 + (25 \text{ cm})^2} = \sqrt{(60 \text{ cm})^2 + (25 \text{ cm})^2} = 65 \text{ cm}$
 $\Delta s = y - x = 5 \text{ cm} = 2,5 \cdot 2 \text{ cm} = 2,5 \cdot \lambda$
 \rightarrow Auslöschung wegen „halber“ Wellenlänge

Selbst-Check:

- Interferenz am Doppelspalt
- Berechnung von Minima und Maxima mit "Sinus"
- Berechnung von Minima und Maxima mit Pythagoras

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Wellen - Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Aufgaben entsprechen die Aufgaben "Doppelspalt mit Mikrowellen" und "Interferenz von Mikrowellen" den Übungsbeispielen dieser Stunde.