

Biophysik *neu*



TEILDRUCK
DIE VOLLSTÄNDIGE AUSGABE
ERSCHEINT IM FESTEINBAND



Gymnasium Bayern

Bildnachweis

AdobeStock / blackday – S. 84; - / bubutu – S. 68/69; - / Dmitry Pichugin – Cover; Alamy Stock Photo / Andrew Brown – S. 108/109; - / GRANGER – Historical Picture Archive – S. 140; - / Axel Kock – S. 70; - / Pictorial Press Ltd – S. 79, 143; - / Mark Slater – Cover; - / The Granger Collection – S. 139; - / Rudmer Zwerver – S. 93; Die Physikanten / www.physikanten.de – S. 71; Rainer Dietrich, Schweinfurt – S. 71, 77, 91, 94, 95 (2), 104, 112 (4), 117, 126, 128 (2), 132; Markus Elsholz, MIND-Center Universität Würzburg – S. 121 (2), 124, 155; Christian Fauser, Würzburg – S. 151; Dr. Frank Finkenber, Würzburg – S. 87; Fotolia / Ingo Bartussek – S. 138; - / juegrapho – S. 138; Getty Images Plus / iStockphoto, AustralisPhotography – S. 138; - / iStockphoto, Susann Law Cain – S. 138; - / iStockphoto, Catshila – Cover; - / iStockphoto, FooT Too – S. 138; - / iStockphoto, grzymkiewicz – S. 138; - / iStockphoto, oratai jitsatsue – S. 98; - / iStockphoto, Vadim Kozlovsky – S. 142; - / iStockphoto, luisrphoto – S. 138; - / iStockphoto, Gytis Mikulicius – S. 113; - / iStockphoto, Ivan Montero – S. 138; - / iStockphoto, scyther5 – S. 138; Christian Hanel, Schweinfurt – S. 120; iStockphoto / 29mokara – S. 83; - / juhajarvinen – S. 80; Marco Kleine-Albers / <https://www.kopfhoeer-berater.de> – S. 71; LEYBOLD / LD DIDACTIC GmbH, www.ld-didactic.de, Hürth – S. 143; Mauritius Images / Nadja Jacke – Cover; - / Naturbildbibliothek, Juan Carlos Munoz – S. 83; - / Nature Picture Library, Nick Upton – S. 126; - / Stocktrek, David Fleetham – S. 93; Patrick Nordmann / schulphysikwiki.de, CC BY-SA 4.0 – S. 77 (3); OKAPIA / BSIP, James Cavallini – S. 143; - / McPhoto, Horst Jegen – S. 101; - / Dietmar Nill – S. 92; PHYWE Systeme GmbH & Co KG, Göttingen – S. 88, 144, 149; picture-alliance / beyond, Vladimir Godnik – S. 72; - / dpa, Frank Leonhardt – S. 81; - / Waterframe, Borut Furlan – S. 110; - / ZB, Soeren Stache – S. 110; Science Photo Library / EYE OF SCIENCE – S. 99; Sygty Software, Bochum / <http://www.sygty.com> – S. 70; Universitätsklinikum Heidelberg – S. 137; Verlagsarchiv – S. 126; www.wikimedia.org / Julio – S. 96.

Biophysik *neu*

Herausgegeben von
Rainer Dietrich und Melanie Nerdling

Bearbeitet von
Rainer Dietrich
Markus Elsholz
René Grünbauer
Gabriele Knapp
Anja Michel
Melanie Nerdling
Simon Wagner
Christine Waltner

C.C.Buchner

Biophysik neu

Gymnasium Bayern Sek II

Herausgegeben von Rainer Dietrich und Melanie Nerding

Bearbeitet von Rainer Dietrich, Markus Elsholz, René Grünbauer, Gabriele Knapp, Anja Michel,
Melanie Nerding, Simon Wagner und Christine Waltner

Zu diesem Lehrwerk sind erhältlich:

- Digitales Lehrermaterial: **click & teach** Einzellizenz, Bestell-Nr. 670651
- Weitere Lizenzformen (Einzellizenz flex, Kollegiumslizenz) und Materialien unter www.ccbuchner.de.

