



Lehrplan

# Physik

Gymnasiale Oberstufe

Grundkurs

Hauptphase

- Erprobungsphase -

2019

# Inhalt

Zum Umgang mit dem Lehrplan

Themenfelder Hauptphase der gymnasialen Oberstufe

Kompetenzerwartungen

## Zum Umgang mit dem Lehrplan

Der Lehrplan ist nach Themenfeldern gegliedert, denen jeweils didaktische und methodische Kommentare in einem Vorwort vorangestellt sind. In den Vorworten werden übergeordnete fachliche und methodische Zielsetzungen erläutert. Bei einigen Inhalten werden Art und Umfang der Behandlung detaillierter beschrieben. Entscheidungen zur weitergehenden und vertieften Behandlung bestimmter Inhalte kann die jeweilige Fachlehrerin bzw. der jeweilige Fachlehrer unter Beachtung des Zeitbedarfs für die verbindlichen Inhalte treffen. Auf fächerübergreifende Bezüge und die innerfachliche Relevanz wird eingegangen, wenn deren Berücksichtigung eine besondere Bedeutung bei der Behandlung des Themas hat. Hinweise zu möglichen Veranschaulichungen, zu Vereinfachungen, zu möglichen Versuchen und zu alternativen Vorgehensweisen sind in den Vorworten ebenfalls enthalten.

Im Anschluss an die Vorworte sind in zwei Spalten verbindliche Kompetenzerwartungen aufgeführt. In der linken Spalte sind Kompetenzerwartungen aus dem Bereich Fachwissen (inhaltsbezogene Kompetenzen) ausgewiesen. Die rechte Spalte enthält die Kompetenzerwartungen aus den Bereichen Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung (prozessbezogene Kompetenzen). Die Kompetenzerwartungen sind bewusst detailliert beschrieben. Dies geschieht mit dem Ziel, die Intensität der Behandlung möglichst präzise festzulegen. So kann vermieden werden, dass Lerninhalte zu intensiv oder zu oberflächlich behandelt werden. Außerdem wird eine schulübergreifende Grundlage für Leistungsüberprüfungen geschaffen. Kontexte und Unterrichtsmethoden können grundsätzlich frei gewählt werden. Die Wahl der Versuche, mit denen die verbindlichen Kompetenzerwartungen erfüllt werden können, bleibt in allen Fällen, in denen kein bestimmter Versuch verpflichtend vorgegeben ist, der Lehrkraft überlassen.

In den Kompetenzerwartungen ist die Formulierung „Die Schülerinnen und Schüler beschreiben einen Versuch ...“ (oder eine ähnliche Formulierung) mehrfach enthalten. Eine Beschreibung eines Versuchs im Sinne dieses Lehrplans meint die Beschreibung des Aufbaus, der Durchführung, der Beobachtung, der Auswertung und je nach Versuch entweder die Schlussfolgerung oder die Erklärung. Versuche haben im Physikunterricht einen hohen didaktischen Mehrwert, da sie physikalische Phänomene direkt erfahrbar machen und Theorien untermauern. Immer wenn es möglich ist, einen Versuch im Unterricht aktiv durchzuführen, sollte dies auch geschehen - sofern zulässig und möglich auch unter Beteiligung der Schülerinnen und Schüler. Simulationen und ähnliche Programme können, falls ein Versuch nicht vorhanden ist, vorläufig als Ersatz für den Versuch eingesetzt werden, es soll aber angestrebt werden, die erforderlichen Geräte zur Durchführung realer Versuche für den Unterricht bereitzustellen. Wenn möglich sollten vor der Durchführung von Versuchen Hypothesen zu möglichen Abhängigkeiten zwischen Größen formuliert und anschließend Überprüfungsmöglichkeiten entwickelt werden.

Anwendungsaufgaben können genutzt werden, um den Schülerinnen und Schülern Sicherheit im Verständnis von Konzepten zu geben. Dabei darf die Physik aber nicht hinter die Mathematik zurücktreten.

Im Anschluss an die verbindlichen Kompetenzerwartungen zu einem Themenbereich gibt der Lehrplan Hinweise zu Versuchen, Begriffen, Kontexten und zu Themen aus vorhergehenden Klassen, die einen Bezug zum Thema haben. Weiterhin werden fächerübergreifende Bezüge und außerschulische Lernorte aufgeführt. Auch Hinweise zur Bildung für nachhaltige Entwicklung und zur Berufsorientierung sind vorhanden. Schließlich werden noch Medien genannt, die sich im Themenbereich einsetzen lassen.

Die im Lehrplan beschriebene Reihenfolge ist insofern verbindlich, wie es sachlogisch geboten ist. Dabei soll aber keine Verschiebung von Inhalten über Halbjahre hinweg erfolgen. Die zu den einzelnen Kapiteln aufgeführten Zeitangaben sind als Planungshilfe aufzufassen.

Vektorielle Größen sind mit einem Vektorpfeil gekennzeichnet. Ist ihr Betrag gemeint, fehlt der Vektorpfeil. Im Kapitel mechanische Schwingungen werden eindimensionale Vektoren allerdings durch die Angabe ihrer Beträge in Verbindung mit einem Vorzeichen für die Richtung charakterisiert.



## Themenfelder Hauptphase der gymnasialen Oberstufe

<b>Themenfelder 1. Halbjahr der Hauptphase</b>		<b>Physik GK</b>
<b>1. Felder</b>		<b>30 Prozent<sup>1</sup></b>
1.1.	Gravitationsfeld	
1.2.	Elektrisches Feld	
1.3.	Magnetisches Feld	
1.4.	Bewegung von Ladungsträgern in Feldern	

<b>Themenfelder 2. Halbjahr der Hauptphase</b>		<b>Physik GK</b>
<b>2. Elektromagnetische Induktion</b>		<b>10 Prozent</b>
2.1.	Induktionsgesetz	
2.2.	Selbstinduktion und Energie des magnetischen Feldes	
<b>3. Schwingungen und Wellen</b>		<b>30 Prozent</b>
3.1.	Mechanische Schwingungen	
3.2.	Mechanische Wellen	

---

<sup>1</sup> Die Prozentangaben beziehen sich auf die Dauer der Hauptphase der gymnasialen Oberstufe.

<b>Themenfelder 3. und 4. Halbjahr der Hauptphase</b>		<b>Physik GK</b>
<b>Schwingungen und Wellen</b>		
3.3.	Elektromagnetische Schwingungen	
3.4.	Elektromagnetische Wellen	
3.5.	Wellenmodell des Lichts	
<b>4.</b>	<b>Quanten und Atome</b>	<b>30 Prozent</b>
4.1.	Photoeffekt und Photonenmodell	
4.2.	Röntgenstrahlung	
4.3.	Paarerzeugung und Paarvernichtung	
4.4.	Welleneigenschaften von Elektronen	
4.5.	Wahrscheinlichkeitsverhalten von Quantenobjekten	
4.6.	Heisenberg'sche Unschärferelation	
4.7.	Quantenhafte Emission und Absorption	
4.8.	Das Bohr'sche Atommodell	
4.9.	Kernphysik und Radioaktivität	

Das erste Themenfeld umfasst die Gebiete Gravitationsfeld, elektrisches Feld und Magnetfeld. Man sagt, ein Raum sei von einem (Kraft-)Feld durchsetzt, wenn dort auf einen Körper aufgrund einer seiner Eigenschaften eine Kraft wirkt. So spricht man von einem Gravitationsfeld, wenn ein Körper aufgrund seiner Masse eine Kraft erfährt, von einem elektrischen Feld, wenn ein Körper aufgrund seiner Ladung eine Kraft erfährt und von einem magnetischen Feld, wenn auf einen (nicht parallel zu den Feldlinien) bewegten Ladungsträger eine Kraft wirkt. Da letztere Definition zunächst nicht auf der Hand liegt, verwendet der Lehrplan zunächst die aus der Klassenstufe sieben bekannte Definition des Magnetfeldes über die Kraftwirkung auf Probemagnete.

Die charakteristische Größe eines Feldes ist die Feldstärke, die allgemein als Quotient aus der auf einen Körper im Feld wirkenden Kraft und der Eigenschaft des Körpers, die diese Kraft bewirkt, definiert ist. Für die Gravitationsfeldstärke ergibt sich daher der Quotient aus Gravitationskraft und Masse, für die elektrische Feldstärke der Quotient aus Coulombkraft und Ladung. Demzufolge wäre eine charakteristische Größe des Magnetfeldes, welche man aus historischen Gründen magnetische Flussdichte nennt, zu definieren als Quotient aus Lorentzkraft und dem Produkt aus Ladung und Geschwindigkeit für einen sich senkrecht zu den Feldlinien bewegenden Ladungsträger. Da diese Festlegung messtechnisch umständlich ist, wählt der Lehrplan eine Definition über die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld.

Ein wesentlicher Vorteil der Beschreibung von Wechselwirkungen durch Felder besteht darin, dass beim Modell Feld die Ausbreitung von Wirkungen im Raum mit einer endlichen Geschwindigkeit berücksichtigt wird und somit Wellen beschrieben werden können.

Das Thema Bewegung von Himmelskörpern bietet vielfältige Möglichkeiten zur Reflexion historischer und gesellschaftlicher Bedingtheiten der Physik. Bei der Auswahl der Bewegungen genügt es, gebundene Bahnen (Kreis und Ellipse) zu betrachten. Bei der Anwendung der Kepler'schen Gesetze ist darauf zu achten, dass in Aufgaben auch elliptische Bahnen berücksichtigt werden.

Die aus Klassenstufe neun bekannten Modellvorstellungen zu elektrischen Ladungen auf atomarer Ebene sind die Grundlage zum Erklären vieler Phänomene, z. B. der Influenz und später auch des glühelektrischen Effekts und des Hallwachs-Versuchs, und besitzen somit eine hohe innerfachliche Relevanz. Im Unterkapitel elektrische Grundgrößen werden diese Modellvorstellungen aufgefrischt und weiterentwickelt. Dabei kann auch das Arbeiten mit Modellen eingeübt werden. Im Folgenden werden wie in Klassenstufe neun die elektrische Ladung als Grundgröße und die elektrische Stromstärke als abgeleitete Größe festgelegt. Die aus Klassenstufe neun bekannte Definition der elektrischen Stromstärke kann nun mit Mitteln der Differentialrechnung weiterentwickelt werden, so dass sich auch Momentanwerte betrachten lassen. Auch bei der Planung des Grieskörnersversuchs zur Visualisierung elektrischer Felder können Modellvorstellungen genutzt werden. Anhand von vorgegebenen Feldlinienbildern von elektrostatischen Feldern können Eigenschaften elektrischer Feldlinien erkannt und mit Hilfe bekannter Modellvorstellungen erläutert werden.

Der Millikanversuch gibt Einblicke in die Generierung von Wissen durch die Entwicklung experimenteller Methoden und lässt sich verschiedenen Basiskonzepten (System, Wechselwirkung, Materie) zuordnen. Die Herleitung einer Formel zur Berechnung der Ladung eines Öltröpfchens bietet die Möglichkeit zum Anwenden (Kräfteansatz). Weitere Aspekte beim Versuch sind z. B. die Sensibilisierung der Schülerinnen und Schüler für das Auftreten experimenteller Schwierigkeiten und deren Lösung sowie die Aufbereitung und Interpretation von Messdaten. Im Unterricht kann auch angesprochen werden, dass historisch konkurrierende Vorstellungen zur elektrischen Ladung (kontinuierliche Verteilung ↔ Quantelung) Ausgangspunkt für die Untersuchungen waren, die zur Erkenntnis der Quantelung der Ladung geführt haben.



Mit der elektrischen Kapazität lernen die Schülerinnen und Schüler neben dem elektrischen Widerstand eine weitere Größe zur Beschreibung der Eigenschaften von Bauteilen eines elektrischen Stromkreises kennen. Bei Überlegungen zur Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Kapazität lässt sich Modellwissen einsetzen.

Den Abschluss des ersten Themenfeldes bildet die Betrachtung der Bewegungen geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern. Dazu muss umfangreiches Vorwissen aus der Klassenstufe zehn (Themenfeld Kraft und Bewegung) aktiviert, mit dem neuen Wissen über Felder verzahnt und sicher angewendet werden. Dabei sind sowohl dynamische Betrachtungen (Kräfteansatz) als auch energetische Ansätze (Energieerhaltungssatz) gefordert. Die Bewegung von geladenen Teilchen in kombinierten Feldern bietet die Möglichkeit zum Problemlösen. Der schräge Einschuss eines geladenen Teilchens in ein homogenes Magnetfeld soll nicht thematisiert werden. Ausgeklammert bleiben Bewegungen in inhomogenen elektrischen und magnetischen Feldern.

Der Vergleich von klassisch berechneten Geschwindigkeiten und real erreichten Werten leitet zur speziellen Relativitätstheorie hin. Alternativ kann hier auch der Einstieg über die Abweichungen zwischen der Ruhemasse und der in Massenspektrographen bei großen Geschwindigkeiten bestimmten Massen gewählt werden, wobei bei beiden Vorgehensweisen die zentralen Formeln angegeben und nicht hergeleitet werden sollen.

### Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>1.1 Gravitationsfeld</b> <b>1.1.1 Gravitationskraft</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bezeichnen die Kräfte, die zwei Körper aufgrund ihrer Massen aufeinander ausüben, als <i>Gravitationskräfte</i> und geben an, dass sie stets anziehende Wirkungen haben,</li> <li>geben das <i>Gravitationsgesetz</i> für die Gravitationskraft an:  <math display="block">F_G = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}</math>           mit <math>\vec{F}_G \parallel \vec{r}</math>            (<math>m_1, m_2</math>: Massen der beiden Körper, <math>r</math>: Abstand der Schwerpunkte, <math>\gamma</math>: Gravitationskonstante),</li> <li>definieren den Begriff <i>Gravitationsfeld</i>,</li> <li>definieren die Größe <i>Gravitationsfeldstärke</i> <math>\vec{G}</math>:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Betrag: <math>G = \frac{F_G}{m}</math> (<math>m</math>: Probemasse),</li> <li>Einheit: <math>[G] = 1 \frac{N}{kg}</math>,</li> <li>Richtung: Richtung der Gravitationskraft.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>begründen mit Hilfe der „<i>Newton'schen Mondrechnung</i>“ die Abhängigkeit des Betrags der Gravitationskraft vom Abstand der Massenmittelpunkte:  <math display="block">F_G \sim \frac{1}{r^2}</math>,</li> <li>begründen die Abhängigkeit der Gravitationskraft von den Massen beider Körper:  <math display="block">F_G \sim m_1 \cdot m_2</math>,</li> <li>beschreiben den <i>Versuch von Jolly</i> zur Bestimmung der Gravitationskonstanten,</li> <li>skizzieren das Feldlinienbild des Gravitationsfeldes eines homogenen kugelförmigen Himmelskörpers (<i>Radialfeld</i>),</li> <li>erläutern das Feldlinienmodell zur Beschreibung von Gravitationsfeldern.</li> </ul>

Felder	Physik Hauptphase GK
Kompetenzerwartungen	
Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• skizzieren die Abhängigkeit des Betrags der Gravitationsfeldstärke von der Höhe über der Oberfläche eines als kugelförmig mit homogener Massenverteilung angenommenen Himmelskörpers,</li> <li>• deuten die Fallbeschleunigung als Gravitationsfeldstärke,</li> <li>• lösen Aufgaben zum Gravitationsgesetz, insbesondere zur Berechnung der Erdmasse.</li> </ul>
<b>1.1.2 Bewegung von Himmelskörpern</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben das <i>geozentrische</i> und das <i>heliocentrische Weltbild</i>,</li> <li>• geben die drei <i>Kepler'schen Gesetze</i> an.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• erläutern den Begriff <i>Synchronsatellit</i>,</li> <li>• leiten das dritte Kepler'sche Gesetz für den Spezialfall einer Kreisbahn aus dem Gravitationsgesetz her,</li> <li>• bestätigen das dritte Kepler'sche Gesetz mit Hilfe von Bahndaten von Himmelskörpern,</li> <li>• lösen Aufgaben zur Bewegung von Himmelskörpern, insbesondere: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Berechnung von Bahndaten von Planeten und Satelliten,</li> <li>○ Berechnung der Masse von Zentralkörpern.</li> </ul> </li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung

## 1.2 Elektrisches Feld

## 1.2.1 Elektrische Grundgrößen

## Elektrische Ladung

Die Schülerinnen und Schüler

- bezeichnen die Kräfte, die zwei Körper aufgrund ihrer Ladungen aufeinander ausüben, als *Coulombkräfte* und geben an, dass sie anziehende oder abstoßende Wirkungen haben können,
- geben für die Coulombkraft das Symbol  $\vec{F}_C$  an,
- geben an, dass in Festkörpern die positiven Ladungen ortsgebunden sind und nur Elektronen beweglich sein können,
- unterscheiden Isolatoren und elektrische Leiter hinsichtlich der Bindung ihrer Elektronen an den Kern,
- bezeichnen den Betrag der elektrischen Ladung eines Elektrons als *Elementarladung*  $e$ ,
- definieren die Größe *elektrische Ladung*  $Q$  als Vielfaches der Elementarladung und geben ihre Einheit an:  
 $[Q] = 1 \text{ C (Coulomb)}$   
 $1 \text{ C} = 6,24 \cdot 10^{18} e$ ,
- benennen ein Messgerät für die elektrische Ladung als *Coulombmeter*,
- formulieren das *Gesetz der Ladungserhaltung*.

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben Versuche zur Demonstration von Vorzeichencharakter, Mengencharakter, Kraftwirkung, Neutralisation und Influenz,
- erläutern die wesentlichen Bestandteile eines Atommodells mit positiv geladenem Atomkern und einer Atomhülle aus negativ geladenen Elektronen mit Bindung an den Kern,
- beschreiben die Eigenschaft von Körpern, elektrisch positiv bzw. elektrisch negativ geladen zu sein, durch einen Mangel bzw. Überschuss an Elektronen,
- erklären das Phänomen Influenz,
- beschreiben den Aufbau und erklären die Funktionsweise eines Elektroskops.

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung**Elektrische Stromstärke**

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den elektrischen Strom als gerichtete Bewegung frei beweglicher elektrischer Ladungsträger,
- begründen, dass für den zeitlichen Verlauf der elektrischen Stromstärke gilt:  $I(t) = \dot{Q}(t)$ .

**Elektrische Feldstärke**

Die Schülerinnen und Schüler

- definieren die Begriffe *elektrisches Feld*, *elektrostatiches Feld* und *Probeladung*,
- geben die folgenden Eigenschaften von Feldlinien eines elektrostatischen Feldes an:
  - sie beginnen bei positiven und enden bei negativen Ladungen,
  - sie stehen senkrecht auf der Oberfläche geladener Leiter,
  - sie kreuzen sich nicht,
- geben an, dass das Innere eines Metallkäfigs frei von elektrischen Feldern ist (*Faraday-Käfig*),
- definieren die Größe *elektrische Feldstärke*  $\vec{E}$ :
  - Betrag:  $E = \frac{F_C}{q}$  ( $q$ : Probeladung),
  - Einheit:  $[E] = 1 \frac{N}{C}$ ,
  - Richtung: Richtung der Coulombkraft auf die Probeladung,
- definieren den Begriff *homogenes elektrisches Feld*,
- geben Größenordnungen von elektrischen Feldstärken an (z. B. Durchschlagfeldstärke in Luft).

Die Schülerinnen und Schüler

- erläutern das Feldlinienmodell zur Beschreibung von elektrischen Feldern,
- beschreiben den Grieskörner-Versuch zur Visualisierung von elektrischen Feldern,
- skizzieren Feldlinienbilder zum elektrischen Feld einer Punktladung (Radialfeld), zweier Punktladungen sowie eines Plattenkondensators (*homogenes Feld*),
- erläutern die schützende Funktion eines Faraday-Käfigs und beurteilen den Nutzen,
- beschreiben einen Versuch zur Untersuchung der Abhängigkeit der Kraft  $\vec{F}_C$  auf eine Probeladung von deren Ladung  $q$  im konstanten elektrischen Feld,
- lösen Aufgaben zur elektrischen Ladung, elektrischen Stromstärke und elektrischen Feldstärke.

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung**Elektrische Spannung**

Die Schülerinnen und Schüler

- bezeichnen mit  $W_{1,2}$  die Überführungsarbeit beim Verschieben einer Ladung von einem Punkt  $P_1$  zu einem Punkt  $P_2$  innerhalb eines elektrischen Feldes entlang eines Weges  $s_{1,2}$ ,
- geben an, dass beim Verschieben einer Ladung  $q$  im homogenen elektrischen Feld senkrecht zu den Feldlinien keine Arbeit verrichtet wird,
- geben den Betrag der Arbeit im homogenen elektrischen Feld bei einer Verschiebung parallel zu den Feldlinien um die Strecke  $d$  an:

$$|W_{1,2}| = F_C \cdot d,$$

- definieren die elektrische Spannung zwischen dem Punkt  $P_2$  und dem Punkt  $P_1$  innerhalb eines elektrischen Feldes als Quotient aus Überführungsarbeit  $W_{1,2}$  und überführter Ladung  $q$ :

$$U_{2,1} = \frac{W_{1,2}}{q}, [U] = 1 \frac{J}{C} = 1V \text{ (Volt)}.$$

Die Schülerinnen und Schüler

- leiten die Formel für die Spannung zwischen den Platten eines Plattenkondensators her:

$$U = E \cdot d,$$

- begründen die Gleichwertigkeit der Einheiten der elektrischen Feldstärke:

$$[E] = 1 \frac{N}{C} = 1 \frac{V}{m},$$

- lösen Aufgaben zur elektrischen Spannung.

**Elektrische Elementarladung**

Die Schülerinnen und Schüler

- geben als experimentelle Schwierigkeit beim Millikan-Versuch an, dass der Radius  $r$  des Tröpfchens optisch nicht bestimmt werden kann,
- geben an, dass der Radius des Tröpfchens aus der konstanten Sinkgeschwindigkeit ohne Vorhandensein eines elektrischen Feldes bestimmt werden kann (ohne Berechnungen).

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Aufbau des *Millikan-Versuchs* und erläutern die Schwebemethode,
- leiten folgende Formel zur Berechnung der Ladung eines schwebenden Öltröpfchens her:

$$q = m \cdot g \cdot \frac{d}{U}$$

( $m$ : Masse des Öltröpfchens,  $d$ : Plattenabstand,  $U$ : Spannung am Kondensator).

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>geben als Ergebnis des Millikan-Versuchs an: <i>freie elektrische Ladungen sind stets ganzzahlige Vielfache der Elementarladung <math>e</math> (Ladung als gequantelte Größe).</i></li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>interpretieren ein Diagramm mit Messdaten zum Millikan-Versuch,</li> <li>lösen Aufgaben zur elektrischen Elementarladung.</li> </ul>
<p><b>1.2.2. Kapazität eines Kondensators und Energie des elektrischen Feldes</b></p>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>geben den folgenden Zusammenhang beim Kondensator an: <math>Q \sim U</math>,</li> <li>definieren die Größe <i>Kapazität</i> eines Kondensators: <math>C = \frac{Q}{U}</math>, <math>[C] = 1 \frac{C}{V} = 1 F</math> (<i>Farad</i>),</li> <li>geben die Formel für die Kapazität eines luftgefüllten Plattenkondensators an: <math>C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}</math> (<math>\epsilon_0</math>: <i>elektrische Feldkonstante</i>),</li> <li>geben die Formel für die Kapazität eines Kondensators mit Dielektrikum an: <math>C = \epsilon_r \cdot C_0</math> (<math>\epsilon_r</math>: <i>Dielektrizitätszahl</i>),</li> <li>geben Größenordnungen von Kapazitäten und Dielektrizitätszahlen an,</li> <li>geben an, dass im elektrischen Feld eines Kondensators Energie gespeichert ist und bezeichnen diese als elektrische Feldenergie,</li> <li>geben den Zusammenhang für die im Kondensator gespeicherte elektrische Feldenergie an: <math>W_{el} = \frac{1}{2} C U^2</math>,</li> <li>nennen Anwendungsbereiche von Kondensatoren.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben einen Versuch zum Nachweis, dass ein Kondensator Ladungen speichern kann,</li> <li>beschreiben einen Versuch zum Nachweis der Proportionalität von gespeicherter Ladung und Ladespannung beim Kondensator,</li> <li>interpretieren die Kapazität eines Kondensators als Fähigkeit, Ladung zu speichern,</li> <li>beschreiben einen Versuch zur Untersuchung der Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von dessen Geometrie,</li> <li>bestimmen die elektrische Feldkonstante mit Hilfe von Messdaten,</li> <li>beschreiben einen Versuch zur Untersuchung der Abhängigkeit der Kapazität von einem Dielektrikum,</li> <li>lösen Aufgaben zur Kapazität und Energie des elektrischen Feldes, insbesondere: Berechnung von Größen bei der Veränderung einer oder mehrerer Größen am Kondensator bei abgeklemmter und angeschlossener Elektrizitätsquelle.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung

## 1.3. Magnetisches Feld

## Grundlagen des Magnetismus

Die Schülerinnen und Schüler

- formulieren die UVW-Regel,
- geben den folgenden Zusammenhang für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter der Länge  $\ell$ , der sich senkrecht zu den Feldlinien im Magnetfeld befindet, an:  
 $F \sim I \cdot \ell$ ,
- definieren die Größe *magnetische Flussdichte*  $\vec{B}$ :
  - Betrag:  $B = \frac{F}{I \cdot \ell}$  (für einen stromdurchflossenen Leiter der Länge  $\ell$ , der sich senkrecht zu den Feldlinien im Magnetfeld befindet),
  - Einheit:  $[B] = 1 \frac{N}{Am} = 1T$  (Tesla),
  - Richtung: Richtung der Feldlinie,
- definieren den Begriff *homogenes Magnetfeld*,
- geben Größenordnungen von magnetischen Flussdichten an (z. B. Hufeisenmagnet, medizinische Anwendungen, Erdmagnetfeld),
- geben die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter der Länge  $\ell$  im Magnetfeld an, wenn er senkrecht zur Feldrichtung liegt
  - Betrag:  $F = I \cdot \ell \cdot B$ ,
  - Richtung: folgt aus der UVW-Regel.

