

**Bildungsplan 2016 Gymnasium – Physik**

Überarbeitete Fassung vom 25.03.2022 (V2)

**Klassen 11/12**

**Jahresplanung für das Leistungsfach**

**Juni 2022**

Inhaltsverzeichnis

[1. Vorwort zu den Jahresplanungen 4](#_Toc107475272)

[2. Exemplarische Jahresplanung 5](#_Toc107475273)

[2.1 Themenbereiche mit Stundenverteilung 5](#_Toc107475274)

[3. Exemplarische Unterrichtssequenzen 5](#_Toc107475275)

[3.1 Themenbereich „Elektrische Felder“ 5](#_Toc107475276)

[3.1.1 Didaktische Überlegungen 5](#_Toc107475277)

[3.1.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 6](#_Toc107475278)

[3.2 Themenbereich „Magnetisches Feld“ 11](#_Toc107475279)

[3.2.1 Didaktische Überlegungen 11](#_Toc107475280)

[3.2.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 11](#_Toc107475281)

[3.3 Themenbereich „Elektrodynamik“ 14](#_Toc107475282)

[3.3.1 Didaktische Überlegungen 14](#_Toc107475283)

[3.3.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 14](#_Toc107475284)

[3.4 Themenbereich „Schwingungen“ 19](#_Toc107475285)

[3.4.1 Didaktische Überlegungen 19](#_Toc107475286)

[3.4.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 19](#_Toc107475287)

[3.5 Themenbereich „Wellen“ 23](#_Toc107475288)

[3.5.1 Didaktische Überlegungen 23](#_Toc107475289)

[3.5.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 23](#_Toc107475290)

[3.5 Themenbereich „Wellenoptik“ 27](#_Toc107475291)

[3.5.1 Didaktische Überlegungen 27](#_Toc107475292)

[3.5.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 27](#_Toc107475293)

[3.6 Themenbereich „Quantenphysik und Materie“ 30](#_Toc107475294)

[3.6.1 Didaktische Überlegungen 30](#_Toc107475295)

[3.6.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz 30](#_Toc107475296)

1. Vorwort zu den Jahresplanungen

Um die Funktion von Jahresplanungen zu verstehen, ist eine Verortung im Gesamtkontext der Angebote, die den Bildungsplan 2016 flankieren, sinnvoll. Dies wird im Folgenden durch eine Begriffsdefinition und -abgrenzung zentraler Termini vorgenommen (vgl. hierzu auch [https://km-bw.de/Kultusministerium,Lde/Startseite/Schule/Neue+Seite+\_+Glossar](https://km-bw.de/Kultusministerium%2CLde/Startseite/Schule/Neue%2BSeite%2B_%2BGlossar)).

Bildungsstandards sind Vorgaben, die definieren, welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler zu einem festgelegten Zeitpunkt erreicht haben müssen. Sie werden überwiegend im Zweijahresrhythmus ausgewiesen.

* Das Kerncurriculum umfasst die Summe der verbindlichen Inhalte der baden-württembergischen Bildungsstandards, die in 3/4 der zur Verfügung stehenden Unterrichtszeit zu erreichen sind.
* Das Schulcurriculum umfasst 1/4 der zur Verfügung stehenden Unterrichtszeit, z. B. zur Vertiefung und Erweiterung der Vorgaben der baden-württembergischen Bildungsstandards.
* Die Beispielcurricula bis Klasse 10, die flankierend zum baden-württembergischen Bildungsplan 2016 entwickelt wurden, stellen auf dem Bildungsplan basierende Beispiele von Kerncurricula dar; Ideen und Impulse für die Anbindung an das Schulcurriculum sind - sofern vorhanden - ergänzend ausgewiesen. Beispielcurricula zeigen somit eine Möglichkeit auf, wie aus dem Bildungsplan unterrichtliche Praxis werden kann. Sie erheben hierbei keinen Anspruch einer normativen Vorgabe, sondern dienen vielmehr als beispielhafte Vorlage zur Unterrichtsplanung und -gestaltung, indem sie exemplarisch darlegen, wie der im Bildungsplan vorgesehene Kompetenzaufbau innerhalb einer Standardstufe im Unterricht umgesetzt werden kann.
* Die hier vorliegenden Jahresplanungen für die Kursstufe zeigen Möglichkeiten auf, wie die im Bildungsplan für die Kursstufe beschriebenen inhalts- und prozessbezogene Kompetenzen sinnvoll angelegt und vernetzt werden können.
Diese Kompetenzen werden dabei konkreten Themenbereichen und Inhalten zugeordnet und ein zeitlicher Rahmen wird jeweils für die Themenbereiche vorgeschlagen. Umsetzungsideen geben einen Einblick, wie diese Inhalte im Unterricht konkret umgesetzt werden könnten.
1. Exemplarische Jahresplanung
	1. Themenbereiche mit Stundenverteilung

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Themenbereich | Inhalt | UStd. |
| Elektromagnetischer Felder  | 3.6.2.1 Elektrische Felder | 36 |
|  | 3.6.2.2 Magnetische Felder | 21 |
|  | 3.6.2.3 Elektrodynamik | 29 |
| Schwingungen und Wellen | 3.6.3 Schwingungen | 25 |
|  | 3.6.4 Wellen | 29 |
|  | 3.6.5 Wellenoptik | 20 |
| Quantenmechanik | 3.6.6 Quantenphysik und Materie | 47 |
|  |  | **207** |

1. Exemplarische Unterrichtssequenzen
	1. Themenbereich „Elektrische Felder“

Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler untersuchen und erläutern die Ursache sowie die Struktur statischer elektrischer Felder. Sie sind in der Lage, homogene Felder auch quantitativ zu beschreiben. Die Betrachtung der Superposition elektrischer Felder erfolgt im Allgemeinen zeichnerisch, im Falle senkrechter und paralleler Felder auch rechnerisch. Zentrale Anwendung bei elektrischen Feldern ist der Kondensator. Auf- und Entladevorgänge von Kondensatoren werden experimentell untersucht und mit Hilfe der Exponentialfunktion mathematisch beschrieben. Hier bieten sich digitale Messwerterfassung und Modellbildung an.
Kenntnisse aus der Mechanik der Mittelstufe finden ihre Anwendung bei der Beschreibung der Bewegung geladener Teilchen in elektrischen Feldern. Alternativ zum hier dargestellten Unterrichtsgang kann die Betrachtung der Bewegung von geladenen Teilchen in elektrischen Feldern auch im Anschluss an die Einführung des magnetischen Feldes erfolgen.

Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen2.2 Kommunikation1. zwischen alltagssprachlicher und fachsprachlicher Beschreibung unterscheiden  | 3.6.2.1 elektrisches Feld(1) Kraftwirkungen zwischen elektrisch geladenen Körpern beschreiben(3) Verhalten von Materie im elektrischen Feld | Stunden: 4Grundlagen der Elektrostatik:Untersuchung experimentell, Beschreibung modellhaft auf atomarer Ebene* positive und negative Ladungen
* Kräfte zwischen geladenen Körpern
* Ladungsverschiebung durch bewegte Elektronen (Influenz und Polarisation)
 | Bemerkung Phänomene können ggf. in Form von Schülerexperimenten untersucht werdendabei Wiederholung aus der Elektrizitätslehre der Mittelstufe:* Strom als fließende Ladung
* Ladungsmenge im I-t-Diagramm