Dieser Titel ist auch als digitale Ausgabe **click & study** unter www.ccbuchner.de erhältlich.

Die enthaltenen Links verweisen auf digitale Inhalte, die der Verlag bei verlagsseitigen Angeboten in eigener Verantwortung zur Verfügung stellt. Links auf Angebote Dritter wurden nach den gleichen Qualitätskriterien wie die verlagsseitigen Angebote ausgewählt und bei Erstellung des Lernmittels sorgfältig geprüft. Für spätere Änderungen der verknüpften Inhalte kann keine Verantwortung übernommen werden.

An keiner Stelle im Schülerbuch dürfen Eintragungen vorgenommen werden.

Teildruck 1. Auflage, 1. Druck 2024

Dieses Werk folgt der reformierten Rechtschreibung und Zeichensetzung. Ausnahmen bilden Texte, bei denen künstlerische, philologische oder lizenzrechtliche Gründe einer Änderung entgegenstehen.

© 2024 C. C. Buchner Verlag, Bamberg

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Weder das Werk noch seine Teile dürfen ohne eine solche Einwilligung eingescannt und/oder in ein Netzwerk eingestellt werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Fotomechanische, digitale oder andere Wiedergabeverfahren sowie jede öffentliche Vorführung, Sendung oder sonstige gewerbliche Nutzung oder deren Duldung sowie Vervielfältigung (z. B. Kopie, Download oder Streaming), Verleih und Vermietung nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags.

Nutzungsvorbehalt: Die Nutzung für Text und Data Mining (§ 44b UrhG) ist vorbehalten. Dies betrifft nicht Text und Data Mining für Zwecke der wissenschaftlichen Forschung (§ 60d UrhG).

Layout und Satz: tiff.any GmbH & Co. KG, Berlin

Grafiken und Illustrationen: tiff.any GmbH & Co. KG, Berlin
und Helmut Holtermann, Dannenberg


Umschlag: Wildner + Designer GmbH, Fürth



www.ccbuchner.de

ISBN der Verkaufsaufgabe: 978-3-661-67055-3



B Das Ohr	68
4 Grundlagen der Akustik	
Materialien	70
4.1 Grundlagen: Schallwellen und Frequenzspektren	72
4.2 Die Lautstärke und ihre Messung	78
5 EVA: Ohr und Gehör	
Fahrplan für dieses Kapitel	84
5.1 Funktion des Außenohrs	88
5.2 Aufbau und Funktion des Innenohrs	94
<hr/>	
Vermischte Aufgaben	100
Selbsttest	104
Zusammenfassung	106
<hr/>	
C Strahlenphysik und Anwendungen	108
6 Elektrische Felder	
Materialien	110
6.1 Beschreibung elektrischer Felder	112
6.2 Kapazität	116
6.3 Potential und Feldstärke	118
6.4  Schülerexperiment: Äquipotentiallinien eines Dipols	120
6.5 Das EKG-Signal	122
7 Magnetische Felder	
Materialien	126
7.1 Magnetische Flussdichte und Lorentzkraft	128
7.2 Bewegung geladener Teilchen	130
7.3 Therapie mit ionisierender Strahlung	134
8 Röntgenstrahlung	
Materialien	138
8.1 Aufbau der Röntgenröhre, Röntgenspektrum	140
8.2 Biologische Wirkung von Röntgenstrahlung	144
<hr/>	
Vermischte Aufgaben	148
Selbsttest	152
Zusammenfassung	154

B \ Das Ohr

Innenohr Basilarmembran
Schallintensität Frequenzspektren Lautstärke
Corti'sches Organ Hörschwelle
Dezibel Schalldruck Superposition
Außenohr Interferenz Weber-Fechner'sches Gesetz
Schallwelle Richtungshören
Resonanz Schallpegel

Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- wie sich unterschiedliche Schallereignisse darstellen lassen.
- wie sich Lautstärken physikalisch messen lassen und wie sich Gesundheitsgefahren erkennen lassen.
- wie wir die Richtung von Schallquellen erkennen können.
- wie wir im Ohr unterschiedliche Tonhöhen und Lautstärken wahrnehmen können.