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Leiterschaukelversuch zur Demonstration der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld,
- beschreiben einen qualitativen Versuch zum Nachweis, dass  $F = 0$  ist, wenn der stromdurchflossene Leiter parallel zur Feldrichtung liegt und  $F$  maximal ist, wenn er senkrecht dazu liegt,
- beschreiben den Versuch mit der Stromwaage zum Nachweis der Proportionalität der Kraft zur Stromstärke und zur Leiterlänge, wenn der stromdurchflossene Leiter senkrecht zur Feldrichtung liegt,
- lösen Aufgaben zu Grundlagen des Magnetismus und zur magnetischen Flussdichte, insbesondere zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld.

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p><b>Homogenes Magnetfeld einer Spule</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass das Magnetfeld im Inneren einer stromdurchflossenen Spule homogen ist,</li> <li>• geben die Formel für den Betrag der magnetischen Flussdichte im Inneren einer langen, dicht gewickelten, zylindrischen Spule an:  <math display="block">B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{n}{\ell} \cdot I</math> (<math>\frac{n}{\ell}</math>: Windungsdichte, <math>\mu_0</math>: magnetische Feldkonstante, <math>\mu_r</math>: Permeabilitätszahl),</li> <li>• geben Größenordnungen von Permeabilitätszahlen ferromagnetischer Materialien an.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lösen Aufgaben zum homogenen Magnetfeld einer Spule.</li> </ul>
<p><b>1.4. Bewegung von Ladungsträgern in Feldern</b></p> <p><b>1.4.1. Ladungsträger im elektrischen Feld</b></p>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben den <i>glühelektrischen Effekt</i> als Methode zur Erzeugung freier Elektronen an,</li> <li>• geben an, dass die Bewegung eines freien geladenen Teilchens im homogenen elektrischen Längsfeld gleichmäßig beschleunigt ist,</li> <li>• definieren die Energieeinheit <i>Elektronenvolt</i> (<math>1eV</math>).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben den Aufbau einer <i>Elektronenkanone</i> (ohne Wehnelt-Zylinder) aus Glühkathode und Lochanode und erklären die Funktionsweise,</li> <li>• leiten mit einem Energieansatz die Formel für die Endgeschwindigkeit eines anfangs ruhenden, freien geladenen Teilchens nach Durchlaufen eines elektrischen Längsfelds her:  <math display="block">v = \sqrt{2 \frac{q}{m} U_B}</math> (<math>U_B</math>: Beschleunigungsspannung),</li> <li>• lösen Aufgaben zur Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Längsfeld (für Elektronen bis <math>U_B = 10 kV</math>).</li> </ul>



## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung1.4.2. Ladungsträger  
im magnetischen Feld

Die Schülerinnen und Schüler

- geben an, dass die Ursache für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld, die so genannte Lorentzkraft, ist,
- geben für  $\vec{v} \perp \vec{B}$  die Formel für den Betrag der Lorentzkraft an:  
 $F_L = q \cdot v \cdot B$ ,
- formulieren die UVW-Regel für die Richtung der Lorentzkraft,
- geben an, dass man mit einem *Helmholtz-Spulenpaar* ein homogenes Magnetfeld erzeugen kann.

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Aufbau und erklären die Funktionsweise eines *Fadenstrahlrohrs*,
- beschreiben einen Versuch zur Ablenkung eines Elektronenstrahls im Fadenstrahlrohr mit Helmholtz-Spulenpaar,
- beschreiben die Bahnkurve von Elektronen im homogenen Magnetfeld abhängig vom Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Elektronen und der magnetischen Flussdichte:
  - Kreisbahn für  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,
  - Gerade für  $\vec{v} \parallel \vec{B}$ ,
- begründen die Konstanz des Betrages der Geschwindigkeit im Fall  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,
- leiten für Ladungsträger für den Fall  $\vec{v} \perp \vec{B}$  folgende Formeln her:
  - Radius:  $r = \frac{mv}{qB}$ ,
  - Umlaufzeit:  $T = 2\pi \frac{m}{qB}$ ,
- begründen, dass die Umlaufzeit unabhängig von der Geschwindigkeit der Ladungsträger ist (für den nichtrelativistischen Fall),
- leiten die folgende Formel zur Berechnung der Masse der Ladungsträger her:  
$$m = \frac{q \cdot B^2 \cdot r^2}{2 \cdot U_B}$$
 (für den nichtrelativistischen Fall),
- bestimmen die Elektronenmasse aus Messdaten,
- lösen Aufgaben zur Bewegung von Ladungsträgern im homogenen Magnetfeld.

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung1.4.3. Ladungsträger in  
kombinierten Feldern

## Geschwindigkeitsfilter

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Aufbau und erklären die Funktionsweise eines Geschwindigkeitsfilters,
- leiten die Formel zur Bestimmung des Betrags der Geschwindigkeit der Teilchen her, die das Geschwindigkeitsfilter geradlinig passieren:  
$$v = \frac{E}{B},$$
- lösen Aufgaben zum Geschwindigkeitsfilter.

## Massenspektrograph

Die Schülerinnen und Schüler

- definieren die Größe *spezifische Ladung* eines geladenen Teilchens,
- geben an, dass mit einem Massenspektrographen die Masse von Ionen bestimmt werden kann.

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Aufbau und erklären die Funktionsweise des *Massenspektrographen nach Bainbridge*,
- leiten die Formel für den Radius im Analysator zur Bestimmung des Auftreffpunkts des geladenen Teilchens auf dem Detektor her:  
$$r = \frac{m \cdot E}{q \cdot B_1 \cdot B_2},$$
- begründen, dass sich aus dem Auftreffpunkt die spezifische Ladung des geladenen Teilchens bestimmen lässt,
- berechnen spezifische Ladungen von Elektronen und Ionen aus Messdaten,
- lösen Aufgaben zum Massenspektrographen.

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung1.4.4. Relativistische Betrachtung  
von Bewegungen

Die Schülerinnen und Schüler

- geben an, dass die Formel  $W_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$  für große Geschwindigkeiten nicht gültig ist und nur bis  $v < 0,1c$  verwendet werden kann (Festlegung),

- geben die Formel für die *relativistische kinetische Energie* an:

$$W_{kin} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

( $m_0$ : Ruhemasse des Teilchens),

- geben an, dass die Formel für die relativistische kinetische Energie für alle Geschwindigkeiten ( $v < c$ ) gilt und für kleine Geschwindigkeiten in die klassische Formel übergeht,

- geben an, dass der Term  $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  die Gesamtenergie  $W(v)$  und der Term  $m_0 c^2$  die Ruheenergie  $W_0$  eines Teilchens ist,

- geben an, dass der Term  $\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  die *dynamische Masse*  $m(v)$  eines Teilchens angibt, wobei  $m_0$  die Ruhemasse des Teilchens ist,

- geben an, dass die Lichtgeschwindigkeit die Obergrenze für die Geschwindigkeit jedes Teilchens darstellt,

- geben die *Einstein'sche Masse-Energie-Äquivalenz* an:  
 $W(v) = m(v) \cdot c^2$ .

Die Schülerinnen und Schüler

- zeichnen anhand von Messdaten einen Graphen, der den Zusammenhang zwischen der Beschleunigungsspannung und der Geschwindigkeit von Elektronen darstellt und vergleichen mit dem theoretischen Verlauf des Graphen (bei der Nutzung des klassischen Energieansatzes),

- skizzieren den Zusammenhang zwischen der dynamischen Masse eines Teilchens und seiner Geschwindigkeit,

- lösen Aufgaben zur relativistischen Bewegung von Teilchen.

## Hinweise

**Allgemeine Hinweise:**

- Einsatz der Gravitationsdrehwaage zum Nachweis der Existenz der Gravitationskraft möglich
- Darstellung von Marsschleifen mit Hilfe von Applets oder astronomischen Daten von Planeten, die man in eine Sternenkarte einträgt
- Aus dem dritten Kepler'schen Gesetz lässt sich die Beobachtung erklären, dass die äußeren Planeten größere Umlaufzeiten als die inneren haben. Eine Erklärung mit dem Ansatz  $F_G = F_Z$  gilt nur für den Spezialfall der Kreisbahn, was auf die Planetenbahnen nicht zutrifft.
- gebundene Bahnen: Kreis und Ellipse; ungebundene Bahnen: Parabel, Hyperbel
- Grundsätzlich bezieht sich die potenzielle Energie auf das komplette System. Vereinfacht kann sie aber in vielen Fällen einer Ladung zugeschrieben werden.
- Kraft als Vektor (LP8)
- Gesetze zur Parallel- und Serienschaltung von Widerständen (LP9)
- waagerechter Wurf mit Wurfapparat
- Prinzip des Aufbaus eines Massenspektrographen aus Ionenquelle, Analysator und Detektor

**Geeignete Einstiege und Kontexte**

- Berühmte Physiker:
  - André-Marie Ampère (1775–1836)
  - Charles Augustin de Coulomb (1736–1806)
  - Alessandro Volta (1745–1827)
  - Robert Andrews Millikan (1868–1953)
  - Michael Faraday (1791–1867)
  - Hans-Christian Oersted (1777–1851)
  - Nikola Tesla (1856–1943)
- Bedeutung von Synchronsatelliten für die Kommunikation
- Sonnenuhren
- Orientierung am Sternenhimmel
- scheinbare Planetenbewegungen am Fixsternhimmel
- Leuchterscheinungen in der Atmosphäre: Elmsfeuer, Sprühentladung
- elektrische Abschirmung z. B. bei Kabeln, Blitzschutz
- Xerographie, elektrostatische Filter in Kraftwerken
- piezoelektrischer Effekt
- EEG und EKG

**Hinweise**

- Bauformen von Kondensatoren
- elektrische Datenspeicher
- Kapazitive Sensoren z. B. zur Messung von Füllständen und Beschleunigungen
- Plattenkondensator als Modell für atmosphärische Felder (Gewitter)
- Kondensatoren als Energiespeicher
- Magnetfeld der Erde
- Elektromagnete, Aufbau von Messwerken in Multimetern
- Magnet-Schnellbahn
- Magnetische Datenspeicher
- Starke Magnetfelder in medizinischen Geräten z. B. MRT
- Erzeugung starker Magnetfelder durch Supraleitung
- Gasentladungslampen, Leuchtstofflampen, Lichtbögen
- Verstärkerröhren
- atmosphärische elektrische Felder, Flammensonden, Blitze
- magnetische Flasche, Schutzfunktion des Magnetfelds der Erde, Van-Allen-Gürtel, Polarlichter
- Entdeckung des Elektrons, historische Versuche mit Kathodenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern
- magnetische Linsen, Elektronenmikroskop
- magnetischer Einschluss von Plasma in Fusionsreaktoren

**Fächerübergreifende und fächerverbindende Bezüge**

- Mathematik: astronomische Koordinaten
- Mathematik: Kegelschnitte
- Chemie: Faraday-Konstante
- Chemie: Elektrolyse, Ionenverbindungen
- Biologie: Orientierung im Erdmagnetfeld Geschichte, Religion und Philosophie: historische Entwicklung der Weltbilder, geo- und heliozentrisches Weltbild, heutige Vorstellung von der Struktur des Weltalls
- Biologie: Elektrische Signale in Nervenzellen
- Erdkunde: Beeinflussung der Erdbeschleunigung durch die Erdabplattung, Erdrotation und lokale Dichteschwankungen
- Erdkunde: Gezeiten
- Erdkunde: Umkehr der Richtung des Erdmagnetfeldes als geophysikalisches Phänomen

**Hinweise****Außerschulische Lernorte**

- Sternwarte Peterberg
- Planetenlehrweg Nonnweiler
- Planetarium Mannheim
- Deutsches Museum München
- Besichtigung eines Wasserkraftwerks, eines Windparks oder einer Photovoltaik-Anlage
- Besuch des zuständigen Energieversorgungsunternehmens
- Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI)
- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching (MPG)
- Deutsches Elektronen-Synchrotron in Hamburg (DESY)
- Europäische Organisation für Kernforschung in Genf (CERN)
- Mainzer Mikrotron (MAMI)

**Bildung für nachhaltige Entwicklung**

- Magnettrennung in der Müllaufbereitung: Abtrennung von Eisen- und Stahlschrott
- Verbesserung des Wirkungsgrades und der Farbe des Lichts von Lampen
- elektrostatische Filter in Kraftwerken

**Berufsorientierende Aspekte**

- Arbeitsschutz: Gefahren durch hohe elektrische Feldstärken und Schutzmaßnahmen
- Kondensator als Speicher elektrischer Energie
- Studiermöglichkeiten in der Energietechnik, in der (Mikro-) Elektronik, in der Automatisierungstechnik und in der Nachrichtentechnik
- Studium Elektrotechnik
- Studium Laser- und Plasmatechnik
- Studium Physikalische Technik – Medizinphysik
- Besuch der Zentralen Studienberatung der Universität des Saarlandes

**Medienbildung**

- Simulationsprogramme zur Darstellung von Planetenbewegungen
- drehbare Sternkarten als Hilfsmittel
- dynamische Geometriesoftware (Kraft als Vektor)
- Simulationsprogramme zum Millikan-Versuch
- Simulationsprogramme zur Bewegung geladener Teilchen in Feldern
- Simulationsprogramme zur Darstellung von Feldlinienbildern

Das zweite Themenfeld, die elektromagnetische Induktion, weist eine hohe gesellschaftliche Relevanz auf, da es die Grundlage für die Versorgung mit elektrischer Energie darstellt. Zunächst wird an das aus der Klassenstufe neun bekannte Phänomen zum Auftreten der Induktion in einer Leiterschleife (oder Spule) angeknüpft. Eine quantitative Untersuchung des Phänomens kann nun erfolgen, da die magnetische Flussdichte zur Verfügung steht. Ein Versuch, bei dem sich die magnetische Flussdichte linear ändert, kann als induktiver Zugang zum Zusammenhang  $U_{ind} \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}$  verwendet werden. Mit den Mitteln der nun zur Verfügung stehenden Differentialrechnung kann dieser Zusammenhang zum Spezialfall des Induktionsgesetzes  $U_{ind}(t) = -n \cdot A \cdot \dot{B}(t)$  verallgemeinert werden, mit dem sich Momentanwerte von Induktionsspannungen bestimmen lassen. Im Grundkurs sollen sich Anwendungen auf diesen Spezialfall des Induktionsgesetzes beschränken.