Hinweis: Elektrostatik und elektrisches Feld sind häufig nicht im Rahmen der Mittelstufe unterrichtet worden. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren | 3.6.2.1 elektrisches Feld(2) die Struktur elektrischer Felder beschreiben (Feldbegriff, Feldlinien, homogenes Feld, radiales Feld einer Punktladung, Feld eines Dipols, Quelle und Senke […]) | Stunden: 3Einführung des elektrischen Feldes als Kraftfeld analog zur Einführung des Magnetfeldes in der MittelstufeBeschreibung elektrischer Felder mit Hilfe von Feldlinien* Regeln für die Darstellung des Feldes im Feldlinienmodell
* homogenes Feld
* radiales Feld einer Punktladung
* Feld eines Dipols, Quellen und Senken
 | Bemerkung Aufgreifen des Feldbegriffs aus der MittelstufeVeranschaulichung zum Beispiel im Experiment mit Grießkörner in Öl oder in Simulationen Mögliche Vertiefung: Faraday'scher Käfig |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen […]7. aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln 2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern ([…] unbekannte Formeln) 6. Sachinformationen und Messdaten aus einer Darstellungsform entnehmen und in andere Darstellungsformen überführen  | 3.6.2.1 elektrisches Feld(4) Zusammenhang zwischen der Kraftwirkung auf eine Probeladung und der elektrischen Feldstärke(5) elektrische Feldstärke eines Plattenkondensators | Stunden: 4Elektrische Feldstärke:* Kraftwirkung auf Probeladung
* elektrische Feldstärke eines Plattenkondensators:

  | Bemerkung Elektrische Feldstärke experimentell über Kraftwirkung auf elektrische Ladung ermitteln (zum Beispiel mittels Digitalwaage oder empfindlicher Kraftsensor)Formel experimentell (zum Beispiel mittels Digitalwaage oder Elektrofeldmeter) ermitteln alternativ als unbekannte Formel einführen und interpretieren lassen, (siehe 2.2 Kommunikation (2) „[…] unbekannte Formel […]“) |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen7. aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln 2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen, unbekannte Formeln)  | 3.6.2.1 elektrisches Feld(1) […] Coulomb’sches Gesetz […] | Stunden: 3Radialfeld, Coulomb’sches Gesetz mit * Proportionalitäten experimentell ermitteln oder vorgeben
* *k* als zunächst unbekannter Faktor
 | Bemerkung Mögliche Vertiefung:Vergleich von Gravitationsgesetz und Coulomb-GesetzMögliche Vertiefung:Eine sinnvolle Alternative besteht in der Einführung der elektrischen Feldkonstante anhand der Flächenladungsdichte ().Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit, das Coulomb-Gesetz im Rahmen einer deduktiven Betrachtung einzuführen. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben4. Experimente durchführen und auswerten10. Analogien beschreiben […] | 3.6.2.1 elektrisches Feld(9) Zusammenhang zwischen Spannung und Potential (Äquipotentiallinien)(10) Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen elektrischen Feldern und Gravitationsfeldern | Stunden: 5 Elektrische Spannung und elektrisches Potential:* Vergleich der potentiellen Energie im homogenen Gravitationsfeld und im homogenen elektrischen Feld
* potentielle Energie in Radialfeldern
* elektrischen Potential
* Zusammenhang zwischen elektrischem Potential und elektrischer Spannung

Äquipotentiallinien:* Erstellung von Äquipotential-linienbildern für homogene Felder, Dipolfeld, Radialfeld
* Analogie zwischen Äquipotentiallinien im elektrischen Feld und Höhenlinien im Gravitationsfeld
* Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen elektrischen Feldern und Gravitationsfeldern
 | Bemerkung Wiederholung: übertragene Energie Erweiterung des Spannungsbegriffs der Mittelstufe (Spannung als Ursache eines elektrischen Stroms) als Energie pro Ladung Mögliche Schülerexperimente zum Potenzial und Aufnahme von Äquipotentiallinien, daraus Ermittlung des Verlaufs von Feldlinien |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen | 3.6.2.1 elektrisches Feld(11) Bewegung geladener Teilchen parallel und senkrecht zu einem homogenen elektrischen Feld quantitativ | Stunden: 5Beschleunigung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Feld längs der Feldlinien:* Energieerhaltungssatz
* Einheit eV
* beschleunigte Bewegung

Bewegungen geladener Teilchen in homogenen elektrischen Querfeldern:* Überlagerung von Bewegungen
* Parabelbahn
* Elektronenablenkröhre
 | Bemerkung Mögliche Vertiefungen: * Millikan-Versuch
* Anwendungen (Braun'sche Röhre, Teilchenbeschleuniger in Medizin und Teilchenphysik)

Mögliche Variante:Unterrichtseinheit zu Teilchen in Feldern zusammen mit den Inhalten aus 3.6.2.2 (6) und (7) |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen […] 7. aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln 2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen, unbekannte Formeln)  | 3.6.2.1 elektrisches Feld(6) Kapazität eines Kondensators(7) Eigenschaften eines Platten-kondensators (Kapazität) | Stunden: 4Kondensator und Kapazität:* Kapazität experimentell ermitteln
* Bauformen von Kondensatoren
* Kapazität eines Plattenkondensators experimentell ermitteln
* Einführung der elektrischen Feldkonstante
* Einfluss von Dielektrika (Polarisation)
 | Bemerkung Mögliche Vertiefungen:* Messmethoden zur Bestimmung von Kapazitäten
* Kondensatorschaltungen
* kapazitive Sensoren (zum Beispiel Füllstands- und Beschleunigungssensoren)
 |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) 3.6.2.1 elektrisches Feld(7) Eigenschaften eines Platten-kondensators (Kondensator als Energiespeicher) | Stunden: 2Kondensator als Energiespeicher:*
* Anwendungen von Kondensatoren als Energiespeicher
 | Bemerkung Möglich ist eine deduktive bzw. induktive Herleitung |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen 5. Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwerterfassungssystem […]) 2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen, unbekannte Formeln) 5. physikalische Experimente, Ergebnisse und Erkenntnisse – auch mithilfe digitaler Medien – dokumentieren (Skizzen, Beschreibungen, Tabellen, Diagramme und Formeln) | 3.6.2.1 elektrisches Feld(8) zeitabhängiger Auf- und Entladevorgang eines Kondensators [...]und mit der Exponentialfunktion math. beschreiben | Stunden: 6Auf- und Entladevorgänge von Kondensatoren:* Auf- und Entladekurven von und am Kondensator
* Variation von und
* mathematische Darstellung der Kurven mittels Exponentialfunktion
 | Bemerkung Schülerexperimente auch mit Messwert-erfassungssystemenMögliche Vertiefungen:* mathematische Betrachtung der Differentialgleichung für beim Laden und Entladen
* numerische Betrachtung der Differentialgleichung mittels Tabellenkalkulation (Modellbildung)
 |

Themenbereich „Magnetisches Feld“

Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler untersuchen und erläutern die Ursache sowie die Struktur statischer magnetischer Felder. Sie sind in der Lage, homogene Felder und die Bewegung geladener Teilchen darin auch quantitativ zu beschreiben. Die Betrachtung der Superposition magnetischer Felder erfolgt im Allgemeinen zeichnerisch, im Falle senkrechter und paralleler Felder auch rechnerisch. Zentrale Anwendung bei magnetischen Feldern ist die Spule. Sie vergleichen die Struktur des elektrischen und magnetischen Feldes und beschreiben Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.2.2 magnetisches Feld(1) die Struktur magnetischer Felder beschreiben (Feldlinie, homogenes Feld, einfache nicht-homogene Felder, Feld um einen geraden Leiter, Handregel) | Stunden: 4Grundlagen Magnetismus* Magnetpole, Anziehung und Abstoßung
* Beschreibung magnetischer Felder verschiedener Permanentmagnete (Feldlinien)
* Homogenes Feld des Hufeisenmagneten