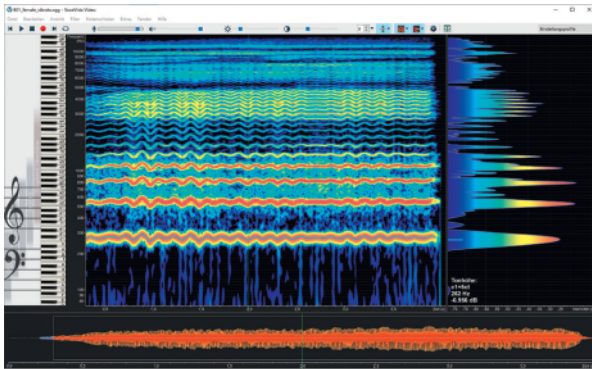
4 Grundlagen der Akustik

Materialien zu Kapitel 4.1

► M1 Einstieg: Frequenzanalyse verschiedener Schallsignale

Unter „Schall“ verstehen wir zunächst alle Sinneseindrücke, die unsere Ohren akustisch erfassen. Bei der Untersuchung verschiedener Arten von Schallsignalen lassen sich jedoch signifikante Unterschiede zwischen ihnen feststellen. Ein einfacher Sinuston mit einer festen Frequenz hebt sich klar vom Klang eines Musikinstruments ab, der aus einer komplexen Mischung mehrerer Frequenzen besteht.

Diese Unterschiede können mithilfe von Computerprogrammen sichtbar gemacht und analysiert werden. Solche „Frequenzanalytoren“ sind in der Lage, einen Klang in seine einzelnen Frequenzbestandteile zu zerlegen und darzustellen, wie stark diese jeweils vertreten sind. Diesen Zerlegungsprozess bezeichnet man mathematisch als „Fourier-Analyse“.



PC-Programm zur Frequenzanalyse eines Schallsignals

Es gibt zahlreiche akustische Frequenzanalytoren als PC-Programme, von denen viele auch kostenlos sind. Mit ihnen lassen sich vielfältige Experimente durchführen, um Klänge zu analysieren und zu visualisieren. Solche Programme werden z. B. dazu verwendet, die individuellen klanglichen Eigenschaften von Stimmen verschiedener Personen zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Analyse, also die spezifischen Charakteristika der Stimmen, können dann z. B. zur Identifizierung von Verdächtigen in Aufnahmen oder zur Verifizierung von Stimmen in Kommunikationsdaten verwendet werden.

Arbeitsauftrag

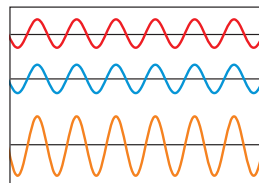
Recherchieren Sie online nach kostenlosen Apps oder PC-Programmen, mit denen Schallsignale erzeugt, aufgezeichnet und analysiert werden können. Wählen Sie eines dieser Programme für die folgenden Aufgaben aus.

