

# 3

# Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Dieses Thema umfasst ein weites Gebiet und lässt sich in viele Teilgebiete unterteilen.

Das sind Schaltungen von Spulen, Kondensatoren und Widerständen und damit verbunden die Betrachtung von Wechselspannung. Dazu gehört auch der Schwingkreis, die elektromagnetischen Wellen allgemein, ebenso wie Radiowellen – aber auch Mikrowellen, die gerne für Demonstrationsexperimente im Physikunterricht genutzt werden.

Auch die Betrachtung von Licht als elektromagnetische Welle erfolgt in diesem Kapitel. Daher findest du in diesem Kapitel eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Aufgaben, die auf den ersten Blick auch wenig zusammen gehörig wirken können.

Tatsächlich sind aber die elektromagnetischen Schwingungen und Wellen die Grundlage für alle betrachteten Phänomene.

## CHECKLISTE



Harmonische + mechanische Schwingungen



Gedämpfte und angetriebene Schwingungen



Elektrische und zusammen gesetzte Schwingungen

Frequenz ( $f$ ), Wellenlänge ( $\lambda$ ) und Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ ) erfüllen die Gleichung  $c = f \cdot \lambda$

mit  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}$ . Im Vakuum gilt  $\epsilon_r = \mu_r = 1$  mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997\,992 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Für nicht-ferromagnetische Stoffe gilt  $\mu_r = 1$  und mit  $\epsilon_r > 1$  folgt  $c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} < c_0$ .

(Grobe) Einteilung des elektromagnetischen Spektrums:

techn. Wechselstrom ( $10^1$  bis  $10^5$  Hz) Radiowellen (LW-UKW) ( $10^5$  bis  $10^9$  Hz)

Mikrowellen ( $10^9$  bis  $10^{11}$  Hz) Infrarot ( $10^{11}$  bis  $4 \cdot 10^{14}$  Hz)

sichtbares Licht ( $4 \cdot 10^{14}$  bis  $8 \cdot 10^{14}$  Hz) Ultraviolett ( $8 \cdot 10^{14}$  bis  $10^{17}$  Hz)

Röntgenstrahlung weich ( $10^{16}$  bis  $10^{19}$  Hz) Röntgenstrahlung hart ( $10^{19}$  bis  $10^{22}$  Hz)

Gammastrahlung ( $10^{19}$  bis  $10^{27}$  Hz) Höhenstrahlung ( $> 10^{23}$  Hz)

Erzeugung elektromagnetischer Wellen: Generator, Schwingkreis und Dreipunktschaltung, Magnetron, Klystron, Laser, Röntgenröhre, radioaktiver Zerfall, ...

Typische Eigenschaften elektromagnetischer Wellen und ihr experimenteller Nachweis: linear

polarisierte Transversalwelle eines Dipolsenders, Interferenz- und Beugungerscheinungen,

Brechung, Reflexion und stehende Wellen, BRAGG-Reflexion, Nicht-Existenz eines Wellenträger-

Mediums (Äther)

Resonanzbedingungen eines Dipols ( $f_n = n \cdot \frac{c}{2l}$ ) und eines LECHER-Systems ( $f_n = (2n - 1) \cdot \frac{c}{4l}$ ),

Strom- und Spannungszustände beider Resonanzsysteme

Räumliches Bild der Dipolabstrahlung;

MAXWELLS Beschreibung:  $\frac{\partial B}{\partial x} = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}; \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ ;

Wellengleichungen:  $E(x, t) = E_0 \cdot \sin(\omega(t - \frac{x}{c}))$ ;  $B(x, t) = B_0 \cdot \sin(\omega(t - \frac{x}{c}))$

Informationsübermittlung mithilfe elektromagnetischer Wellen: analoge und digitale Übertragungstechniken bei Rundfunk, Fernsehen und Mobilfunk

## 3.2 Schriftliche Aufgaben

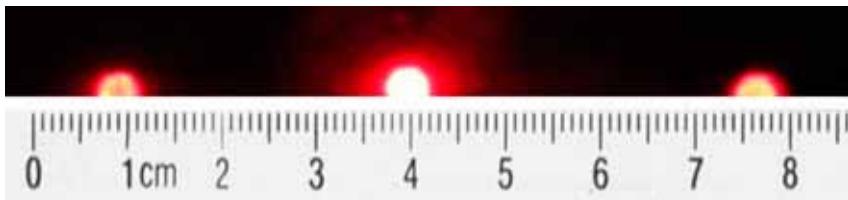
### Aufgabe 1: Die Farben der CDs – Interferenz an Reflexionsgittern

Auch wenn CDs und DVDs ihre Wichtigkeit als Datenspeicher verlieren, sind sie weiterhin interessant für Experimente. Die Spuren auf der CD wirken wie ein optisches Gitter, genauer gesagt Reflexionsgitter. Auftreffendes Licht wird gebrochen, die Interferenzen entstehen beim reflektierten Licht. Die Berechnungen verändern sich aber nicht.