Felder stromdurchflossener Leiter:* gerader Leiter
* Leiterschleife, Spule
* Handregel
 | BemerkungWiederholung der Grundlagen aus der Mittelstufe, denkbar in Gruppenarbeit mit Präsentation.Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu elektrischen Feldern sollten betrachtet werden. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen 5. Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwert-erfassungssystem, Tabellenkalkulation) 7. aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) 3.6.2.2 magnetisches Feld(2) die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld erläutern (magnetische Flussdichte) | Stunden: 3Magnetische Flussdichte* Kraft auf stromdurchflossenen Leiter(zum Beispiel Leiterschaukel in Hufeisenmagnet)
* Drei-Finger-Regel
* Induktive Einführung der magnetischen Flussdichte ()
* Kraft zwischen zwei parallelen Leitern anhand der Superposition der magnetischen Felder
 | Bemerkung Kraftwirkung auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld experimentell ermitteln (zum Beispiel mittels Digitalwaage oder empfindlicher Kraftsensor)Mögliche Vertiefungen:* Elektromotor als lehrreiche Vertiefung zur Anwendung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter
* Bau eines Elektromotors im Rahmen eines Schülerprojekts (zum Beispiel. mit PET-Flasche und Lackdraht, drehbar zwischen Permanentmagneten)
 |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung3. Experimente zur Überprüfung von Hypothesen planen (unter anderem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen 5. Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwert-erfassungssystem, Tabellenkalkulation) Hypothesenbilden7. aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln  | 3.6.2.2 magnetisches Feld(5) das Magnetfeld einer schlanken Spule untersuchen und beschreiben | Stunden: 4Magnetisches Feld einer schlanken Spule:* Experimenteller Nachweis der Homogenität des magnetischen Feldes im Inneren einer Spule
* Messreihen mit Hallsonde (Variation von und
* Magnetische Feldkonstante
* Materie im Magnetfeld (relative Permeabilität)
 | Bemerkung Mögliche Schülerexperimente:Messung der Flussdichte mit Hallsonde an verschiedenen Spulen;weitere Messungen (zum Beispiel Außenfeld, Erdmagnetfeld) auch mit Smartphone möglichHinweis: Die Hallsonde wird als Magnetfeldsensor verwendet, die Funktion aber erst nach Einführung der Lorentzkraft erklärt. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen 8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen, unbekannte Formeln)  | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) 3.6.2.2 magnetisches Feld(3) die Kraft auf eine elektrische Ladung in einem Magnetfeld erläutern (Lorentzkraft, Drei-Finger-Regel)(4) den Hall-Effekt beschreiben(6) die Bewegung geladener Teilchen senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld quantitativ beschreiben ... | Stunden: 6Bewegung geladener Teilchen senkrecht zu homogenen Magnetfeldern* Lorentzkraft mit Drei-Finger-Regel
* Kreisbahn im Magnetfeld (Lorentzkraft als Zentripetalkraft)
* Schraubenbahnen
* Fadenstrahlrohr, -Bestimmung
* Erklärung des Hall-Effekts anhand der Lorentzkraft (Hall-Konstante)
 | Bemerkung Wiederholung:Kreisbewegung, ZentripetalkraftMögliche Vertiefungen:* Anwendungen in Ringbeschleunigern und Zyklotron
* inhomogene Felder, Polarlichter

Hinweis: Der Hall-Effekt liefert eine Überleitung zu gekreuzten Feldern |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung13. ihr physikalisches Wissen anwenden, um Problem- und Aufgabenstellungen zielgerichtet zu lösen | 3.6.2.2 magnetisches Feld(7) die Bewegung geladener Teilchen in gekreuzten homogenen elektrischen und magnetischen Feldern erklären | Stunden: 4Bewegung geladener Teilchen in gekreuzten elektromagnetischen Feldern* Kräftegleichgewicht im Wienfilter
* Anwendung am Massenspektrograph
 | Bemerkung Mögliche Vertiefung:Anwendung von Massenspektrographen, zum Beispiel Analyse von Eisbohrkernen |

Themenbereich „Elektrodynamik“

Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler untersuchen das Phänomen der elektromagnetischen Induktion basierend auf ihrem Wissen aus der Mittelstufe. Die Lenz’sche Regel ergibt die Polung der Induktionsspannung bzw. die Stromrichtung und kann zur Erklärung viele Phänomene herangezogen werden. Mit Hilfe des Faraday'schen Induktionsgesetzes erläutern sie technische Anwendungen. Ein- und Ausschaltvorgänge in Stromkreisen mit Spulen können zum Beispiel mittels Messwerterfassungssystemen untersucht werden. Die Schülerinnen und Schüler beschreiben und vergleichen die Ursache und Struktur elektromagnetischer Felder anhand der Aussagen der Maxwell-Gleichungen.

Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben2.2 Kommunikation3. sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen unter Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen austauschen ([…]) 2.3 Bewertung1. bei Experimenten relevante von nicht relevanten Einflussgrößen unterscheiden | 3.6.2.3 Elektrodynamik(1) mithilfe der Lorentzkraft erklären, dass in einem Leiter, der senkrecht zu einem Magnetfeld bewegt wird, eine Spannung bzw. ein elektrischer Strom induziert wird | Stunden: 4Grundlagen Induktion (phänomenologisch):* Schlüssel-Experiment: Bewegung der Leiterschaukel im Magnetfeld aufgrund eines Stromflusses 🡪 Induktionsspannung aufgrund der Bewegung einer Leiterschaukel im Magnetfeld
* Wechselspannung bei schwingender Leiterschaukel
* Spulen-Experimente zur Untersuchung der Ursache einer Induktionsspannung 🡪 solange sich das von der Spule umfasste Magnetfeld ändert
* Experimente zur Untersuchung der Abhängigkeiten der Induktionsspannung 🡪 Windungszahl, Stärke der Magnetfeld Änderung, Dauer der Magnetfeldänderung, Querschnittsfläche der Spule, Eisenkern in der Spule
* Evtl. Vorzeichen der Induktionsspannung
 | Bemerkung Wiederholung der Grundlagen aus der Mittelstufe, denkbar zum Beispiel in Gruppenarbeit mit Präsentation oder Stationenlernen. Schrittweise werden aufgrund der experimentellen Beobachtungen die Aussagen zur Ursache und Stärke der Induktionswirkung präzisiert. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung3. Experimente zur Überprüfung von Hypothesen planen (unter anderem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen (auch mithilfe digitaler Werkzeuge) | Elektrodynamik(2) das Faraday’sche Induktionsgesetz erläutern und anwenden ([…]) | Stunden: 4Induktion durch Magnetfeldänderung* quantitative Untersuchung (Induk-tionsspule und felderzeugende Spule) führt zu

Möglichkeit der Erklärung des Effekts mit elektrischen Wirbelfeldern (zum Beispiel mit Versuch zu Ringentladung oder Thomson'schen Ring) | BemerkungHinweis zur Reihenfolge: Alternativ kann mit der Untersuchung der "Induktion durch Flächenänderung" begonnen werden.Je nach Aufbau besteht die lehrreiche Möglichkeit zur Vertauschung der Induktions- und felderzeugenden Spule.Hinweis: Falls die elektrischen Wirbelfelder hier nicht behandelt werden, könnte eine Betrachtung im Rahmen der Maxwell'schen Gleichungen und anhand der Ringentladung untersucht werden. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung3. Experimente zur Überprüfung von Hypothesen planen (unter anderem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen (auch mithilfe digitaler Werkzeuge) | 3.6.2.3 Elektrodynamik(2) das Faraday’sche Induktionsgesetz erläutern und anwenden  | Stunden: 4Induktion durch Änderung der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche* Erklärung mit Lorentzkraft zum Beispiel an einem bewegten Leiter auf Schienen senkrecht zum Magnetfeld (hier ist die Gleichung möglich)
* quantitative Untersuchung (bewegter Spulenrahmen) führt zu
* Orientierung der Fläche senkrecht zum Magnetfeld oder Projektion
 | BemerkungZur Motivation der "Induktion durch Flächenänderungen" sind Freihandexperimente möglich zum Beispiel Zusammenziehen einer Leiterschlaufe im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten bzw. bewegte, lange Leiterschlaufe im Erdmagnetfeld.   |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen, unbekannte Formeln)  | 3.6.2.3 Elektrodynamik(2) das Faraday’sche Induktionsgesetz erläutern und anwenden (magnetischer Fluss [..], , Lenz'sche Regel)(6) Ursachen und Struktur elektromagnetischer Felder […] beschreiben | Stunden: 4Induktiongesetz:* Übergang von zu und von zu und entsprechend
* Zusammenführung ,magnetischer Fluss
* Lenz’sche Regel (zum Beispiel mittels bewegtem Leiter oder mittels Thomson'schen Ring-Versuch)
* Begründung des Vorzeichens