Aus einem Handversuch wird die Lenz'sche Regel gewonnen. Bei der Erklärung der gehemmten Drehbarkeit eines belasteten Generators genügt es, ausschließlich die Lenz'sche Regel heranzuziehen. Betrachtungen, bei denen z. B. zunächst induzierte Ströme und anschließend resultierende Kräfte beschrieben werden, müssen hier nicht erfolgen.

Das Phänomen Selbstinduktion wird über einen Versuch zum Einschaltvorgang motiviert und erarbeitet. Dabei soll die Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt und qualitativ interpretiert werden. Sie soll aber nicht durch die DGL und/oder ihre Lösung quantitativ mit Formeln beschrieben werden, da die e-Funktion zu diesem Zeitpunkt im Fach Mathematik noch nicht behandelt wurde. Hergeleitet wird hingegen die Formel für die Selbstinduktionsspannung. Mit der Induktivität lernen die Schülerinnen und Schüler nach elektrischem Widerstand und Kapazität eine dritte Größe zur Beschreibung der Eigenschaften von elektrischen Bauteilen kennen. Dabei soll betont werden, dass die Induktivität ein Maß dafür ist, inwiefern Stromstärkeänderungen gehemmt werden. Eine Formel für die in einer Spule gespeicherte Energie soll nur angegeben werden.

**Kompetenzerwartungen**

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p><b>2.1. Induktionsgesetz</b></p>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen qualitativen Versuch zur Erzeugung einer Induktionsspannung durch Änderung des Betrags B der magnetischen Flussdichte,</li> <li>• beschreiben einen Versuch, bei dem sich die magnetische Flussdichte linear ändert, skizzieren den zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte und den zeitlichen Verlauf der Induktionsspannung und begründen für diesen Spezialfall den Zusammenhang <math>U_{ind} \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}</math>.</li> </ul>

Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben den folgenden Spezialfall des <i>Induktionsgesetzes</i> an:  <math display="block">U_{ind}(t) = -n \cdot A \cdot \dot{B}(t),</math> </li> <li>• geben Beispiele aus Alltag und Technik an, die auf dem Phänomen der elektromagnetischen Induktion basieren (z. B. Schütteltaschenlampe, Trafo),</li> <li>• formulieren die <i>Lenz'sche Regel</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lösen Aufgaben zum Induktionsgesetz, insbesondere die qualitative grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Induktionsspannung (z. B. Bewegung eines Stabmagneten auf eine Spule zu und von ihr weg),</li> <li>• beschreiben einen Handversuch zur Demonstration der Lenz'schen Regel (z. B. fallender Magnet im Kupferrohr, Waltenhofen'sches Pendel),</li> <li>• erklären mit Hilfe der Lenz'schen Regel die gehemmte Drehbarkeit eines belasteten Generators im Vergleich zum unbelasteten Generator,</li> <li>• lösen Aufgaben zur Lenz'schen Regel.</li> </ul>
<p><b>2.2. Selbstinduktion und Energie des magnetischen Feldes</b></p>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren den Begriff <i>Selbstinduktion</i> als Induktion im eigenen Leiterkreis,</li> <li>• definieren die Größe <i>Induktivität</i> einer Spule:  <math display="block">L = \mu_0 \mu_r \frac{n^2 A}{\ell}, [L] = 1 \frac{Vs}{A} = 1 H \text{ (Henry)},</math> </li> <li>• geben Größenordnungen von Induktivitäten an.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration der Selbstinduktion beim Einschalten (Spule mit Glühlampe in Serie, parallel dazu Widerstand mit Glühlampe in Serie),</li> <li>• skizzieren den zeitlichen Verlauf der Stromstärke beim Einschaltvorgang,</li> <li>• erklären das verzögerte Anwachsen der Stromstärke mit der Existenz einer Induktionsspannung,</li> <li>• leiten die Formel für die Selbstinduktionsspannung her:  <math display="block">U_{ind}(t) = -L \cdot \dot{I}(t).</math> </li> </ul>



**Kompetenzerwartungen**

<b>Fachwissen</b>	<b>Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung</b>
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass die Induktivität einer Spule ein Maß dafür ist, wie stark die Spule Stromstärkeänderungen verzögert,</li> <li>• geben an, dass im magnetischen Feld einer Spule Energie gespeichert ist und bezeichnen diese als magnetische Feldenergie,</li> <li>• geben die Formel für die in der Spule gespeicherte magnetische Feldenergie an:  <math display="block">W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 .</math> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lösen Aufgaben zur Selbstinduktion und zur Energie des magnetischen Feldes.</li> </ul>

**Hinweise**

**Allgemeine Hinweise**

- qualitative Versuche zur Induktion (LP9)
- Generator (LP9)
- Transformator (LP9)
- Beschreibung von Wechselspannungen (LP9)

**Geeignete Einstiege und Kontexte**

- berühmte Physiker:
  - Wilhelm Weber (1804–1891)
  - Werner von Siemens (1816–1892)
  - Nicola Tesla (1856–1943)
  - Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865)
  - Joseph Henry (1797–1878)
- Historische Versuche von Michael Faraday (1791–1867)
- „Stromkrieg“ zwischen Thomas Alva Edison (1847–1931) und George Westinghouse (1846–1914)
- einfache Spannungserzeugung: Kurbelradio für Katastrophenfälle, Schütteltaschenlampe, Fahrrad-Dynamo, Kurbeltaschenlampe
- induktive Sensoren: Mikrofon, Tonabnehmer, Tachometer (Fahrrad)
- Gefahren durch Induktionsspannung: Spannungsspitzen beim Trennen stromführender Kontakte, Zündspule
- Wirbelstrombremsen (z. B. Free-Fall-Tower)

**Hinweise**

**Fächerübergreifende und fächerverbindende Bezüge**

- Mathematik: Differential- und Integralrechnung, Kettenregel
- Technik: Mikrofon, Tachometer, FI-Schalter, Induktionsherd, Erhitzen eines Trafokerns → Lösung durch geblätterte Trafokerne, magnetische Datenspeicher, Tonabnehmer
- Technik: Wirbelstrombremse, Magnetschwebbahn, magnetische Abschirmung
- Technik: Skineffekt
- Technik: Spannungsspitzen bei Ausschaltvorgängen, Zündspule, Starter bei Leuchtstofflampen
- Sport: Fitnessgeräte (Wirbelstrombremse)

**Außerschulische Lernorte**

- Kraftwerke mit Generatoren: Wasserkraftwerke an der Saar, Kohlekraftwerke, Gaskraftwerke, Kernkraftwerke, Windkraftwerke
- Trafo-Station, Umspannwerk
- Faraday-Museum (London)
- IZES (Institut für Zukunftsenergiesysteme)

**Bildung für nachhaltige Entwicklung**

- CO<sub>2</sub>-Problematik: konventionelle Kraftwerke versus regenerative Stromerzeugung
- Energierückgewinnung beim Bremsen von Fahrzeugen durch Induktion
- geringer Verschleiß durch kontaktlose Energieübertragung mittels induktiver Kopplung bei Elektromotoren oder bei Bremsvorgängen mittels Induktion (Retarder)
- Energieeinsparung durch Kochen mit Induktionskochfeldern

**Berufsorientierende Aspekte**

- Ingenieur für Elektrotechnik
- Kraftwerkstechniker
- Weiterentwicklung von Windkraftanlagen

**Medienbildung**

- Applets und Simulationsprogramme für Induktionsvorgänge
- Einsatz von Messwerterfassungssystemen

Das dritte Themenfeld umfasst die mechanischen Schwingungen, die mechanischen Wellen, die elektromagnetischen Schwingungen, die elektromagnetischen Wellen und das Wellenmodell des Lichts.

Mit den mechanischen Schwingungen lernen die Schülerinnen und Schüler eine neue Bewegungsform kennen. Die Beschreibung von mechanischen Schwingungen führt unter anderem zum Begriff der Rückstellkraft, deren Besonderheit es ist, dass sie stets zur Gleichgewichtslage hin gerichtet ist.

Zunächst werden mechanische Schwingungen unter der idealisierten Betrachtung der Abwesenheit von Reibung betrachtet, so dass eine quantitative Beschreibung erfolgen kann.

Harmonische Schwingungen, also Schwingungen, die einem linearen Kraftgesetz genügen, kommen in Natur und Technik – zumindest in guter Näherung – häufig vor und sind mathematisch gut zu beschreiben. Zur Untersuchung einer harmonischen mechanischen Schwingung wird das Standardbeispiel der Federschwingung betrachtet. Die Herleitung der DGL soll über einen Kraftansatz und nicht über einen Energieansatz erfolgen.

Der Themenbereich mechanische Wellen besitzt eine Reihe von inhaltlichen Aspekten, deren Reihenfolge sich unterschiedlich festlegen lässt. Zentral sind Interferenz und Beugung als typische Wellenphänomene, welche als Erkennungsmerkmale für Wellen geeignet sind. Beugung beschreibt die Ausbreitung von Wellen in den geometrischen Schattenraum. Interferenz beschreibt die ungestörte Überlagerung von Wellen (insbesondere gleicher Frequenz), bei der sich an jedem Ort die Elongationen vektoriell addieren, wodurch es je nach Gangunterschied zu konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz kommen kann. Interferenz gegenläufiger Wellen führt zu stehenden Wellen. Die Demonstration der Überlagerung von Wellen kann z. B. unter Schülermitwirkung mit einer langen Schraubenfeder erfolgen. Die Erarbeitung des Superpositionsprinzips gelingt mit Momentanbildern, die sich mit digitalen Medien erstellen lassen, z. B. mittels Videoanalyse oder mit einem Simulationsprogramm. Das Huygens'sche Prinzip soll lediglich zur Demonstration und Erklärung von Beugungsphänomenen herangezogen werden. Auf die Erklärung weiterer Wellenphänomene wie Brechung oder Reflexion soll nicht weiter eingegangen werden.

Der Themenbereich elektromagnetische Schwingungen ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern, Begriffe und Gesetze, die sie bereits aus dem Themenbereich mechanische Schwingungen kennen, analog zu übertragen. Der Begriff der Schwingung löst sich dabei von der anschaulichen Bewegung eines Körpers und wird auf Größen übertragen. Messwert-erfassungssysteme bieten Möglichkeiten zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der zu betrachtenden Größen.

Bei der Erklärung der Entstehung einer elektromagnetischen Schwingung können die Spannung als Ursache von Strömen und die Induktivität als Spuleneigenschaft wieder aufgegriffen und somit wiederholt werden. Die DGL der elektromagnetischen Schwingung und eine ihrer Lösungen sind analog zur mechanischen Schwingung zu behandeln, was auch klar herausgearbeitet werden sollte. Ebenso bietet es sich an, die mechanische Trägheit als Analogon zur Größe Induktivität einer Spule zu betrachten. Wie bei mechanischen Schwingungen soll die DGL nur auf einem Weg hergeleitet werden, hier jedoch unter Betrachtung eines Energieansatzes. Die Herleitung über die Maschenregel soll nicht erfolgen. Die Entdämpfung einer elektromagnetischen Schwingung soll nicht thematisiert werden.

Im Themenbereich elektromagnetische Wellen gelangt man über die Idee, einen Schwingkreis zu öffnen, zum Hertz'schen Dipol. Um die von einem Dipol ausgehenden elektromagnetischen Wellen beschreiben zu können, ist es sinnvoll, sich zuerst ein Bild über die Schwingungszustände des Dipols zu machen. Ein Empfangsdipol liefert die Information, dass die von einem Dipol abgestrahlte Welle im Fernfeld linear polarisiert ist.

Mit Hilfe stehender Wellen vor einer Metallplatte lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen bestimmen, die in Luft (bzw. Vakuum) mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmt.

Die Methode zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen soll im Grundkurs exemplarisch bei den elektromagnetischen Wellen behandelt werden. Darauf (und auf den Welleneigenschaften des Lichtes) basiert die später im Wellenmodell des Lichtes aufzustellende Maxwell'sche Hypothese, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist.

Den letzten Schwerpunkt in diesem Kapitel bildet das Wellenmodell des Lichts. Über einen einfachen Versuch zur Beugung am Spalt kann über die deutlich sichtbaren Beugungs- und Interferenzerscheinungen schnell nachgewiesen werden, dass Licht Wellencharakter hat. Bei der Beugung am Gitter sollte man sich auf Transmissionsgitter beschränken. Die Beugung am Gitter ist die Voraussetzung für die Aufnahme verschiedener Spektren und somit für die vertiefte Untersuchung von Licht. Die genaue Unterscheidung verschiedener Arten von Spektren und die Definition des Begriffs der Spektrallinien sind an dieser Stelle möglich und auch sinnvoll. Im weiteren Verlauf, beispielsweise bei der quantenhaften Absorption und Emission, kann auf die Begrifflichkeiten zurückgegriffen werden. Die Angabe des Wellenlängenbereichs des sichtbaren Lichts ist von besonderem Interesse, da es sich hierbei um das Licht handelt, das im Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler liegt. Gleichwohl muss betont werden, dass es neben sichtbarem auch für unsere Augen unsichtbares Licht gibt.

### Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>3.1. Mechanische Schwingungen</b>	
<p><b>Beschreibung und Entstehung von mechanischen Schwingungen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren eine <i>mechanische Schwingung</i> als zeitlich periodische Bewegung eines Körpers durch eine Gleichgewichtslage (Ruhelage),</li> <li>• definieren den Begriff <i>Umkehrpunkt</i>,</li> <li>• definieren folgende Größen:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Elongation <math>s</math>,</li> <li>○ Amplitude <math>s_m</math>,</li> <li>○ Schwingungsdauer bzw. Periodendauer <math>T</math>,</li> <li>○ Frequenz <math>f</math>,</li> <li>○ Kreisfrequenz <math>\omega</math>,</li> </ul> </li> <li>• definieren die Begriffe <i>ungedämpfte Schwingung</i> und <i>gedämpfte Schwingung</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einfache Handversuche zur Demonstration freier (gedämpfter) mechanischer Schwingungen (<i>Federpendel</i>, <i>Fadenpendel</i>, <i>Wassersäule</i>, <i>Stimmgabel</i>, <i>Blattfeder</i>, <i>Mulde</i>),</li> <li>• begründen qualitativ die Entstehung einer Schwingung mit Hilfe von Rückstellkraft und Trägheitssatz.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p><b>Harmonische Schwingungen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>definieren den Begriff <i>harmonische Schwingung</i> über die Gültigkeit eines linearen Kraftgesetzes,</li> <li>geben folgende Gesetzmäßigkeiten an: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v(t) = \dot{s}(t)</math>,</li> <li><math>a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t)</math>,</li> </ul> </li> <li>geben für <math>s(0) = +s_m</math> die folgende Lösung der DGL der harmonischen Schwingung des Federpendels (Elongation-Zeit-Gesetz) an: <math display="block">s(t) = s_m \cdot \cos(\omega t) \quad \text{mit } \omega^2 = \frac{D}{m}.</math> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>begründen für das horizontale Federpendel die Gültigkeit des linearen Kraftgesetzes <math>F_{\text{rück}}(s) = -D \cdot s</math> (D: Federkonstante) und geben an, dass dieses Kraftgesetz auch beim vertikalen Federpendel gilt,</li> <li>bestätigen die Gesetzmäßigkeiten <math>v(t) = \dot{s}(t)</math> und <math>a(t) = \dot{v}(t)</math> am Beispiel der geradlinig gleichmäßig beschleunigten Bewegung,</li> <li>leiten die DGL der harmonischen Schwingung des Federpendels aus dem Kraftansatz her: <math display="block">\ddot{s}(t) + \frac{D}{m} \cdot s(t) = 0,</math> </li> <li>bestätigen für <math>s(0) = +s_m</math> eine Lösung der DGL durch Einsetzen,</li> <li>leiten für den Fall <math>s(0) = +s_m</math> das folgende Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz und das folgende Beschleunigung-Zeit-Gesetz der harmonischen Schwingung des Federpendels durch Ableiten her: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v(t) = -s_m \omega \cdot \sin(\omega t) = -v_m \cdot \sin(\omega t)</math>,</li> <li><math>a(t) = -s_m \omega^2 \cdot \cos(\omega t) = -a_m \cdot \cos(\omega t)</math>,</li> </ul> </li> <li>skizzieren für den Fall <math>s(0) = +s_m</math> die Bewegungsgesetze und interpretieren die Diagramme hinsichtlich Geschwindigkeit und Beschleunigung in den Umkehrpunkten und in der Gleichgewichtslage,</li> <li>leiten die Formel für die Schwingungsdauer der harmonischen Schwingung eines Federpendels her: <math display="block">T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}},</math> </li> <li>beschreiben einen Versuch zur Bestätigung der Formel für die Schwingungsdauer.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>geben für ein Federpendel das folgende Gesetz für die potenzielle Energie der Schwingung an:  <math display="block">W_{pot} = \frac{1}{2}Ds^2.</math> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben die Energieumwandlung für ein ungedämpft schwingendes horizontales Federpendel,</li> <li>lösen Aufgaben zum Federpendel.</li> </ul>
<p><b>3.2. Mechanische Wellen</b></p>	
<p><b>Entstehung, Ausbreitung und Eigenschaften von mechanischen Wellen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben eine <i>fortschreitende mechanische Welle</i> als Vorgang, bei dem miteinander gekoppelte, schwingungsfähige Teilchen (Oszillatoren) eines Systems nacheinander gleichartige erzwungene Schwingungen ausführen,</li> <li>geben an, dass bei einer fortschreitenden mechanischen Welle ein Energietransport ohne Materialtransport erfolgt,</li> <li>definieren den Begriff <i>Wellenträger</i>,</li> <li>nennen Beispiele für mechanische Wellen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Seilwellen,</li> <li>Wasserwellen,</li> <li>Schallwellen,</li> <li>Wellen auf einer langen Schraubenfeder,</li> </ul> </li> <li>definieren die Begriffe <i>Transversalwelle</i> und <i>Longitudinalwelle</i> und geben jeweils Beispiele an,</li> <li>definieren für eine eindimensionale mechanische Welle die folgenden Größen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Periodendauer T,</li> <li>Wellenlänge <math>\lambda</math>,</li> <li>Frequenz f,</li> <li>Ausbreitungsgeschwindigkeit v,</li> <li>Amplitude <math>s_m</math>.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>begründen die räumliche und zeitliche Periodizität einer mechanischen Welle anhand von Momentanbildern,</li> <li>begründen, dass die Periodendauer einer Welle mit der Schwingungsdauer ihrer Oszillatoren übereinstimmt,</li> <li>erläutern anhand von Momentanbildern, dass sich bei einer mechanischen Welle ein bestimmter Schwingungszustand entlang eines Wellenträgers ausbreitet.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben Größenordnungen von Ausbreitungsgeschwindigkeiten mechanischer Wellen an (insbesondere Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien),</li> <li>• definieren den Begriff <i>harmonische Welle</i>,</li>   <li>• definieren den Begriff <i>lineare Polarisierung</i>,</li> <li>• nennen die Polarisierbarkeit als charakteristische Eigenschaft von Transversalwellen.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• leiten die <i>Grundgleichung der Wellenlehre</i> her: <math>v = \lambda \cdot f</math>,</li> <li>• beschreiben einen Versuch zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer mechanischen Welle mit Hilfe der Grundgleichung der Wellenlehre (Bestimmung von <math>\lambda</math> und <math>f</math>),</li>   <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration der linearen Polarisierung von Transversalwellen,</li> <li>• lösen Aufgaben zu mechanischen Wellen, insbesondere: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ zur Entstehung, Ausbreitung und Eigenschaften von Wellen,</li> <li>○ zur Grundgleichung der Wellenlehre,</li> <li>○ zu Momentanbildern,</li> <li>○ zu Schwingungen von bestimmten Oszillatoren auf dem Wellenträger.</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Überlagerung von Wellen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben für die Überlagerung zweier Störungen an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ treffen zwei Wellenberge bzw. zwei Wellentäler aufeinander, so kommt es zur Verstärkung,</li> <li>○ treffen ein Wellenberg und ein Wellental aufeinander, so kommt es zur Abschwächung bzw. Auslöschung,</li> </ul> </li> <li>• definieren die Begriffe <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Interferenz,</li> <li>○ konstruktive Interferenz,</li> <li>○ destruktive Interferenz,</li> <li>○ Interferenzmuster,</li> <li>○ gleichphasige Schwingungen.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Handversuch zur Demonstration der Überlagerung gegenläufiger Störungen auf einem linearen Wellenträger und begründen anhand von Momentanbildern das Superpositionsprinzip: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ungestörte gegenseitige Durchdringung,</li> <li>○ lokale Addition der Elongationen,</li> </ul> </li> <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration des Phänomens Interferenz von Wasserwellen mit zwei als punktförmig anzunehmenden Erregern gleicher Frequenz und Phase.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren die Größe <i>Gangunterschied</i> <math>\Delta s</math> für zwei gleichfrequent und gleichphasig schwingende Erreger.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• begründen die Interferenzbedingungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>konstruktive Interferenz</i>: <math>\Delta s = k \cdot \lambda, k \in \mathbb{N}</math>,</li> <li>○ <i>destruktive Interferenz</i>: <math>\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, k \in \mathbb{N}</math>,</li> </ul> </li> <li>• lösen Aufgaben zur Überlagerung von Wellen.</li> </ul>
<p><b>Stehende Wellen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren die Begriffe <i>stehende Welle</i>, <i>Schwingungsknoten</i> und <i>Schwingungsbauch</i>,</li> <li>• geben die folgenden Eigenschaften einer stehenden Welle an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ alle Oszillatoren schwingen mit gleicher Frequenz, aber ortsabhängiger Amplitude,</li> <li>○ zwischen zwei benachbarten Schwingungsknoten erfolgen gleichphasige Schwingungen,</li> <li>○ der Abstand benachbarter Schwingungsbäuche oder -knoten beträgt eine halbe Wellenlänge,</li> <li>○ es erfolgt kein Energietransport.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration des Phänomens der Reflexion einer linearen fortschreitenden Welle,</li> <li>• beschreiben einen Versuch zur Erzeugung einer stehenden Welle,</li> <li>• beschreiben die Entstehung einer stehenden Welle durch Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude,</li> </ul> <p>• lösen Aufgaben zu stehenden Wellen.</p>



## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p><b>Huygens'sches Prinzip</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren die Begriffe: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Wellenfront,</li> <li>○ ebene Welle,</li> <li>○ Kreiswelle,</li> </ul> </li> <li>• geben das <i>Huygens'sche Prinzip</i> an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Erregerzentrum einer Elementarwelle angesehen werden, die sich mit gleicher Frequenz wie die ursprüngliche Welle ausbreitet,</li> <li>○ Die neue Wellenfront ist die Einhüllende dieser Elementarwellen,</li> </ul> </li> <li>• definieren den Begriff <i>Beugung</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration der Ausbreitung von ebenen Wasserwellen hinter den folgenden Hindernissen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ breiter Spalt,</li> <li>○ schmaler Spalt,</li> <li>○ viele Spalte (Gitter),</li> </ul> </li> <li>• lösen Aufgaben zum Huygens'schen Prinzip.</li> </ul>
<b>3.3. Elektromagnetische Schwingungen</b>	
<p><b>Beschreibung und Entstehung von elektromagnetischen Schwingungen</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren den Begriff <i>elektromagnetischer Schwingkreis</i>,</li> <li>• definieren den Begriff <i>elektromagnetische Schwingung</i> als zeitlich periodische Änderung von Spannung und Stromstärke im elektromagnetischen Schwingkreis.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Demonstration einer freien gedämpften elektromagnetischen Schwingung,</li> <li>• skizzieren den zeitlichen Verlauf der Spannung und der Stromstärke bei einer gedämpften freien elektromagnetischen Schwingung und begründen damit die zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke um <math>\frac{T}{4}</math> bzw. Phasenverschiebung um <math>\frac{\pi}{2}</math>,</li> <li>• erklären die Entstehung einer (als ungedämpft angenommenen) elektromagnetischen Schwingung mit Hilfe von Spannung als Ursache von Strömen und Induktivität als Spuleneigenschaft.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>geben die folgende Lösung der DGL der ungedämpften elektromagnetischen Schwingung (Ladung-Zeit-Gesetz) an: für <math>Q(0) = +Q_m</math>: <math>Q(t) = Q_m \cdot \cos(\omega t)</math> mit <math>\omega^2 = \frac{1}{LC}</math>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben die Energieumwandlungen im als ungedämpft angenommenen elektromagnetischen Schwingkreis,</li> <li>leiten die DGL der ungedämpften elektromagnetischen Schwingung aus dem Energieansatz her: <math>\ddot{Q}(t) + \frac{1}{LC} \cdot Q(t) = 0</math>,</li> <li>bestätigen für den Fall <math>Q(0) = +Q_m</math> eine Lösung der DGL durch Einsetzen,</li> <li>skizzieren für den Fall <math>Q(0) = +Q_m</math> den Graphen für <math>Q(t)</math> in einem geeigneten Diagramm,</li> <li>leiten die Formel für die Schwingungsdauer der ungedämpften elektromagnetischen Schwingung her: <math>T = 2\pi\sqrt{LC}</math> (<i>Thomson'sche Schwingungsgleichung</i>),</li> <li>beschreiben einen Versuch zur Bestätigung der Formel für die Schwingungsdauer,</li> <li>lösen Aufgaben zur Beschreibung und Entstehung elektromagnetischer Schwingungen.</li> </ul>
<h3>3.4. Elektromagnetische Wellen</h3>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>definieren den Begriff <i>Hertz'scher Dipol</i>,</li> <li>geben die Folgen der Öffnung eines elektromagnetischen Schwingkreises (Übergang von einem Schwingkreis zu einem Hertz'schen Dipol) an: <ul style="list-style-type: none"> <li>die elektrischen und magnetischen Felder reichen nun weit in den Raum,</li> <li>die Eigenfrequenz des Schwingkreises nimmt zu (da Induktivität L und Kapazität C abnehmen).</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben einen qualitativen Versuch zur Demonstration der Übertragung einer elektromagnetischen Schwingung von einem Dipol (Sendedipol) auf einen anderen (Empfangsdipol),</li> <li>beschreiben einen qualitativen Versuch zur Überprüfung des Schwingungszustands eines Dipols mit Glimmlampe (Spannung) und Glühlampe (Stromstärke).</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass ein schwingender Hertz'scher Dipol elektromagnetische Wellen aussendet,</li> <li>• geben an, dass sich die elektrischen und magnetischen Feldlinien vom Dipol ablösen und sich als geschlossene Feldlinien im Raum ausbreiten,</li> <li>• geben für das Fernfeld an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>\vec{E}</math> und <math>\vec{B}</math> schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung,</li> <li>○ <math>\vec{E}</math> schwingt parallel zur Dipolachse, <math>\vec{B}</math> schwingt senkrecht dazu,</li> </ul> </li> <li>• geben an, dass sich elektromagnetische Wellen im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten,</li> <li>• nennen Beispiele zur Anwendung elektromagnetischer Wellen (z. B. Handynetz, Radar, Mikrowellenherd).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben das elektrische und das magnetische Feld anhand von Momentanbildern in der Umgebung eines Dipols,</li> <li>• beschreiben einen qualitativen Versuch zur Demonstration, dass die von einem Dipol abgestrahlten elektromagnetischen Wellen im Fernfeld linear polarisiert sind und begründen damit, dass elektromagnetische Wellen Transversalwellen sind,</li> <li>• beschreiben einen Versuch zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen durch Reflexion an einer Metallplatte (stehende Welle),</li> <li>• lösen Aufgaben zu elektromagnetischen Wellen.</li> </ul>
<b>3.5. Wellenmodell des Lichts</b>	
<p><b>Licht als elektromagnetische Welle</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass Interferenz und Beugung typische Wellenphänomene sind,</li> <li>• formulieren die <i>Maxwell'sche Hypothese</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen qualitativen Versuch zur Beugung von Licht an einem Einfachspalt und begründen, dass Licht Wellenverhalten zeigt.</li> </ul>
<p><b>Beugung und Interferenz am Gitter</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren den Begriff <i>optisches Gitter</i> (Transmissionsgitter),</li> <li>• definieren die Größe <i>Gitterkonstante g</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Beugung von Laserlicht an einem optischen Gitter.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass die Gitterkonstante in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts liegen muss, damit sich ein Interferenzmuster gut beobachten lässt.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• erklären das Zustandekommen des Interferenzmusters mit dem Wellenmodell des Lichts und leiten das folgende Gesetz für die Lage der Interferenzmaxima beim optischen Gitter her:  <math display="block">\sin(\alpha_k) = \frac{k \cdot \lambda}{g}</math> mit <math>k \in \mathbb{N}</math>  (<math>\alpha_k</math>: Beugungswinkel k-ter Ordnung),</li> <li>• berechnen anhand von Messdaten die Wellenlänge des Lichts eines Lasers mit Hilfe eines optischen Gitters (auch für große Winkel).</li> </ul>
<p><b>Spektren</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren die Begriffe <i>Spektrum</i> und <i>Spektrallinie</i>,</li> <li>• geben an, dass <ul style="list-style-type: none"> <li>○ glühende Festkörper und Flüssigkeiten ein kontinuierliches Spektrum aussenden,</li> <li>○ leuchtende Gase Linienspektren aussenden, die charakteristisch für das Gas sind,</li> </ul> </li> <li>• geben den Wellenlängenbereich sichtbaren Lichts an:  <math>400 \text{ nm (violett)} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm (rot)}</math>,</li> <li>• geben an, dass sich das Spektrum über die Grenzen des sichtbaren Lichts fortsetzt: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ultraviolette Strahlung schließt sich an den violetten Bereich an,</li> <li>○ infrarote Strahlung schließt sich an den roten Bereich an,</li> </ul> </li> <li>• nennen Nachweisgeräte für UV-Strahlung (ZnS-Schirm) und IR-Strahlung (Thermosäule, Photodiode).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen Versuch zur Erzeugung des Spektrums beliebiger Lichtquellen (z. B. Glühlampe, Gas-Hochdrucklampe, Sonne, ...) mit einem optischen Gitter,</li> <li>• lösen Aufgaben zum Wellenmodell des Lichts.</li> </ul>

## Hinweise

**Allgemeine Hinweise**

- Hooke'sches Gesetz (LP8)
- Formen mechanischer Energie (LP8)
- Energieerhaltung (LP8)
- Analogien:
  - Interferenzmuster bei zwei Quellen gleicher Frequenz und Doppelspalt
  - mechanische Schwingungen – elektromagnetische Schwingungen
  - mechanische Wellen – elektromagnetische Wellen
  - stehende mechanische Wellen – Dipolschwingung
- Reflexion (LP7)
- Brechung (LP9)
- Rückkopplung bei einer Klingel (LP7)
- Prismenspektrum (LP9)
- Ortsfaktor (LP8)
- geradlinig gleichmäßig beschleunigte Bewegung (LP10)
- phasenrichtige Energiezufuhr als Handversuch
- fakultativ: Temperaturstrahler

**Geeignete Einstiege und Kontexte**

- Berühmte Physiker:
  - Franz Melde (1832–1901)
  - Ernst Florenz Friedrich Chladni (1756–1826): Chladni'sche Klangfiguren
  - August Kundt (1815–1894)
  - Heinrich Rubens (1865–1922): Rubens'sches Flammenrohr
  - Christiaan Huygens (1629–1695)
  - William Thomson „Lord Kelvin“ (1824–1907)
  - Heinrich Hertz (1857–1894)
  - James Clerk Maxwell (1831–1879)
- Historische Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit:
  - Ole Rømer (1644–1710): Verfinsternung des Jupitermondes Io
  - Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868): Drehspiegelmethode
  - Albert Abraham Michelson (1852–1931): Michelson-Interferometer
- Schwungstab, Heulrohr
- Beugung am Reflexionsgitter: Versuche mit CD als Gitter
- Handversuche mit Laserpointern
- Gefahren durch erzwungene Schwingungen:
  - Schwingungen bei Seilbahnen
  - Schwingungen bei Brücken und Bauwerken

**Hinweise**

- Pendeluhr
- Boomwhackers
- Zungenfrequenzmesser
- Schwingquarz
- Interferenzversuche mit Schallwellen
- Radioastronomie
- Handversuche mit Laserpointern
- Handversuche mit einer langen Schraubenfeder

**Fächerübergreifende und fächerverbindende Bezüge**

- Mathematik: Bogenmaß, trigonometrische Funktionen (LP10)
- Mathematik: Differentialgleichung
- Chemie: Rückkopplung bei chemischen Prozessen
- Biologie: Biolumineszenz (Glühwürmchen)
- Biologie: Wirkung der UV- und der IR-Strahlung auf den menschlichen Körper
- Medizin: Ultraschall
- Naturwissenschaft und Technik: Spektralanalyse, Kristallstrukturanalyse
- Technik: Teleskopfederung am Fahrrad, Schwingungsdämpfer am Auto
- Technik: Resonanzerscheinungen
- Technik: Zeitmessung
- Technik: seismische Wellen zur Bodenuntersuchung
- Technik: Schwingkreise als Sensoren z. B. Induktionsschleifen im Straßenverkehr, elektronische Warensicherung
- Technik: Nachrichtentechnik, Radar, Mikrowellen, digitale Informationsübertragung
- Technik: Körperscanner am Flughafen (Terahertz-Strahlung)
- Technik: organische LED
- Technik: Ultraschall zur zerstörungsfreien Materialprüfung
- Technik: Handynetze
- Erdkunde, Biologie, Politik, Mathematik: Rückkopplung als allgemeines Prinzip
- Erdkunde: seismische Wellen (Erdbeben), Entstehung von Tsunamis
- Erdkunde: Eis-Albedo-Rückkopplung
- Wirtschaft: Kondratjew-Zyklen
- Musik: Fourier-Synthese/Analyse
- Musik: akustische Schwingungen, Frequenzen der Tonleiter, Musikinstrumente

**Hinweise**

- Musik: Demonstration akustischer Resonanzen
- Musik: Konzertsaal, reflexionsarme Räume (schalltote Räume)
- Architektur: Tilgerpendel im Taipei 101

**Außerschulische Lernorte**

- PTB ([www.ptb.de](http://www.ptb.de), Braunschweig)
- IZFP ([www.izfp.fraunhofer.de](http://www.izfp.fraunhofer.de), Saarbrücken)
- Dynamikum Pirmasens
- Wellenbad
- Experimenta Frankfurt
- Deutsches Museum München
- Senderanlagen

**Bildung für nachhaltige Entwicklung**

- elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Entwicklung alternativer Leuchtmittel
- erdbebensicheres Bauen
- Wellenkraftwerke
- Lärmschutz

**Berufsorientierende Aspekte**

- zerstörungsfreie Materialprüfung
- Studiengänge: Biophysik, Nachrichtentechnik, Laserphysik, Geophysik, Medizinphysik

**Medienbildung**

- Aufzeichnung der Bewegungsgesetze von mechanischen Schwingungen und von Größen bei elektromagnetischen Schwingungen mit einem Messwerverfassungssystem
- Modellbildungssysteme, Computeralgebrasysteme
- Film: „Tacoma Bridge“
- Simulationsprogramme zur Darstellung von Schwingungen und Wellen
- Videoanalyse
- dynamische Geometriesoftware
- digitales Spektrometer
- Einsatz des Smartphones bei der Messwerverfassung bei Schwingungen
- Simulationsprogramm zur Darstellung dynamischer Feldlinienbilder

Das vierte Kapitel „Quanten und Atome“ beginnt mit dem Photoeffekt und der damit verbundenen Erarbeitung des Photonenmodells. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass Licht als Träger von Energie in der Lage ist, Elektronen aus Metalloberflächen herauszulösen. Dies ist aber weniger überraschend als die Tatsache, dass dies nur für Licht mit genügend kleiner Wellenlänge bzw. ausreichend großer Frequenz zutrifft. Die genaue Untersuchung des Photoeffekts gelingt unter Verwendung geeigneter Versuche mit einer Photozelle. Die Ergebnisse können in Diagrammen dargestellt werden, die zu einer quantitativen Beschreibung führen. In diesem Rahmen ergibt sich das Planck'sche Wirkungsquantum als universelle Naturkonstante und als eine der wichtigsten Konstanten in der gesamten Quantenphysik. Auf diese Tatsache sollte in den folgenden Teilkapiteln besonders eingegangen werden, um die Bedeutung dieser Konstanten zu betonen. Die Definition des Begriffs Photon wird ermöglicht und das Photonenmodell des Lichts kann formuliert werden. Bei der Gegenüberstellung des Wellenmodells und des Photonenmodells von Licht muss klar verdeutlicht werden, dass beide Modelle sich gegenseitig nicht ausschließen und sich auch nicht widersprechen, sondern in Ergänzung zueinander stehen. Dabei beschreibt das Wellenmodell im Allgemeinen die Ausbreitung des Lichts, wohingegen das Photonenmodell zur Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit Materie geeignet ist. Erneut bietet es sich hier an, auf die besondere Bedeutung eines Modells mit seinen Stärken und insbesondere auch seinen Grenzen einzugehen.

Nach der Beschreibung der Entstehung der Röntgenstrahlung und ihrer Eigenschaften werden die Spektren der Strahlung einer Röntgenröhre betrachtet. Die Spektren müssen vorgegeben werden. Die Analyse der Spektren von Röntgenröhren zeigt, dass Röntgenspektren eine Überlagerung eines kontinuierlichen Spektrums (Röntgenbremsspektrum) und eines Linienspektrums (charakteristisches Röntgenspektrum) sind. Die Erklärung der kurzwelligen Grenze der Röntgenbremsstrahlung bietet die Möglichkeit, das Photonenmodell des Lichts zur Beschreibung eines weiteren Phänomens anzuwenden. Die Erklärung der Entstehung der charakteristischen Strahlung ist im Grundkurs nicht vorgesehen.

Die Betrachtung von Nebelkammeraufnahmen führt zur Erkenntnis, dass bei der Wechselwirkung von Licht mit Materie neue Teilchen entstehen können (Paarerzeugung). Erhaltungssätze sind auch bei der Beschreibung der Paarerzeugung von besonderer Bedeutung. Die Impulserhaltung, die zur Notwendigkeit der Anwesenheit von Materie führt, soll nicht betrachtet werden.

Die Erkenntnis, dass Licht in bestimmten Situationen Teilchencharakter zeigt, legt die Vermutung nahe, dass Teilchen in bestimmten Situationen auch Wellencharakter zeigen, eine Überlegung, die zur Hypothese von de Broglie führt. Für den experimentellen Nachweis ist es unter dem Rückgriff auf Erkenntnisse aus dem Kapitel Wellenmodell des Lichts plausibel, Kristallgitter zu verwenden. Mit Hilfe einer Elektronenbeugungsröhre gelingt der qualitative Nachweis des Wellencharakters von Elektronen. Ein quantitativer Nachweis wird nicht angestrebt.