- 1.1** Um die Erläuterung zu vereinfachen, soll zunächst der Doppelspalt betrachtet werden. Erklären Sie die Entstehung von Interferenzmustern bei der Beleuchtung eines Doppelspalts. Nutzen Sie dazu eine geeignete Modellvorstellung. Skizzieren Sie die Wellenwege am Doppelspalt.
  
- 1.2** Planen Sie ein Experiment, um das in Material M1.1 gezeigte Schirmbild zu erhalten. Zeichnen Sie dazu auch eine Skizze des experimentellen Aufbaus.
  
- 1.3** Die Angaben zum Spurenabstand werden mit etwa  $2\text{ }\mu\text{m}$  gemacht. Werten Sie die in Material M1.1 gezeigten Ergebnisse aus, um die Angaben zum Spurenabstand zu bestätigen. Betrachten Sie dabei den Spurenabstand als Gitterkonstante.  
Nutzen Sie dazu die Formel:  $k \cdot \lambda = g \cdot \sin\left(\frac{a_k}{e}\right)$  mit  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  und  $g = \text{Gitterkonstante}$ ;  $k = \text{Beugungsordnung}$ ;  $\lambda = \text{Wellenlänge}$ ;  $a_k = \text{Abstand Mitte 0. Maximum zum Abstand } k\text{-tes Maximum}$ ;  $e = \text{Abstand zwischen Schirm und Gitter}$   
Leiten Sie die Formel mithilfe einer geeigneten Skizze her.
  
- 1.4** Bestimmen Sie die Unsicherheit der Gitterkonstante  $g$  auf Basis der Messunsicherheiten. Geben Sie ein Intervall für  $g$  an.

#### M1.1: Schirmbild

Abstand Schirm-Gitter:  $e = 5\text{ cm}$ ; Wellenlänge des roten Lasers:  $\lambda = 632\text{ nm}$



### 3.3 Aufgaben für das mündliche Abitur

#### Aufgabe 5: BRAGG-Streuung am Kristall – Kristallstrukturanalyse

**5.1** Beschreiben Sie den Aufbau der BRAGG'schen Drehkristallmethode anhand der Abbildung in Material M5.1.

**5.2** Erläutern Sie anhand der Abbildung in M5.2 die BRAGG-Gleichung.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \vartheta \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

mit  $d$  = Abstand der Netzebenen,  $\vartheta$  = Glanzwinkel,  $\lambda$  = Wellenlänge

Vergleichen Sie die BRAGG-Gleichung mit der Gleichung für die Maxima bei der Beugung am Gitter

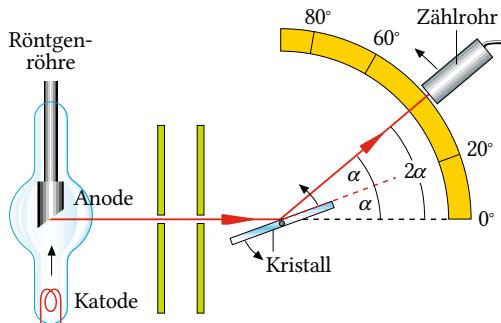
$$n\lambda = 2g \cdot \sin \alpha \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

mit  $g$  = Gitterkonstante,  $\alpha$  = Winkel von Gitter zu Schirm,  $\lambda$  = Wellenlänge

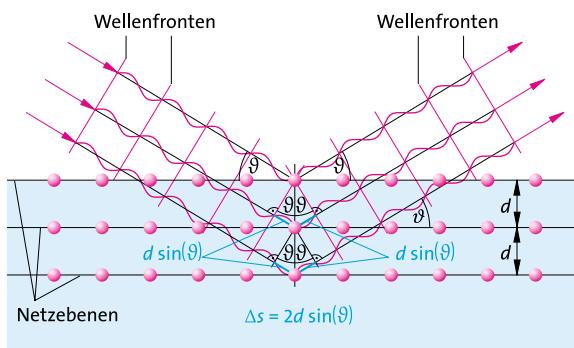
**5.3** Mit Mikrowellen (Wellenlängenbereich bei etwa  $\lambda = 3\text{ cm}$ ) kann ein Modellversuch zu BRAGG-Reflexion durchgeführt werden.

Planen Sie den Versuchsaufbau. Begründen Sie die nötigen Veränderungen, um die BRAGG-Reflexion mit Mikrowellen zeigen zu können.