und Richtung der elektrischen Wirbelfelder  | BemerkungVerknüpfung zur Mathematik: Produktregel |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.2.3 Elektrodynamik(7) eine technische Anwendung elektrischer Wirbelströme beschreiben (zum Beispiel Wirbelstrombremse, Induktionskochplatte) | Stunden: 2Elektrische Wirbelströme:* als Vertiefung zur Lenz’schen Regel
* Anwendungen (zum Beispiel Wirbelstrombremse, Induktionskochfeld)
 | BemerkungMögliches Stationenlernenzu Wirbelströmen und weiteren Beispielen zur Lenz’schen Regel als Vertiefung |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung13. ihr physikalisches Wissen anwenden […]2.2 Kommunikation7. in unterschiedlichen Quellen recherchieren, Erkenntnisse sinnvoll strukturieren, sachbezogen und adressatengerecht aufbereiten sowie unter Nutzung geeigneter Medien präsentieren 2.3 Bewertung9. Technologien auch unter sozialen, ökologischen und ökonomischen Aspekten diskutieren 10. im Bereich der nachhaltigen Entwicklung persönliche […] Maßnahmen […] mithilfe ihres physikalischen Wissens bewerten | 3.6.2.3 Elektrodynamik(3) technische Anwendungen des Induktionsgesetzes qualitativ beschreiben (zum Beispiel Generator, Transformator, Induktionsladegerät) | Stunden: 4Anwendungen der Induktion:* Generator (Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung)
* Transformator, Induktionsladegerät
 | BemerkungMöglich sind Schülerexperimente oder Recherche/Textarbeit in Gruppen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung5. Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwerterfassungssystem, Tabellenkalkulation)2.2 Kommunikation2. funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben („je-desto“-Aussagen) und physikalische Formeln erläutern (Ursache-Wirkungs-Aussagen […]) 4. physikalische Vorgänge und technische Geräte beschreiben (zum Beispiel zeitliche Abläufe, kausale Zusammenhänge) 5. physikalische Experimente, Ergebnisse und Erkenntnisse – auch mithilfe digitaler Medien – dokumentieren (Skizzen, Beschreibungen, Tabellen, Diagramme und Formeln)  | 3.6.2.3 Elektrodynamik(4) Selbstinduktionseffekte in Stromkreisen bei Ein- und Ausschaltvorgängen erklären (Induktivität, )(5) die Eigenschaften einer schlanken Spule beschreiben ([…]) | Stunden: 6Selbstinduktion, Induktivität von Spulen:*
* Induktivität einer schlanken Spule
* Energie im Magnetfeld einer Spule

 Selbstinduktion bei Ein- und Ausschaltvorgängen in Stromkreisen mit Spulen:* I-t-Diagramme und U-t-Diagramme
* Bestimmung von und aus den Diagrammen
* "Spannungsspitzen" beim Ausschalten
 | BemerkungMöglich ist der Einsatz von Messwerterfassungssystemen zur Untersuchung von Ein- und AusschaltvorgängenMögliche Vertiefung:* Differentialgleichungen beim Ein- und Ausschaltvorgängen
* mathematische Beschreibung der Kurven des Ein- und Ausschalt-vorgangs mittels Exponentialfunktion
 |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären […] | 3.6.2.3 Elektrodynamik(6) Ursache und Struktur elektromagnetischer Felder anhand der Aussagen der Maxwell-Gleichungen im Überblick beschreiben | Stunden: 1Maxwell'sche Gleichungen* Aussagen der Maxwell'schen Gleichungen im Überblick
 | BemerkungMöglich ist auch eine spätere Behandlung im Rahmen der elektromagnetischen Wellen. |

Themenbereich „Schwingungen“

Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler entwickeln ihre Modellvorstellungen zunächst an mechanischen Schwingungen und wenden ihre Kenntnisse anschließend auf elektromagnetische Schwingungen an. Sie erkennen, dass Differentialgleichungen zur mathematischen Behandlung von Schwingungen notwendig sind. Sie unterscheiden zwischen idealisierten Schwingungen und realen Schwingungen mit Dämpfung.

Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.3 Schwingungen(1) Schwingungen experimentell aufzeichnen und mithilfe charakteristischer Eigenschaften und Größen als zeitlich periodische Bewegungen um eine Gleichgewichtslage beschreiben (Auslenkung , Amplitude , Periodendauer , Frequenz , Kreisfrequenz , harmonisch und nicht harmonisch, gedämpft und ungedämpft) | Stunden: 2Beschreibung periodischer Bewegungen:* Beispiele periodischer Bewegungen
* Auslenkung, Amplitude
* Periodendauer, Frequenz
* (harmonische) Schwingung einer Stimmgabel
 | Bemerkung Wiederholung:aus der Akustik bekannte Begriffe |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.3 Schwingungen(1) Schwingungen experimentell aufzeichnen mithilfe charakteristischer Eigenschaften und Größen als zeitlich periodische Bewegungen um eine Gleichgewichtslage beschreiben ([…])(2) ungedämpfte harmonische Schwingungen mathematisch beschreiben […] | Stunden: 4Beschreibung einer ungedämpften hamonischen Schwingung (hier gezeigt am Beispiel des vertikalen Federpendels):* Aufnahme eines Auslenkungs-Zeit-Diagramms
* Zeigerdarstellung (Vergleich mit Kreisbewegung)
* Beschreibung der Energieumwandlungen
 | BemerkungAnknüpfung an die Mechanik der Mittelstufe:*
 |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen2.2 Kommunikation5. physikalische Experimente, Ergebnisse und Erkenntnisse – auch mithilfe digitaler Medien – dokumentieren (Skizzen, Beschreibungen, Tabellen, Diagramme und Formeln)  | 3.6.3 Schwingungen(4) den Zusammenhang zwischen *harmonischen* mechanischen *Schwingungen* und *linearer Rückstellkraft* beschreiben (unter anderem horizontales Federpendel) (5) die Schwingungs-Differentialgleichung eines Federpendels durch einen geeigneten Ansatz lösen […] | Stunden: 3harmonische Schwingungen qualitativ erklären (horizontales und vertikales Federpendel):* Unterscheidung Federdehnung und Auslenkung, Gleichgewichtslage
* Rückstellkraft
* Schwingungs-Differentialgleichung
* Periodendauer
 | BemerkungMögliche Schülerexperimente:Messwerterfassung an einem Federpendel mit verschiedenen Sensoren (Kraftsensor, Beschleunigungssensor, Abstandssensor) |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente3. Experimente zur Überprüfung von Hypothesen planen (unter anderem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen2.3 Bewertung1. bei Experimenten relevante von nicht relevanten Einflussgrößen unterscheiden 2. Ergebnisse von Experimenten bewerten (Messfehler, Genauigkeit, Ausgleichsgerade, mehrfache Messung und Mittelwertbildung)  | 3.6.3 Schwingungen(6) die Schwingungs-Differentialgleichung eines Fadenpendels durch einen geeigneten Ansatz lösen […] | Stunden: 4Untersuchung weiterer Schwingungen* Fadenpendel mit Schwingungs-Differentialgleichung
* weitere schwingende Systeme möglich
 | BemerkungMögliche Schülerexperimente:Digitale Endgeräte als Fadenpendel(Beschleunigungssensor) Mögliche Vertiefung:Überlagerung von Schwingungen (Schwebungen in der Akustik, zum Beispiel Aufnahme mit digitalen Endgeräten) |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung9. zwischen realen Erfahrungen und konstruierten, idealisierten Modellvorstellungen unterscheiden […] | 3.6.3 Schwingungen(3) die zeitlich abnehmende *Amplitude* einer *gedämpften Schwingung* mathematisch beschreiben (geschwindigkeitsproportionale Reibung)  | Stunden: 3Gedämpfte Schwingung* Aufnahme einer Schwingung mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung
* mathematische Beschreibung der zeitlich abnehmenden Amplitude
 | Bemerkung |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben2.3 Bewertung8. Chancen und Risiken von Technologien mithilfe ihres physikalischen Wissens bewerten  | 3.6.3 Schwingungen(10) Resonanz bei erzwungenen Schwingungen beschreiben (Eigenfrequenz, Erregerfrequenz) | Stunden: 3Erzwungene Schwingung und Resonanz* Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Erregerfrequenz qualitativ beschreiben (Resonanzkurve)
* Resonanzfall nahe der Eigenfrequenz
* Resonanzphänomene im Alltag
 | BemerkungHinweis: Videos zur Tacoma-Bridge und zur Bodenresonanz beim Hubschrauber  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung10. Analogien beschreiben und zur Lösung von Problemstellungen nutzen2.2 Kommunikation4. physikalische Vorgänge […] beschreiben (zum Beispiel zeitliche Abläufe, kausale Zusammenhänge)  | 3.6.3 Schwingungen(7) die *Schwingung* in einem *elektromagnetischen Schwingkreis* erklären und die auftretenden Energieumwandlungen erläutern (9) Gemeinsamkeiten und Unterschiede von mechanischen und elektromagnetischen *Schwingungen* erläutern (zum Beispiel anhand eines Federpendels und eines *elektromagnetischen Schwingkreises*)  | Stunden: 4Vorgänge beim elektromagnetischen Schwingkreis beschreiben und erklären* Aufnahme von und am Schwingkreis
* Erklärung der Vorgänge auf Basis der Induktion
* Energieumwandlungen elektromagnetischer Schwingungen
* Gemeinsamkeiten und Unterschiede von elektromagnetischem Schwingkreis und Federpendel
 | BemerkungMögliche Schülerexperimente mit Messwerterfassungssystemen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen | 3.6.3 Schwingungen(8) die Schwingungs-Differentialgleichung eines elektromagnetischen Schwingkreises durch einen geeigneten Ansatz lösen […] | Stunden: 2Elektromagnetische Schwingungen quantitativ erklären:* Schwingungs-Differentialgleichung

 * Periodendauer
 | BemerkungDie Schwingungs-Differentialgleichung kann mittels des 2. Kirchhoff'schen Gesetzes bzw. mittels des Energieerhaltungssatzes hergeleitet werden.Mögliche Vertiefungen: * Alltagsbeispiele zum elektromagnetischen Schwingkreis
* Dämpfung beim Schwingkreis
* Resonanz beim Schwingkreis
 |

3.5 Themenbereich „Wellen“

3.5.1 Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler entwickeln ihre Modellvorstellungen zunächst an mechanischen Wellen und übertragen ihre Kenntnisse anschließend auf elektromagnetische Wellen. Sie erkennen, dass mit dem Huygens’schen Prinzip grundlegende Wellenphänomene erklärt werden können. Im Vordergrund der Betrachtungen stehen Transversalwellen, an geeigneten Beispielen erkennen die Schülerinnen und Schüler aber auch die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu Longitudinalwellen.

3.5.2 Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.4 Wellen(1) Wellen mithilfe charakteristischer Eigenschaften und Größen beschreiben (Wellenlänge,Ausbreitungsgeschwindigkeit, […])(2) grundlegende Wellenphänomene beschreiben ([…] Energietransport) und in Alltagssituationen erkennen (zum Beispiel Meereswellen […]) | Stunden: 2Grundlagen:Eigenschaften und Größen an Beispielen einführen, insb. * Periodendauer
* Wellenlänge
* Ausbreitungsgeschwindigkeit
* Welle als Kette von gekoppelten Oszillatoren (Energietransport ohne Materietransport)
 | BemerkungPhänomenologische Einführung anhand von Wasserwellen, la-Ola-Wellen (mit Schülern), Freihandexperimenten ("Slinky"), Wellenmaschine etc. Hinweis: Eine selbstgebaute Wellenmaschine kann über die gesamte Unterrichtseinheit eingesetzt werden (mit Klebeband, Holzspießen und Fruchtgummis). Genauso ist der Einsatz von Simulationen, Apps auf digitalen Endgeräten (zum Beispiel Geogebra) über die gesamte Unterrichtseinheit lehrreich. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen | 3.6.4 Wellen(4) die zeitliche und räumliche Entwicklung einer harmonischen eindimensionalen Welle in einer mathematischen Darstellung beschreiben […] | Stunden: 3Mathematische Beschreibung einer linearen harmonischen Welle* Beschreibung der Wellenausbreitung mit dem Zeigermodell. Formel hier
* Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz
* s-t-Diagramm und s-x-Diagramm
* Strecken und Phasendifferenz
 | Bemerkung |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.4 Wellen(2) den Unterschied zwischen Longitudinalwellen und Transversalwellen erläutern  | Stunden: 1Wellenarten (Transversal- und Longitudinalwellen) | BemerkungMögliche Vertiefung bzw. Anwendung: longitudinale und transversale Erdbebenwellen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.4 Wellen(1) Wellen mithilfe charakteristischer Eigenschaften und Größen beschreiben ([…] Polarisation)(2) grundlegende Wellenphänomene beschreiben (Beugung, Reflexion, Brechung, Interferenz […]) und in Alltagssituationen erkennen (zum Beispiel Meereswellen […]) | Stunden: 2Eigenschaften von Wellen und Wellenphänomene* Beugung
* Reflexion (am festen und losen Ende, Phasensprung)
* Polarisation
* Überlagerung von Wellen
 | BemerkungHinweis: Beeindruckend sind Beugungserscheinungen von Tsunamis auf Ozeanen (Animationen von Satellitendaten)Reflexion und Überlagerung mit "Slinky"Mögliche Vertiefung: Polarisationseffekte in der Fotografie  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen […] | 3.6.4 Wellen(3) eindimensionale stehende Wellen beschreiben und als Interferenzphänomen erklären(Bäuche, Knoten, Eigenfrequenzen, Stellen konstruktiver beziehungsweise destruktiverInterferenz, Reflexion an festen beziehungsweise losen Enden, Wellenlängenbestimmungmittels Knotenabstand) | Stunden: 6Stehende Wellen:* Eindimensionale stehende Wellen als Überlagerung zweier fortschreitender Wellen gleicher Frequenz (zum Beispiel mit "Slinky")
* Wellenbäuche und Wellenknoten, Wellenlängenbestimmung mittels Knotenabstand
* Eindimensionale stehende Wellen bei Reflexion einer fortschreitenden Welle
* Bedingungen für stehende Wellen auf Wellenträger der Länge bei unterschiedlichen Enden
* Unterschiede und Gemeinsamkeiten von fortschreitenden und stehenden Wellen
 | BemerkungEinstiegsexperiment mit "Slinky"Hinweis: SimulationenVertiefung: Eigenfrequenz und Resonanz bei Musikinstrumenten (evtl. Chladni'sche Klangfiguren)Mögliche Vertiefung anhand stehender Longitudinalwellen bei der Schallausbreitung* Kundt´sches Rohr
* Schwingende Luftsäule auf Wasseroberfläche
 |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären […] | 3.6.4 Wellen(2) grundlegende Wellenphänomene beschreiben (Beugung, Reflexion, Brechung, […]) […](5) grundlegende Wellenphänomene mithilfe des Huygens’schen Prinzips erklären (zum Beispiel Beugung, Reflexion) | Stunden: 3Huygens'sches Prinzip* Wellen auf einem zweidimensionalen Wellenträger (zum Beispiel Wasseroberfläche): Wellenfront und Wellennormale
* Elementarwellen und Einhüllende
* Anwendungen: zum Beispiel Beugung, Reflexion, Brechung
 | BemerkungKlassische Wellenwanne, Simulationen, Apps auf digitalen Endgeräten etc.  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen […] | 3.6.4 Wellen(4) mithilfe des Gangunterschieds die Überlagerung zweidimensionaler kohärenter Wellen qualitativ beschreiben | Stunden: 8Interferenzphänomene in der Ebene* Gangunterschied, Bedingungen für konstruktive und destruktive Interferenz
* Gangunterschied und Phasendifferenz (Formel)
* Konstruktion des Interferenzfeldes und Energieverteilung im Interferenzfeld
 | BemerkungGeeignet sind Freihandexperimente zum Einstieg (Zonen destruktiver Interferenz) bzw. Experiment mit zwei Lautsprechern |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren | 3.6.4 Wellen(8) das elektromagnetische Spektrum im Überblick beschreiben(9) den Hertz'schen Dipol als Grenzfall eines elektromagnetischen Schwingkreises erkennen und die daraus entstehenden Abstrahlung elektromagnetischer Wellen in Grundzügen beschreiben | Stunden: 4Elektromagnetische Wellen * Erzeugung elektromagnetischer Wellen mittels eines Hertz'schen Dipols
* Lichtgeschwindigkeit
* Polarisation
* Experimente zur Beugung am Einzelspalt und Doppelspalt, zur Polarisation, zu stehenden Wellen
* Elektromagnetisches Spektrum im Überblick
 | BemerkungGeeignet sind Experimente mit Mikrowellen und Dezimeterwellen |