- Stellen Sie im Kurs den Funktionsumfang des von Ihnen gewählten Programms anhand ausgewählter Tonbeispiele vor.
- Untersuchen Sie, wie sich ein reiner Sinuston von einem Ton gleicher Frequenz unterscheidet, der mit einem Musikinstrument erzeugt wird.
- Nehmen Sie verschiedene von Ihnen gesprochene Vokale auf und analysieren Sie diese mit Ihrem Programm. Dokumentieren Sie Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Klangspektrum.
- Analysieren Sie die Klangspektren von Luciano Pavarotti, einem renommierten Starnenor, und Paul Potts, einem Gewinner einer Castingshow, während sie die Arie „Nessun Dorma“ singen.
- Anna-Maria Hefele ist eine der bekanntesten Obertonsängerinnen. Nutzen Sie einen Frequenzanalytator, um herauszufinden, wie es ihr gelingt, zwei Töne scheinbar gleichzeitig zu erzeugen und welche Besonderheiten dabei im Klangspektrum auftreten.

► M2 Lernaufgabe: Überlagerung von Schallwellen

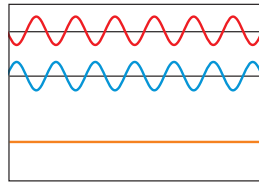
Treffen zwei oder mehrere gleichartige Wellen aufeinander, so überlagern sich diese zu einer neuen Welle. Sie kennen dieses Phänomen aus der 11. Klasse sowie aus Kapitel 3.1; dort haben Sie zwei besondere Überlagerungsarten unterschieden:

Konstruktive Interferenz: Hier addieren sich die Amplituden der Wellen, wodurch eine Welle mit größerer Amplitude entsteht. Dies tritt auf, wenn die Wellen in Phase sind, d.h. ihre Wellenberge und -täler zur gleichen Zeit an der gleichen Stelle auftreten.



Welle 1 Welle 2
Interferenzmuster

Destruktive Interferenz: Sind die Wellen gegenphasig, so trifft ein Wellenberg stets auf ein Wellental, wodurch beide Wellen sich gegenseitig auslöschen.



Noise-Cancelling-Kopfhörer nutzen das Prinzip der destruktiven Interferenz, um unerwünschte Hintergrundgeräusche aktiv zu reduzieren oder zu eliminieren. Sie sind mit Mikrofonen ausgestattet, die kontinuierlich die Außengeräusche aufnehmen. Diese Geräusche werden von einer internen Elektronik analysiert, die daraufhin Schallwellen erzeugt, die genau gegenphasig zu den störenden Geräuschen sind.

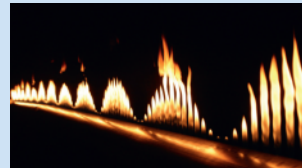


<https://www.kopfhoeer-berater.de/artikel/was-ist-anc-funktionsweise>

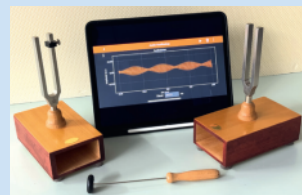
Durch die destruktive Interferenz neutralisieren diese gegenphasigen Wellen die unerwünschten Außengeräusche. Parallel zur aktiven Geräuschunterdrückung wird das gewünschte Audiosignal – z. B. Musik, Podcast oder eine andere Tonfolge – direkt über die Kopfhörerlautsprecher an den Benutzer übermittelt. Da die störenden Hintergrundgeräusche durch das Noise Cancelling reduziert werden, kann der gewünschte Ton in einer viel klareren und ungestörten Qualität gehört werden.

Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie die Geschichte der aktiven Geräuschunterdrückung durch sogenannten „Antischall“ von der ersten Idee im Jahre 1878 bis zur finalen Umsetzung 1988.
- Begründen Sie, dass geräuschreduzierende Kopfhörer am effektivsten bei konstanten, tiefen Frequenzen wie dem Brummen eines Flugzeugmotors arbeiten, bei plötzlichen Geräuschen oder variablen Frequenzen aber weniger effektiv sind.
- Erstellen Sie eine Präsentation zum Thema „Rubens’sches Flammenrohr“. Gehen Sie dabei auf die Entstehung und Rolle der stehenden Schallwelle im Inneren des Rohrs ein.