Die Analyse des Verhaltens von Quantenobjekten am Doppelspalt führt zu den grundlegenden Merkmalen von Quantenobjekten (Nichtvorhersagbarkeit von Einzelereignissen, Eindeutigkeit des Messprozesses, stochastisches Verhalten). Eine quantitative Beschreibung des Verhaltens von Quantenobjekten ist nicht vorgesehen.

Quantenobjekte besitzen am Doppelspalt die Eigenschaft Ort nicht (Nichtlokalität). Dies führt zur Orts-Impuls-Unschärfe als Spezialfall der Heisenberg'schen Unschärferelation. Die Interpretation der Heisenberg'schen Unschärferelation im Hinblick auf die Frage der Minimierung von Messfehlern führt zu dem Begriff der Komplementarität.

Der Rutherford'sche Streuversuch ist aus Klassenstufe zehn bekannt. Zur weiteren Betrachtung ist lediglich die Kenntnis des Rutherford'schen Atommodells wichtig.



Die von Gasen ausgesendeten Linienspektren belegen, dass Atome Licht quantenhaft emittieren. Versuche zeigen, dass dies auch für die Absorption gilt. Zusammengefasst erhält man ein Bild vom Atom: Es besitzt diskrete Energiezustände. Übergänge sind möglich, wobei genau die Energiedifferenz zwischen den Energiezuständen emittiert bzw. absorbiert wird.

Beim Bohr'schen Atommodell wird das Konzept der quantenhaften Absorption und Emission aufgegriffen und mit dem an ein Sonnensystem angelehnten Bild um den Atomkern kreisender Elektronen verbunden. Die Formel für die Gesamtenergie des H-Atoms soll nicht hergeleitet, sondern lediglich angegeben werden. Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass das H-Atom diskrete Energieniveaus besitzt. Ein Vorzug des Bohr'schen Atommodells ist seine Anschaulichkeit, da sich Energiezustände konkreten Bahnen zuordnen lassen. Dies vereinfacht das Erlernen verschiedener Begriffe wie z. B. H-Serie, Ionisierungsenergie etc. Am Beispiel des Bohr'schen Modells können aber auch die Grenzen von Modellen und der Wechsel von Modellen thematisiert werden.

Im Kapitel Kernphysik und Radioaktivität lernen die Schülerinnen und Schüler, dass die Bestandteile des Atomkerns aus noch kleineren Bestandteilen, den Quarks, aufgebaut sind. Die Betrachtung der Zerfallsarten soll sich auf ein Minimum beschränken. Eine Beschreibung mit Hilfe der Quarks würde an dieser Stelle zu weit führen. Das Zerfallsgesetz wurde bereits in Klassenstufe zehn behandelt. Hier soll nun die DGL für den radioaktiven Zerfall betrachtet werden. Eine Herleitung ist nicht vorgesehen, so dass die DGL anzugeben ist. Außerdem kommt die e-Funktion zur Beschreibung des Zerfallsgesetzes zum Einsatz.

**Kompetenzerwartungen**

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>4.1. Photoeffekt und Photonenmodell</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren den Begriff <i>Photoeffekt</i>,</li> <li>• geben an, dass die Stärke des Photostroms mit wachsender Intensität des eingestrahlten Lichts steigt,</li> <li>• definieren folgende Begriffe:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Photoelektron,</li> <li>○ Photospannung (Gegenspannung, bei der der Photostrom null wird),</li> <li>○ Grenzfrequenz <math>f_G</math>,</li> <li>○ Austrittsarbeit <math>W_A</math>.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben den <i>Hallwachs-Versuch</i> zur Demonstration des (äußeren) Photoeffekts und deuten den Versuch: Licht ausreichend großer Frequenz kann Elektronen aus Metallen auslösen,</li> <li>• beschreiben den Aufbau einer Photozelle,</li> <li>• beschreiben und erklären Versuche zur Erzeugung einer Spannung an einer Photozelle und eines Photostroms,</li> <li>• beschreiben die Gegenfeldmethode zur Bestimmung der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>definieren den Begriff <i>Photon</i>.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen von: <ul style="list-style-type: none"> <li>Intensität (unabhängig),</li> <li>Wellenlänge/Frequenz,</li> <li>Kathodenmaterial,</li> </ul> </li> <li>zeichnen das Diagramm zur Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen von der Frequenz des eingestrahlten Lichts für verschiedene Kathodenmaterialien und begründen damit: <ul style="list-style-type: none"> <li>die Existenz einer materialabhängigen Grenzfrequenz,</li> <li>die Existenz einer materialabhängigen Austrittsarbeit,</li> <li>dass die Steigung der Geraden vom Kathodenmaterial unabhängig ist und eine Naturkonstante ist (Planck-Konstante <math>h</math>),</li> <li>den folgenden Zusammenhang: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>W_{kin} = h \cdot f - W_A</math>,</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>beschreiben das <i>Photonenmodell von Albert Einstein</i>,</li> <li>deuten den Photoeffekt im Photonenmodell und geben an, dass die Energie quantisiert übertragen wird,</li> <li>interpretieren die Gleichung <math>h \cdot f = W_{kin} + W_A</math> (lichtelektrische Gleichung) als Energiebilanz beim Photoeffekt,</li> <li>geben begründet an, welche experimentellen Ergebnisse dem Wellenmodell des Lichts widersprechen und erklären sie mit dem Photonenmodell: <ul style="list-style-type: none"> <li>Existenz einer Grenzfrequenz,</li> <li>Abhängigkeit der Photospannung von der Frequenz des eingestrahlten Lichts,</li> <li>Unabhängigkeit der Photospannung von der Intensität,</li> </ul> </li> <li>lösen Aufgaben zum Photoeffekt und Photonenmodell.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>4.2. Röntgenstrahlung</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben Eigenschaften von <i>Röntgenstrahlung</i> an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ unsichtbare und materiedurchdringende elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen von ca. <math>10^{-10}m</math>,</li> <li>○ Schwärzung von Photoplatten,</li> </ul> </li> <li>• geben Anwendungsbereiche von Röntgenstrahlung an (z. B. Medizin, Materialprüfung, Festkörperphysik),</li> <li>• geben an, dass ein Röntgenspektrum eine Überlagerung zweier Spektren ist: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ einem kontinuierlichen Spektrum mit kurzweiliger Grenze (<i>Röntgenbremspektrum</i>),</li> <li>○ einem Linienspektrum (<i>charakteristisches Spektrum</i>),</li> </ul> </li> <li>• geben an, dass die Wellenlängen der Spektrallinien im charakteristischen Spektrum unabhängig von der Beschleunigungsspannung sind.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben den Aufbau und erklären die Funktionsweise einer Röntgenröhre,</li> <li>• skizzieren qualitativ Röntgenspektren und beschreiben den Einfluss einer Erhöhung der Beschleunigungsspannung und des Anodenmaterials,</li> <li>• erklären die Entstehung der Röntgenbremsstrahlung,</li> <li>• erklären die Existenz der kurzweiligen Grenze <math>\lambda_{\min}</math> mit dem Photonenmodell des Lichts und leiten die folgende Formel her: <math display="block">\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e} ,</math> </li> <li>• lösen Aufgaben zur Röntgenstrahlung.</li> </ul>
<b>4.3. Paarerzeugung und Paarvernichtung</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben die Ruhemasse und die Ladung von Positronen an,</li> <li>• geben an, dass eine Paarerzeugung im elektrischen Feld eines Atomkerns stattfinden kann,</li> <li>• geben an, dass beim Aufeinandertreffen eines Positrons und eines Elektrons die gesamte Masse in Energie in Form von Photonen umgewandelt wird (<i>Paarvernichtung</i>).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• interpretieren Nebelkammeraufnahmen zum Prozess der Paarerzeugung,</li> <li>• beschreiben den Prozess der <i>Paarerzeugung</i>,</li> <li>• leiten die Formel für die Mindestenergie einer Paarerzeugung auslösenden Photons her: <math>W_{\min} = 2m_{o,e} \cdot c^2</math>,</li> <li>• lösen Aufgaben zur Paarerzeugung und Paarvernichtung.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>4.4. Welleneigenschaften von Elektronen</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>formulieren die <i>Hypothese von de Broglie</i>: kleine bewegte Teilchen verhalten sich wie eine Welle (Materiewelle) mit der Materiewellenlänge (<i>de Broglie-Wellenlänge</i>) <math>\lambda_D = \frac{h}{p}</math> mit <math>p = m \cdot v</math>,</li> <li>geben an, dass Kristalle regelmäßig aufgebaut sind und Gitterstrukturen in der Größenordnung von <math>10^{-10} \text{ m}</math> haben.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>leiten die Formeln für die Masse und den Impuls von Photonen her: <math>m_{ph} = \frac{hf}{c^2}</math> und <math>p_{ph} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}</math>,</li> <li>leiten die Formel zur Bestimmung der Materiewellenlänge eines geladenen Teilchens her, das die Beschleunigungsspannung <math>U_B</math> durchlaufen hat (nichtrelativistischer Ansatz): <math>\lambda_D = \frac{h}{\sqrt{2q \cdot U_B \cdot m}}</math>,</li> <li>berechnen die Materiewellenlänge für einige Beschleunigungsspannungen (nichtrelativistische Rechnung) und begründen, dass die Materiewellenlänge bei geeigneten Beschleunigungsspannungen in der Größenordnung der Gitterstruktur von Kristallen liegt,</li> <li>beschreiben einen qualitativen Versuch zur Beugung von Elektronen an polykristallinem Graphit mit einer Elektronenbeugungsröhre,</li> <li>lösen Aufgaben zu Welleneigenschaften von Elektronen.</li> </ul>
<b>4.5. Wahrscheinlichkeitsverhalten von Quantenobjekten</b>	
	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>beschreiben einen Versuch zur Beugung von einzelnen beschleunigten Elektronen mit gleicher kinetischer Energie an einem Doppelspalt und begründen: <ul style="list-style-type: none"> <li>die Nichtvorhersagbarkeit des Ortes des Auftreffens eines einzelnen Elektrons,</li> <li>die Eindeutigkeit von Messergebnissen (Quantenmerkmal),</li> <li>die Reproduzierbarkeit der Verteilung nach dem Auftreffen vieler Elektronen (statistisches Verhalten).</li> </ul> </li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben für die Beugung von Elektronen an einem Doppelspalt qualitativ die Intensitätsverteilung der Beugungsfigur und deuten die Intensität in einem kleinen Bereich als Maß für die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron in diesem Bereich zu registrieren,</li> <li>• vergleichen die Wahrscheinlichkeitsverteilung auf einem Schirm bei einem Doppelspaltversuch mit Elektronen bei jeweils einem abgedeckten Spalt mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung ohne abgedeckten Spalt und geben an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ dass die Überlagerung der beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen an den Einfachspalten nicht mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung am Doppelspalt übereinstimmt,</li> <li>○ dass sich bei einzelnen Elektronen am Doppelspalt das Phänomen Interferenz beobachten lässt (Wellenmerkmal),</li> </ul> </li> <li>• lösen Aufgaben zum Wahrscheinlichkeitsverhalten von Quantenobjekten.</li> </ul>
<p><b>4.6. Heisenberg'sche Unschärferelation</b></p>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben die <i>Heisenberg'sche Unschärferelation</i> an:  <math display="block">\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}</math> (Orts-Impuls-Unschärfe)  (<math>\Delta x</math>: Ortsunschärfe,  <math>\Delta p_x</math>: Impulsunschärfe).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• begründen mit dem Doppelspaltversuch mit jeweils einem abgedeckten Spalt, dass einzelne Quantenobjekte am Doppelspalt die Eigenschaft Ort nicht besitzen (Nichtlokalität).</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass in der klassischen Physik das Minimieren von Messfehlern bis hin zur Vernachlässigbarkeit gegenüber dem Betrag der zu messenden Größe möglich ist, während es bei der Untersuchung von Quantenobjekten Paare von Größen gibt, deren Beträge nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden können (Komplementarität).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lösen Aufgaben zur Heisenberg'schen Unschärferelation.</li> </ul>
<p><b>4.7. Quantenhafte Emission und Absorption</b></p>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben das <i>Rutherford'sche Atommodell</i> an,</li> <li>• nennen die folgenden Möglichkeiten, Atome zum Aussenden von Licht anzuregen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ elektrische Anregung,</li> <li>○ thermische Anregung,</li> <li>○ optische Anregung,</li> </ul> </li> <li>• geben an, dass: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Atome diskrete Energiezustände haben,</li> <li>○ ein Atom von einem Energiezustand <math>W_n</math> in einen energetisch höherliegenden Energiezustand <math>W_m</math> wechseln kann, indem die Energiedifferenz <math>W_m - W_n</math> absorbiert wird (quantenhafte Absorption),</li> <li>○ ein Atom von einem Energiezustand <math>W_m</math> in einen energetisch niedriger liegenden Energiezustand <math>W_n</math> wechseln kann, indem ein Photon mit der Energie <math>W_m - W_n</math> emittiert wird (quantenhafte Emission).</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• begründen mit dem Photonenmodell, dass Linienspektren von Gasen ein Beleg dafür sind, dass Atome Licht quantenhaft emittieren,</li> <li>• beschreiben einen qualitativen Versuch (z. B. Na-Dampflampe, Na-Flamme und Schirm) zur Demonstration, dass Gase nur Licht mit den Frequenzen absorbieren können, die sie auch emittieren (Resonanzabsorption),</li> <li>• lösen Aufgaben zur quantenhaften Emission und Absorption.</li> </ul>

Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<b>4.8. Das Bohr'sche Atommodell</b>	
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben die beiden <i>Bohr'schen Postulate</i> an:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Quantenbedingung:</i>  <math>2\pi r_n = n \cdot \lambda_n, n \in \mathbb{N}^*</math>                                      (strahlungsfreie Bewegung),</li> <li>○ <i>Frequenzbedingung:</i>  <math>W_m - W_n = h \cdot f_{m,n}, m, n \in \mathbb{N}^*</math>                                      (<math>f_{m,n}</math>: Frequenz der emittierten/absorbierten Strahlung),</li> </ul> </li> <li>• geben an, dass die Bahnradien nur diskrete Werte <math>r_n</math> (<math>n \in \mathbb{N}^*</math>) annehmen können,</li> <li>• geben die Formel zur Berechnung der Gesamtenergie für die n-te Bahn beim H-Atom an:  <math>W_n = W_{kin,n} + W_{pot,n} = -W_R \cdot \frac{1}{n^2}, n \in \mathbb{N}^*</math>,</li> <li>• definieren den Begriff H-Serie und geben folgende Serien des H-Atoms an:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Lyman (<math>n = 1</math>; UV),</li> <li>○ Balmer (<math>n = 2</math>; teilweise sichtbar),</li> <li>○ Paschen (<math>n = 3</math>; IR),</li> </ul> </li> <li>• definieren den Begriff <i>Ionisieren</i> für das H-Atom und geben die Ionisierungsenergie an,</li> <li>• geben Leistungen und Grenzen des Bohr'schen Atommodells an.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben das <i>Bohr'sche Atommodell</i>,</li> <li>• zeichnen das Energieniveauschema des H-Atoms und tragen die Wasserstoffserien ein,</li> <li>• leiten die Serienformeln für das H-Atom her:  <math>f_{m,n} = f_R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), m &gt; n; m, n \in \mathbb{N}^*</math>                      (<math>f_R = \frac{W_R}{h}</math>: Rydberg-Frequenz),</li> <li>• bestätigen mit Messdaten, dass sich mit den Serienformeln die H-Serien berechnen lassen,</li> <li>• lösen Aufgaben zum Bohr'schen Atommodell.</li> </ul>
<b>4.9. Kernphysik und Radioaktivität</b>	
<p><b>Aufbau des Atomkerns und Kernbindungsenergie</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben an, dass ein Atomkern aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist,</li> <li>• geben an, dass Protonen und Neutronen aus noch kleineren Bestandteilen, den <i>Quarks</i>, aufgebaut sind.</li> </ul>	

## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• definieren folgende Begriffe: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nukleon,</li> <li>○ Kernladungszahl <math>Z</math>,</li> <li>○ Neutronenzahl <math>N</math>,</li> <li>○ Massenzahl <math>A</math>,</li> </ul> </li> <li>• geben den Zusammenhang <math>A = Z + N</math> an,</li> <li>• definieren den Begriff <i>Nuklid</i>,</li> <li>• geben die folgenden Schreibweisen für Nuklide an: <math>{}^A_ZX</math> bzw. <math>XA</math> (<math>X</math>: Elementsymbol),</li> <li>• geben an, dass Atomkerne durch die <i>Kernkraft</i> (starke Wechselwirkung) zusammengehalten werden,</li> <li>• geben Eigenschaften der Kernkraft an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ geringe Reichweite,</li> <li>○ Ladungsunabhängigkeit,</li> <li>○ stärker als die Coulombkraft.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben den Aufbau einer <i>Nuklidkarte</i>,</li> <li>• begründen die Stabilität von Atomkernen,</li> <li>• lösen Aufgaben zum Kernaufbau.</li> </ul>
<p><b>Kernstrahlung und Kernzerfall</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben die Eigenschaften der Strahlung radioaktiver Stoffe an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schwärzung von Fotoplatten,</li> <li>○ ionisierende Wirkung,</li> <li>○ regen einen ZnS-Schirm zum Leuchten an,</li> </ul> </li> <li>• nennen das Geiger-Müller-Zählrohr als Detektor für ionisierende Strahlung,</li> <li>• bezeichnen die Arten der Strahlung radioaktiver Präparate als <math>\alpha</math>-, <math>\beta^-</math>- und <math>\gamma</math>-Strahlung und geben ihre Zusammensetzung an.</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben einen qualitativen Versuch zur Demonstration der ionisierenden Wirkung der Strahlung radioaktiver Elemente.</li> </ul>



## Kompetenzerwartungen

Fachwissen	Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung
<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• charakterisieren die Strahlungsarten nach ihrer Reichweite in Luft, Abschirmbarkeit durch Materialien, Ablenkbarkeit im Magnetfeld,</li> <li>• geben Nutzen und Gefahren der von radioaktiven Präparaten ausgesandten Strahlung an,</li> <li>• geben die Reaktionsgleichungen beim <math>\alpha</math>-Zerfall und <math>\beta^-</math>-Zerfall an: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>{}^A_ZX \xrightarrow{\alpha} {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He</math>,</li> <li>○ <math>{}^A_ZX \xrightarrow{\beta^-} {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}</math> (<math>\bar{\nu}</math>: Antineutrino).</li> </ul> </li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• interpretieren Nebelkammeraufnahmen zur <math>\alpha</math>-Strahlung,</li> <li>• lösen Aufgaben zur Kernstrahlung und zum Kernzerfall.</li> </ul>
<p><b>Zerfallsgesetz</b></p> <p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geben die DGL des radioaktiven Zerfalls an:  <math>\dot{N}(t) = -\lambda \cdot N(t)</math>  (<math>\lambda</math>: Zerfallskonstante, N: Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne).</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• erläutern, dass der radioaktive Zerfall ein stochastischer Vorgang ist: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Unbeeinflussbarkeit durch äußere Größen wie Druck und Temperatur,</li> <li>○ Unvorhersehbarkeit des Zerfalls eines bestimmten Atomkerns (über dessen Zerfall sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich),</li> <li>○ relevante Aussagen sind nur über eine ausreichend große Anzahl von zerfallenen Kernen möglich,</li> </ul> </li> <li>• bestätigen durch Einsetzen, dass der Zusammenhang <math>N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}</math> (Zerfallsgesetz) die DGL des radioaktiven Zerfalls löst, wobei <math>N_0 = N(0s)</math>.</li> </ul>

## Kompetenzerwartungen

## Fachwissen

Erkenntnisgewinnung,  
Kommunikation, Bewertung

Die Schülerinnen und Schüler

- skizzieren den zeitlichen Verlauf eines Zerfalls und begründen mit der exponentiellen Abnahme die Existenz einer festen Zeitspanne (Halbwertszeit  $t_H$ ), nach der sich die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne halbiert und leiten den folgenden Zusammenhang her:

$$t_H = \frac{\ln(2)}{\lambda},$$

- lösen Aufgaben zum Zerfallsgesetz.

## Hinweise

**Allgemeine Hinweise**

- qualitativer Versuch zur Resonanzabsorption: Durchstrahlt man eine Na-Flamme mit dem Licht einer Na-Dampflampe, so wirft die Flamme einen Schatten. Durchstrahlt man sie mit dem Licht einer Glühlampe, so wirft sie keinen Schatten.
- Compton-Effekt: In jeder Richtung erhält man auch die ursprüngliche Strahlung, deren Entstehung sich mit dem Wellenmodell erklären lässt.
- fakultativ: C14-Methode zur Altersbestimmung organischer Materialien
- fakultativ: Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung bei Gesteinen
- fakultativ: Henry Moseley (1887–1915): Moseley'sches Gesetz für die charakteristische Röntgenstrahlung
- fakultativ: Standardmodell
- fakultativ: Berechnung der stehenden Wellen im Potenzialtopfmodell mit Hilfe der Schrödingergleichung (Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik)
- Röntgenröhren als Anschauungsmaterial
- Aussendung von elektromagnetischen Wellen durch beschleunigte Ladungen (Hertz'scher Dipol, Zyklotron)
- Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber und Neon
- Betrachtung von Wellenpaketen (Fourier-Analyse bei der Unschärferelation)
- empirische Berechnung der Balmer-Serie durch Balmer
- Radioaktivität (LP10)
- Impuls (LP10)

## Hinweise

**Geeignete Einstiege und Kontexte**

- Berühmte Physiker:
  - Wilhelm Hallwachs (1859–1922)
  - Max Planck (1858–1947)
  - Albert Einstein (1879–1955)
  - Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923)
  - Max von Laue (1879–1960)
  - William Henry Bragg (1862–1942) und William Lawrence Bragg (1890–1971)
  - Louis-Victor de Broglie (1892–1987)
  - Werner Heisenberg (1901–1976)
  - Ernest Rutherford (1871–1937)
  - Niels Bohr (1885–1962)
  - Henry Moseley (1887–1915)
  - Max Born (1882–1970)
  - Erwin Schrödinger (1887–1961)
  - Johannes Rydberg (1854–1919)
  - Arthur Holly Compton (1892–1962)
- Philipp Lenard (1862–1947): Abhängigkeit der Energie der Photoelektronen von der Farbe des Lichts
- Versuch von Pound und Rebka (1960): Einfluss des Gravitationsfeldes auf Licht: Gravitationsfrequenzverschiebung
- Geoffrey Ingram Taylor (1886–1975): Doppelspaltversuch mit Licht reduzierter Intensität (Versuch von Taylor, 1910)
- Claus Jönsson (\*1930): Doppelspaltversuch mit Elektronen (Versuch von Jönsson, 1961)
- Joseph von Fraunhofer (1787–1826): Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum, Entdeckung von Helium
- James Franck (1882–1964), Gustav Hertz (1887–1975): Versuch von Franck und Hertz
- Otto Hahn (1879–1968), Lise Meitner (1878–1968), Fritz Straßmann (1902–1980): Entdeckung der Kernspaltung
- Pierre Curie (1859–1906), Marie Curie (1867–1934), Antoine Henri Becquerel (1852–1908): Radioaktivität
- Johannes Wilhelm (Hans) Geiger (1882–1945) und Walther Müller (1905–1979): Geiger-Müller-Zählrohr
- Strahlungsdruck, Sonnensegel als Antrieb von Raumfahrzeugen
- Materie und Antimaterie
- Röntgenaufnahmen
- Flammenfärbung
- Stromerzeugung mit Solarzellen (innerer Photoeffekt)

**Hinweise**

- Originaltexte zur Atom- und Quantenphysik (Einstein, Heisenberg, Hahn, Meitner, Straßmann)
- tatsächliche vs. scheinbare Sternenposition (Ablenkung von Photonen im Gravitationsfeld)
- Urknalltheorie (Materie, Antimaterie)

**Fächerübergreifende und fächerverbindende Bezüge**

- Mathematik: Differentialgleichung, e-Funktion
- Mathematik: Stochastik
- Chemie: Atommodelle (Schalenmodell, Orbitalmodell)
- Chemie: Kristalle
- Chemie: chemische Bindung (Elektronenpaarbindungen bei Farbstoffmolekülen)
- Chemie: Nuklide, Periodensystem
- Medizin: Röntgenstrahlung zur Diagnostik (Durchleuchten, Röntgenbild, Computertomographie) und Therapie
- Medizin: Positronen-Emissions-Tomographie
- Naturwissenschaft und Technik: Röntgenstrahlung zur Strukturuntersuchung und Werkstoffprüfung
- Naturwissenschaft und Technik: Kristallstrukturanalyse mit Elektronenstrahlen
- Naturwissenschaft und Technik: Elektronenmikroskop
- Astronomie: Vorgänge in der Sonne (z.B. Kernreaktionen, Wechselwirkung von Photonen)
- Erdkunde: terrestrische Strahlung, Radonproblematik
- Geschichte, Archäologie: Datierungsmethoden
- Informatik: Quantencomputer

**Außerschulische Lernorte**

- Fachbereich Physik der Universität des Saarlandes ([www.uni-saarland.de](http://www.uni-saarland.de), Saarbrücken)
- MPG ([www.ipp.mpg.de](http://www.ipp.mpg.de), Garching)
- Besichtigung eines Kernkraftwerks oder eines Versuchsreaktors (TRIGA, Mainz)

**Bildung für nachhaltige Entwicklung**

- Problematik der Stromerzeugung über fossile Brennstoffe, Kernspaltung und Kernfusion
- Problem der Endlagerung und Wiederaufbereitung

**Berufsorientierende Aspekte**

- Strahlenbelastung am Arbeitsplatz (z.B. Flugpersonal, Röntgendiagnostik)
- Studium Biophysik, Medizinphysik, Laserphysik

**Hinweise****Medienbildung**

- Simulationsprogramme:
  - Spektrum der Strahlung einer Röntgenröhre
  - Franck-Hertz-Versuch
  - Compton-Effekt
  - Rutherford'scher Streuversuch
  - Bragg-Reflexion
  - Untersuchung der Eigenschaften radioaktiver Strahlung
  - Zerfallsgesetz
  - Verhalten von Quantenobjekten
- Laue-Diagramme und Bilder zum prinzipiellen Aufbau von Kristallgittern
- Einsatz eines Messwerterfassungssystems statt eines x-y-Schreibers beim Franck-Hertz-Versuch