* 1. Themenbereich „Wellenoptik“
		1. Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler untersuchen optische Interferenzphänomene und beschreiben diese mithilfe des Modells der elektromagnetischen Welle. Sie können ihre Erkenntnisse sowohl auf Alltagsphänomene als auch auf die historische Entwicklung von Modellen anwenden.

* + 1. Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung9. zwischen realen Erfahrungen und konstruierten, idealisierten Modellvorstellungen unterscheiden […]11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren2.3 Bewertung4. Grenzen physikalischer Modelle an Beispielen erläutern 8. Chancen und Risiken von Technologien mithilfe ihres physikalischen Wissens bewerten  | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (3) die Funktion von Modellen in der Physik erläutern […]3.6.5 Wellenoptik(1) kohärentes Licht als elektromagnetische Welle beschreiben (unter anderem Lichtgeschwindigkeit)(2) das Strahlenmodell und das Wellenmodell des Lichts miteinander vergleichen (Gültigkeitsbereich des Strahlenmodells: zum Beispiel Beugung an einer Blende, Dispersion)(5) die Struktur der Interferenzmuster und der Intensitätsverteilung bei Beugung an Einzelspalt […] beschreiben ([…] Spektralzerlegung des Lichts polychromatischer Lichtquellen)(8) die geschichtliche Entwicklung von Modellvorstelllungen es Lichts beschreiben (zum Beispiel Lichtstrahlen, Lichtteilchen, Lichtwellen, elektromagnetische Wellen […]) | Stunden: 2Einführung in die Wellenoptik:* Einstiegsexperiment: Einzelspaltbeugung
* Begriffsbildungen: Strahlenoptik, Wellenoptik, Ausblick zur Quantenoptik;

Gültigkeitsgrenzen* Lichtquellen: thermisches Licht, Laser-Licht; Kohärenz
 | Bemerkung Einstiegsexperiment: Bau eines Einzelspalts mit Objektträger, Aluminiumfolie, Cutter-Messer, Kleber; Kerzenlicht als polychromatische Lichtquelle  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen6. mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen herstellen und überprüfen […]2.3 Bewertung7. Risiken und Sicherheitsmaßnahmen bei Experimenten und im Alltag mithilfe ihres physikalischen Wissens bewerten  | 3.6.5 Wellenoptik(1) kohärentes Licht als elektromagnetische Welle beschreiben (unter anderem Lichtgeschwindigkeit)(3) Interferenzphänomene an Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter experimentell untersuchen(5) die Struktur der Interferenzmuster und der Intensitätsverteilung bei Beugung an Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter beschreiben (Unterschied zwischen idealisierten und realen Spalten mit endlicher Breite, Spektralzerlegung des Lichts polychromatischer Lichtquellen)(6) die Lage von Interferenzminima beziehungsweise Interferenzmaxima bei ausgewählten Beugungsvorgängen in Fernfeldnäherungen berechnen (Minima beim Einzelspalt, Minima und Maxima beim Doppelspalt, Hauptmaxima beim Gitter) | Stunden: 8Doppelspalt, Mehrfachspalt und Gitter:* Doppelspalt-Experiment nach Young
* Analyse des Interferenzmusters: Lage der Intensitätsmaxima und Intensitätsminima (Fernfeld- und Kleinwinkelnäherung)
* Bestimmung der Wellenlänge von roten, grünen und blauem Laser-Licht
* Doppelspaltexperiment mit Polarisationsfiltern: Intensitätsmuster in Abhängigkeit von der Vorzugsrichtung der Polarisationsfilter
* Gitter: Analyse des Interferenzmusters: Lage der Hauptmaxima der Intensität; Anzahl der Hauptmaxima
 | BemerkungSicherheitshinweise Laser-Licht beachtenErstmalige Bestimmung der Wellenlänge von LichtZur Vertiefung kann auf die Intensitätsverteilung von Mehrfachspalten eingegangen werden. Im Rahmen des Zeigermodells kann die Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von der Anzahl der beleuchteten Spalte betrachtet werden.Mögliches Schüler-Praktikum: Strukturanalyse einer CD-ROM, DVD und Blue-ray Mögliche Recherche in Gruppenarbeiten: Strukturfarben in der Biologie (zum Beispiel Schmetterlinge) |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen9. zwischen realen Erfahrungen und konstruierten, idealisierten Modellvorstellungen unterscheiden […]2.3 Bewertung1. bei Experimenten relevante von nicht relevanten Einflussgrößen unterscheiden  | 3.6.5 Wellenoptik(5) die Struktur der Interferenzmuster und der Intensitätsverteilung bei Beugung an Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter beschreiben (Unterschied zwischen idealisierten und realen Spalten mit endlicher Breite […])(6) die Lage von Interferenzminima beziehungsweise Interferenzmaxima bei ausgewählten Beugungsvorgängen in Fernfeldnäherungen berechnen (Minima beim Einzelspalt, Minima und Maxima beim Doppelspalt, Hauptmaxima beim Gitter) | Stunden: 4Einzelspaltbeugung:* Einzelspalt: Analyse des Interferenzmusters: Hauptmaximum, Lage der Intensitätsminima
* Doppelspalt und Gitter mit endlichen Spaltbreiten: Einhüllende Funktion
 | BemerkungEvtl. Vertiefung: Interferenzmuster eines komplementären Beugungsobjekt, Theorem von BabinetMögliches Schüler-Praktikum: Messung der Dicke eines Haares |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung13. ihr physikalisches Wissen anwenden, um Problem- und Aufgabenstellungen zielgerichtet zu lösen2.2 Kommunikation7. in unterschiedlichen Quellen recherchieren, Erkenntnisse sinnvoll strukturieren, sachbezogen und adressatengerecht aufbereiten sowie unter Nutzung geeigneter Medien präsentieren  | 3.6.5 Wellenoptik(7) Interferenzphänomene im Alltag physikalisch beschreiben (zum Beispiel Interferenz an dünnen Schichten, Interferenz an Gitterstrukturen, Laser-Speckle) | Stunden: 2Interferenz an dünnen Schichten* Zum Beispiel: Seifenblasen, Interferenz am Glimmerblatt nach Pohl oder Newton'sche Ringe
 | BemerkungMögliche Recherche in Gruppenarbeiten: Interferenzphänomene im Alltag |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.5 Wellenoptik(1) kohärentes Licht als elektromagnetische Welle beschreiben (unter anderem Lichtgeschwindigkeit)(4) Interferenzphänomene am Michelson-Interferometer beschreiben (Strahlteiler) | Stunden: 4Interferometer:* Aufbau und Funktionsweise eines Michelson-Interferometers (Strahlteiler), Interferenzmuster, Verschiebungsstrecke und Gangunterschied
* Interferenzfähigkeit, Sichtbarkeit des Interferenzmusters, Kohärenzlänge
 | BemerkungMögliche Vertiefung: Michelson-Morley-Experiment, Gravitationswellendetektoren,Mach-Zehnder-Interferometer, Sagnac-Interferometer |