- Recherchieren Sie das akustische Phänomen der „Schwebung“. Nehmen Sie danach zwei Stimmgabeln unterschiedlicher, aber nahe beieinanderliegender Frequenzen und schlagen Sie diese gleichzeitig an. Beschreiben Sie den Höreindruck und vergleichen Sie ihn mit Ihren Rechercheergebnissen.





4.1 Grundlagen: Schallwellen und Frequenzspektren

Neben dem Sehen ist das Hören einer der wichtigsten Sinne des Menschen. Die Stimme als lautbildendes Organ dient Tieren schon seit Jahrmillionen zur lautlichen Verständigung innerhalb einer Horde. Vor rund zwei bis drei Millionen Jahren entwickelte sich aus dieser Tierlautsprache, die vorwiegend aus gelallten und geheulten Lauten besteht, die menschliche Sprache.

Um zu verstehen, wie Sprache über größere Entfernungen in der Luft übertragen wird, ist es nötig, die physikalischen Grundlagen des Schalls zu verstehen. Hierzu werden im Folgenden ausgewählte Bereiche der Akustik betrachtet, die sich als Teil der Physik mit der Entstehung und Erzeugung, der Ausbreitung und Messung sowie der Wahrnehmung und Wirkung des Schalls beschäftigt.

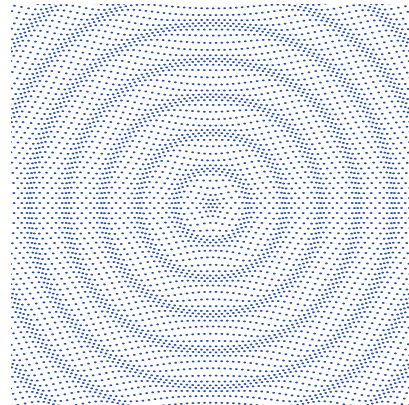
Schall als mechanische Welle

Feste Körper, aber auch Gase und Flüssigkeiten, können durch Anregung zum Schwingen gebracht werden. Beim Singen und Sprechen ist das Vibrieren des Kehlkopfes deutlich tastbar. Durch Zupfen lässt sich eine eingespannte Gitarrensaite in Schwingungen versetzen. Die periodische Bewegung der Saite erfolgt dabei so schnell, dass das Auge die Schwingung nicht auflösen kann (B1).



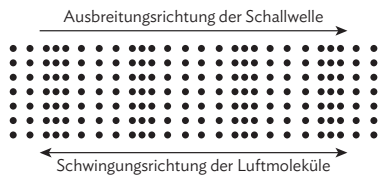
B1 | Schwingende Saiten einer Gitarre

Befindet sich die Saite in einem elastischen Medium wie Luft, so überträgt der schwingende Körper seine Bewegung auf die ihn umgebenden Luftmoleküle. Wenn sich die Saite auf die Luftmoleküle zubewegt, so verringert sich in der Nähe der Saite der mittlere Abstand zwischen den Molekülen. Es entsteht eine Zone, in der der Luftdruck gegenüber dem schon vorhandenen atmosphärischen Luftdruck ansteigt. Beim Zurückschwingen der Saite entsteht wiederum ein Bereich, in dem der Abstand der Luftmoleküle zunimmt. Dies verursacht eine Erniedrigung des Luftdrucks in dieser Zone.



B2 | Querschnitt durch eine sich ausbreitende Schallwelle mit Bereichen verdichteter bzw. verminderter Luftteilchenkonzentration

Beim Schwingen der Saite entstehen nun periodisch Zonen erhöhten bzw. verminderten Drucks, die sich von der Oberfläche des schwingenden Körpers ablösen