#### M5.1: Bragg'scher Streuversuch



#### M5.2: Wellenfronten am Kristall



## Lösungen zu den Klausuraufgaben

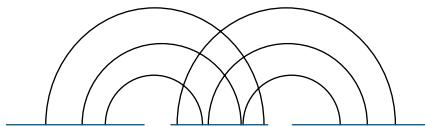
### Klausur 1: Die Farben der CDs – Interferenz an Reflexionsgittern

1.1

TIPP

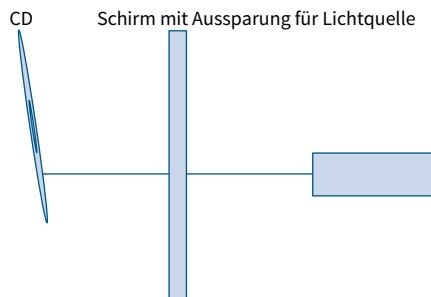
Eine mögliche Modellvorstellung ist die HUYGENS'sche Modellvorstellung. Da diese Aufgabe dieses Modell aber nicht ausdrücklich verlangt, kannst du auch über Wellenzüge argumentieren.  
Nutze unbedingt die Fachbegriffe konstruktive und destruktive Interferenz.

Nach der HUYGENS'schen Modellvorstellung geht von jedem Spalt, der eine Störung darstellt, eine neue Kreiswelle aus. Diese Kreiswellen besitzen die gleiche Wellenlänge und Frequenz wie die ursprüngliche Welle und sind zueinander phasengleich. Diese neuen Kreiswellen überlagern sich. An Orten, an denen Wellenberg auf Wellenberg, bzw. Wellental auf Wellental trifft, kommt es zu konstruktiver Interferenz. Dort, wo die Ort konstruktiver Interferenz auf dem Schirm liegen, sieht man einen Lichtfleck, ein Maximum. An Orten, an denen Wellenberg auf Wellental trifft, kommt es zu destruktiver Interferenz. Dort, wo die Ort destruktiver Interferenz auf dem Schirm liegen, ist es dunkel, ein Minimum.



1.2

TIPP



Denke daran, dass die CD das Licht reflektiert. Du musst also den Lichtquelle und Schirm beide auch die CD zeigen lassen.

## Klausur 2: Der Technetiumisotopengenerator

### M2.1: Der Technetiumisotopengenerator

Technetium-99 m besitzt nur eine kurze Halbwertszeit von 6 Stunden, daher macht ein länger dauernder Transport es unbrauchbar. Deshalb wird Technetium-99 m in der medizinischen Einrichtung vor Ort in einem Generator erzeugt. Beim Radionuklidgenerator entsteht das Tc-99 m-Isotop in einer Quelle, die Molybdän-99 enthält. Das Molybdän-99 ist an einer Chromatographiesäule adsorbiert. Mo-99 zerfällt zu 87,5% in das angeregte Tc-99 m, das wiederum unter Gamma-Emission mit 143 keV zu Tc-99 zerfällt. Die restlichen 12,5% zerfallen direkt zu Tc-99 unter Aussendung von  $\beta$ -Strahlung. Drückt man eine sterile 0,9%ige Salzlösung durch die Säulen mit immobilisiertem Molybdän-99 und löslichem Technetium-99 m, entsteht eine Salzlösung, die Natrium<sup>99m</sup>Tc-Pertechnetat enthält, zu der dann das für das jeweilige Organ spezifische Pharmazeutikum gegeben wird. Man spricht in diesem Zusammenhang vom „Melken“ des Generators. Die nutzbare Lebensdauer eines solchen Generators beträgt etwa drei Halbwertszeiten des Molybdäns, also etwa eine Woche (Halbwertszeit von Molybdän-99: 66 h). Nach Ablauf dieser Zeit muss der Generator ausgetauscht werden, da die Radioaktivität fast abgeklungen ist. 50% der höchstmöglichen Technetium-99 m-Radioaktivität werden innerhalb von sechs Stunden (eine Halbwertszeit des Radionuklids) erreicht. Nach zwölf Stunden liegen 75% der Radioaktivität und nach 23 Stunden liegt die höchstmögliche Radioaktivität vor. Üblicherweise wird der Generator einmal pro Tag gemolken.

Zerfall von Tc-99m für 2.1

Halbwertszeit: Nach dieser Zeit ist nur noch die Hälfte der Kerne vorhanden.

Ergänzt einander, um die optimale Zeit zum Melken in 2.3 zu erkennen.

### M2.2: Messung der Lösung von Technetium-99m

Zeit in s	0	300	600	900	1200	1500	3000
Aktivität in kBq	20	19,808	19,618	19,430	19,244	19,056	18,164

Die Aktivitätswerte nehmen exponentiell ab.

### M2.3: Der Zerfall von Mo-99 und Tc-99 m im Isotopengenerator