* 1. Themenbereich „Quantenphysik und Materie“
		1. Didaktische Überlegungen

Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass jegliche klassische Modellvorstellung zur vollständigen und widerspruchsfreien Beschreibung des Verhaltens von Quantenobjekten wie Photonen und Elektronen versagen. Insbesondere stellen sie fest, dass quantenphysikalische Erkenntnisse und Experimente vertraute Konzepte und Begriffe (Determinismus, Kausalität, Bahnbegriff) in Frage stellen. Sie beschreiben das Verhalten von Quantenobjekten unter anderem mithilfe von Wahrscheinlichkeitsaussagen und der Heisenberg’schen Unbestimmtheitsrelation. Die Schülerinnen und Schüler verbinden die Beobachtung von Linienspektren mit der Struktur der Atomhülle. Sie verwenden den Photonenbegriff zur Erklärung von Emissions- und Absorptionsspektren von Atomen.

Alternative Reihenfolgen zum hier dargestellten Unterrichtsgang sind selbstverständlich möglich. Beispielsweise könnte der Einstieg in die Quantenphysik auch anhand von Materiewellen, d.h. anhand der Elektronenbeugung erfolgen. Unabhängig von der Reihenfolge sollte beachtet werden, dass im Bereich der Quantenphysik verhältnismäßig wenig Experimente im Unterricht durchgeführt werden können. Entsprechend sollte auf die wenigen zur Verfügung stehenden Experimente nicht verzichtet werden.