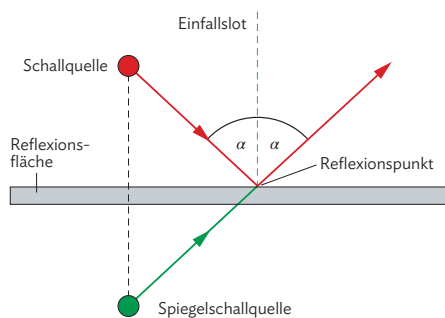
B3 | Schall als Längswelle

und als Wellenbewegung nach allen Seiten in der Umgebung ausbreiten (B2). Die einzelnen Luftmoleküle führen dabei eine gedämpfte Schwingung parallel zur Ausbreitungsrichtung der Schallwellen aus. In Luft breitet sich der Schall als Längswelle (Longitudinalwelle) aus (B3).

Der Wellencharakter des Schalls zeigt sich an einer ganzen Reihe von Phänomenen, die bereits aus dem früheren Unterricht bekannt sind oder im Zusammenhang mit den Lichtwellen (Kapitel 3) aufgetreten sind.

Reflexion

Trifft eine Schallwelle auf eine Wand, so wird sie von dieser in den Raum zurückgeworfen. Bei glatten Oberflächen gilt das bekannte Reflexionsgesetz: Einfallswinkel und Ausfallwinkel der Welle sind gleich groß (B4).



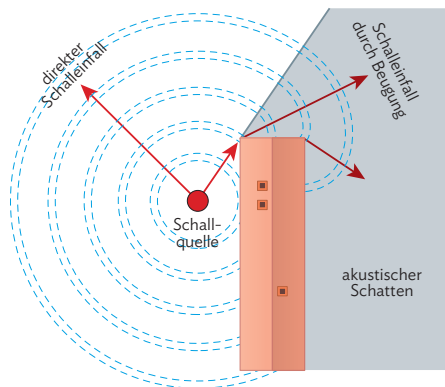
B4 | Reflexion einer Schallwelle



„glatt“ ist immer im Vergleich zur Wellenlänge zu verstehen. Beim Schall bedeutet das, dass Unregelmäßigkeiten, die deutlich kleiner als ein Zentimeter sind, keine Rolle spielen.

Beugung

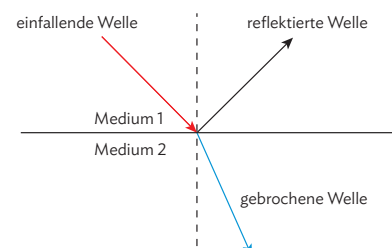
Schallwellen werden von einem begrenzten Hindernis nicht vollständig abgeschattet. Beispielsweise kann man hinter einem Gebäude stehend den Lärm einer Straße, die vor dem Gebäude verläuft, noch gedämpft hören (B5). Die Erklärung hierfür liefert wieder das Huygens'sche Prinzip (Kapitel 3.1): Die neue Wellenfront ergibt sich als Überlagerung (Superposition) der einzelnen Elementarwellen. Dadurch wird der Schall um Kanten und Hindernisse herumgelenkt. Allgemein führt die Beugung dazu, dass sich eine Schallwelle hinter Öffnungen und Hindernissen auch in Richtungen ausbreitet, die im „akustischen Schatten“ liegen. Wie stark die Welle in diesen Schattenbereich eindringt, hängt allerdings von den Größenverhältnissen ab: Nur, wenn die Wellenlänge des Schalls mindestens in der Größenordnung des Hindernisses liegt, werden Beugungseffekte deutlich. Deshalb können wir zwar um die Ecke hören, aber nicht sehen.



B5 | Beugung einer Schallwelle hinter einem Gebäude

Brechung

Trifft eine Schallwelle auf die Grenzfläche zweier Medien (z. B. Luft und Wasser), in denen sich der Schall unterschiedlich schnell ausbreiten kann, so wird ein Teil der Welle an der Übergangsstelle reflektiert. Der andere Teil der Welle wird beim Übergang gebrochen. Die Ablenkung der Schallwelle erfolgt dabei zum Einfallslot hin, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls sich im neuen Medium verringert (B6). Im umgekehrten Fall wird der Schall vom Einfallslot wegelenkt. Wie in der Optik gilt auch für die Brechung von Schallwellen das Brechungsgesetz (Kapitel 1.2, Arbeitsauftrag 3).