* + 1. Tabellarische Darstellung der Unterrichtssequenz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ProzessbezogeneKompetenzen | InhaltsbezogeneKompetenzen | Unterrichtsverlauf | Bemerkungen |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung9. zwischen realen Erfahrungen und konstruierten, idealisierten Modellvorstellungen unterscheiden […]11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren2.2 Kommunikation1. zwischen alltagssprachlicher und fachsprachlicher Beschreibung unterscheiden 3. sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen unter Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen austauschen ([…]) 2.3 Bewertung4. Grenzen physikalischer Modelle an Beispielen erläutern 11. historische Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse beschreiben | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) 3.6.6 Quantenphysik und Materie (7) [...] klassischer Bahnbegriff und klassischer Determinismus) [...](8) [...] messbare Eigenschaften von Objekten der klassischen Physik bereits vor ihrer Messung real vorliegen und dass der Wert der Messung unabhängig davon ist, ob überhaupt gemessen wurde [...](9) [...] räumlich getrennte Objekte eines zusammengesetzten Systems aus Objekten der Klassischen Physik alle ihre messbaren Eigenschaften unabhängig voneinander besitzen [...] | Stunden: 1Eigenschaften physikalischer Systeme der klassischen Physik:* Größenordnungen physikalischer Systeme im Überblick (von der Planck-Skala zur Ausdehnung des Universums)
* Kausalitäts-Prinzip
* Klassischer Bahnbegriff und Determinismus der klassischen Physik
* Lokalität und Realität im Rahmen der klassischen Physik (Sichtweise der klassischen Physik: "real ist, was man messen kann")
 | Bemerkung Die Schülerinnen und Schüler werden sich der bisher unbewusst verwendeten Begriffe und Konzepte der klassischen Physik bewusst u.a. Kausalität und Determinismus. Möglich ist die Verwendung des Begriffs des "lokalen Realismus" der klassischen Physik.  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen12. Sachtexte mit physikalischem Bezug sinnentnehmend lesen2.3 Bewertung1. bei Experimenten relevante von nicht relevanten Einflussgrößen unterscheiden  | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (3) die Bedeutung von Naturkonstanten beschreiben […] 3.6.5 Wellenoptik (8) die geschichtliche Entwicklung von Modellvorstelllungen es Lichts beschreiben ([…] Lichtwellen, elektromagnetische Wellen, Photonen)3.6.6 Quantenphysik und Materie (1) den lichtelektrischen Effekt beschreiben und anhand der Einstein'schen Lichtquantenhypothese erklären (Hallwachs-Effekt, Einstein'sche Gleichung [...], Planck'sche Konstante)(2) [...] wie sich Quantenobjekte anhand ihrer Energie und anhand ihres Impulses beschreiben lassen [...] | Stunden: 8Lichtelektrischer Effekt:* Qualitative Betrachtung des lichtelektrischen Effekts
* Eigenschaften des lichtelektrischen Effekts und seine Unvereinbarkeit mit den Gesetzen der klassischen Physik
* Quantitative Analyse des lichtelektrischen Effekts (Fotozelle und Messmethoden) und Einstein-Gleichung, Planck'sche Konstante
* Lichtquantenhypothese von Einstein, Photonenbegriff
* Photonenimpuls
 | BemerkungLehrreich ist die Lektüre der entsprechenden Absätze in Einsteins Artikel. Mögliche Vertiefung zum Photonenimpuls: Compton-Effekt. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (3) die Funktion von Modellen in der Physik erläutern […]3.6.6 Quantenphysik und Materie (2) [...] wie sich Quantenobjekte anhand ihrer Energie und anhand ihres Impulses beschreiben lassen ([...], de Broglie-Wellenlänge von Materiewellen)  | Stunden: 4Materiewellen:* de Broglie Hypothese
* Elektronenbeugung am Graphit-Kristall (qualitativ)
* Doppelspaltexperimente (quantitativ) von Elektronen, Neutronen, C-60 Molekülen, Positronen etc.
 | BemerkungGedankenexperimente zur Wellenlänge von makroskopischen KörpernMögliche Vertiefung: Beugung an periodischen Kristall-Strukturen, Bragg-Gleichung, DNA als periodische Beugungsstruktur |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen2.2 Kommunikation1. zwischen alltagssprachlicher und fachsprachlicher Beschreibung unterscheiden 2.3 Bewertung11. historische Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse beschreiben | 3.6.6 Quantenphysik und Materie (7) [...] dass der Ort und Impuls von Quantenobjekten nicht gleichzeitig beliebig genau messbar sind und begründen, warum der klassische Bahnbegriff und der klassische Determinismus aufgegeben werden müssen (Unbestimmtheitsrelation [...]) | Stunden: 4Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation * Unbestimmtheiten im Rahmen der klassischen Physik
* Unbestimmtheiten bei Quantenobjekten: Unbestimmtheitsrelation
* Vergleich: Aussagen der Unbestimmtheitsrelation für makroskopische Objekte und mikroskopische Objekte
 | BemerkungMögliche Vertiefung: Lokalisationsenergie von Elektronen in der Atomhülle sowie von Nukleonen im Atomkern; Quantenmechanische Interpretation des absoluten Nullpunkts |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen11. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren2.2 Kommunikation1. zwischen alltagssprachlicher und fachsprachlicher Beschreibung unterscheiden 4. physikalische Vorgänge […] beschreiben ([…] kausale Zusammenhänge) 2.3 Bewertung3. Hypothesen anhand der Ergebnisse von Experimenten beurteilen  | 3.6.6 Quantenphysik und Materie (3) Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Verhaltens von klassischen Wellen, klassischen Teilchen und Quantenobjekten am Doppelspalt beschreiben (4) [...] wie für Quantenobjekte der Determinismus der klassischen Physik durch Wahrscheinlichkeitsaussagen ersetzt wird (Interferenz-Experimente mit einzelnen Quantenobjekten) (5) Experimente zur Interferenz einzelner Quantenobjekte anhand von Wahscheinlichkeitsaussagen beschreiben und den Ausgang der Experimente erklären (quantenmechanische Wellenfunktion [...])(6) am Beispiel des Doppelspaltexperiments beschreiben, dass Quantenobjekte zwar stets Wellen- und Teilcheneigenschaften aufweisen, sich diese aber nicht unabhängig voneinander beobachten lassen. Sie können dies anhand der Interferenzfähigkeit und der Welcher-Weg-Information bei einzelnen Quantenobjekten erläutern (Koinzidenzmethode, Komplementarität, Delayed-choice-Variante des Doppelspaltexperimentes) | Stunden: 9Quantenphysikalische Wellenfunktion und Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation* Wiederholung: Begriffe der Stochastik u.a. Mittelwert, relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit, Gesetz der Großen Zahlen
* Taylor-Experiment, Doppelspaltexperimente mit einzelnen Photonen und Elektronen
* Quantenmechanische Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsinterpretation
* Verhalten der Wellenfunktion am Doppelspalt, Messprozess, "Kollaps" der quantenmechanischen Wellenfunktion
* Detektion des Durchgangsspalts, Welcher-Weg-Information, Komplementarität, Delayed-choice Variante des Experiments
 | BemerkungHinweis: Beim Taylor-Experiment sollten die Schülerinnen und Schüler Hypothesen aufstellen, wie sich klassische Wellen und wie sich klassische Teilchen verhalten würden (🡪 Quantenobjekte verhalten sich weder wie klassische Wellen noch wie klassische Teilchen).Mögliche Vertiefung: Delayed-choice Experimente mit Interferometern |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) 3.6.6 Quantenphysik und Materie(8) [...] messbare Eigenschaften von Objekten der klassischen Physik bereits vor ihrer Messung real vorliegen und dass der Wert der Messung unabhängig davon ist, ob überhaupt gemessen wurde. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für Quantenobjekte im Allgemeinen nicht gilt (Realität, zum Beispiel bei verschränkten Photonen)(9) [...] räumlich getrennte Objekte eines zusammengesetzten Systems aus Objekten der Klassischen Physik alle ihre messbaren Eigenschaften unabhängig voneinander besitzen. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für Quantenobjekte im Allgemeinen nicht gilt (Realität, zum Beispiel bei verschränkten Photonen) | Stunden: 2Realität und Lokalität* Vergleich von zwei unabhängigen Photonen und zwei verschränkten Photonen
* Realität und Lokalität in klassischer Physik und Quantenphysik
 | BemerkungHinweis: Betrachtet man statt doppelbrechender Kristalle atomare Photonenkaskaden (zum Beispiel in Kalzium-Atomen) können die Schülerinnen und Schüler die Erzeugung verschränkter Photonen verstehen. Mögliche Vertiefung: Simulationen zur Verschränkung und Kryptographie  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (1) an Beispielen beschreiben, dass Aussagen in der theoriegeleiteten Physik grundsätzlich empirisch überprüfbar sind (Fragestellung, Hypothese, Experiment […]) (3) die Funktion von Modellen in der Physik erläutern […]3.6.6 Quantenphysik und Materie (10) Linienspektren von Atomen als Übergänge zwischen diskreten Energieniveaus beschreiben und in einem Energieniveausschema veranschaulichen (Absorption, Emission, Bohr'sche Frequenzbedingung […], Energiewerte des Wasserstoffatoms […], Energiewerte wasserstoffähnlicher Atome) (13) unterschiedliche atomare Modellvorstellungen (Rutherford'sches Atommodell, Orbitale des Wasserstoffatoms) und Mehrelektronensysteme (Pauli-Prinzip) im Überblick beschreiben | Stunden: 14Atomphysik* Nichtphysikalische Atomvorstellung u.a. Atombegriff der Antike, Atomvorstellungen der Chemie (Periodensystem der Elemente nach Mendelejew und Meyer)
* Rutherford'sches Atommodell, Streuexperimente von Geiger und Marsden, Streuexperimente zur Erforschung der Struktur der Materie
* Emission- und Absorptionsspektren
* Linienspektrum von atomarem Wasserstoff, Balmer-Serie
* Energieniveauschema (Übergänge zwischen Energieniveaus)
* Rydberg-Formel, Bohr'sche Frequenzbedingung, Energiewerte des Wasserstoffatoms
* Wasserstoffähnliche Atome
* Ausblick auf Mehrelektronensysteme, Quantenzahlen, Pauli-Prinzip sowie das Periodensystem
 | BemerkungHinweis: Die Emissionsspektren verschiedener Elemente können experimentell bestimmt werden, bei hinreichender Ausstattung auch im Rahmen von Schülerexperimenten.Erfolgreiche Modellbildungen der Atome bzw. Moleküle müssen die experimentell beobachteten Linienspektren reproduzieren. |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung8. mathematische Umformungen zur Berechnung physikalischer Größen durchführen2.3 Bewertung4. Grenzen physikalischer Modelle an Beispielen erläutern  | 3.6.1 Denk- und Arbeitsweisen (3) die Funktion von Modellen in der Physik erläutern […]3.6.6 Quantenphysik und Materie (12) […] die Energiewerte eines Elektrons im eindimensionalen Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden berechnen sowie die Grenzen dieses Modells zur Beschreibung von Energieniveaus in Atomen beziehungsweise Molekülen erläutern  | Stunden: 3Unendlicher Potentialtopf als Atom bzw. Molekülmodell:* Stehende Materiewellen im unendlichen Potentialtopf
* Energiewerte
* Anwendung auf Atome bzw. Moleküle: Vergleich mit Linienspektrum des Wasserstoffs und Farbstoffmolekül -Carotins
 | BemerkungHinweis: Der unendliche Potentialtopf ist nicht zur Modellbildung von Atomen und Molekülen geeignet (falsches Potential, keine Ionisation, Energiewerte falsch, Linienspektrum falsch etc.).  |
| 2.1 Erkenntnisgewinnung1. Phänomene und Experimente zielgerichtet beobachten und ihre Beobachtungen beschreiben | 3.6.6 Quantenphysik und Materie (11) die Entstehung des Röntgenspektrums erklären (charakteristische Röntgenstrahlung, Bremsstrahlung, kurzwellige Grenze des Röntgenspektrums) | Stunden: 2Kontinuierliches und charakteristisches Röntgenspektrum* Funktionsweise einer Röntgen-Röhre
* Bremsstrahlung (Grenze des Röntgenspektrums, Planck'sche Konstante)
* Charakteristische Röntgenstrahlung (-Linien, Moseley'sches Gesetz)
* Anwendungen der Röntgenstrahlung in Medizin und Technik
 | BemerkungExperimente mit der Röntgenröhre |