B6 | Brechung einer Welle



4.1 Grundlagen: Schallwellen und Frequenzspektren



Mit der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Schalls geht auch eine Änderung der Wellenlänge λ des Schalls einher. Die Frequenz f der Schallwelle verändert sich hierbei jedoch nicht. Für den Übergang der Schallwelle von Medium 1 zu Medium 2 gilt somit:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

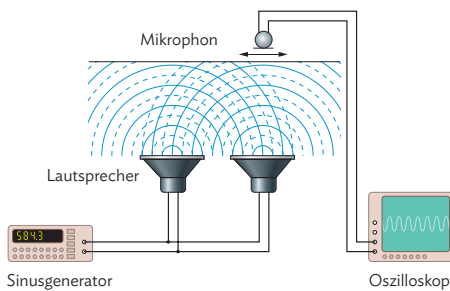
Wie bei allen Wellen gilt auch bei Schallwellen der Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ , Ausbreitungsgeschwindigkeit c und Frequenz f :

$$c = \lambda \cdot f$$

Die Schallgeschwindigkeit c in Luft beträgt dabei für Normaldruck (1013 hPa) und für eine Temperatur von 20 °C etwa $343 \frac{m}{s}$. Die Schallgeschwindigkeit hängt vom Druck und von der Temperatur des Stoffes, in dem sich die Schallwelle ausbreitet, ab, vor allem aber von den elastischen Eigenschaften des jeweiligen Ausbreitungsmediums. In destilliertem Wasser beträgt sie (bei einer Wassertemperatur von 20 °C) etwa $1483 \frac{m}{s}$. In festen Stoffen kann der Schall dagegen eine Geschwindigkeit von bis zu $18000 \frac{m}{s}$ erreichen (Diamant).

Interferenz von Schallwellen

Wellen können sich überlagern (superponieren) und dabei gegenseitig auslöschen oder verstärken (destruktive bzw. konstruktive Interferenz, vgl. M2 auf S. 71). Interferenz tritt bei allen Wellenarten auf; der folgende Versuch demonstriert, dass Schall aus zwei Quellen ebenfalls miteinander interferieren kann. Er liefert damit einen weiteren Beleg für die Wellennatur des Schalls.

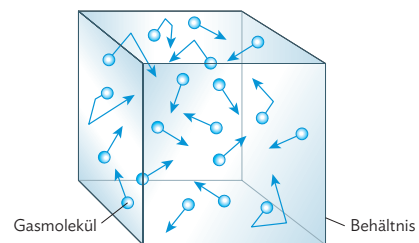


B7 Versuch zum Nachweis der Interferenz von Schallwellen

Zwei Lautsprecher werden an demselben Sinusgenerator angeschlossen und senden in die gleiche Richtung Schallwellen identischer Frequenz aus. Verschiebt man nun parallel zu der Anordnung der Lautsprecher ein Mikrofon und registriert damit den resultierenden Gesamtschall, so durchläuft dieser periodisch Maxima und Minima der Lautstärke. Die von den Lautsprechern ausgestrahlten Schallwellen interferieren also genauso wie Lichtwellen, die einen Doppelspalt durchlaufen.

Zusammenhang zwischen Druck und Kraft

Mit der Größe Druck haben Sie in der 9. Klasse zunächst den Zustand einer Flüssigkeit oder eines Gases beschrieben. Anschaulich kann man sich den Druck als Maß für das Gepresstsein eines Stoffes vorstellen. Für eine quantitative Definition des Drucks p wird der Betrag der Kraft F pro Flächeneinheit A bestimmt, die das Gas auf eine Begrenzungsfläche ausübt.



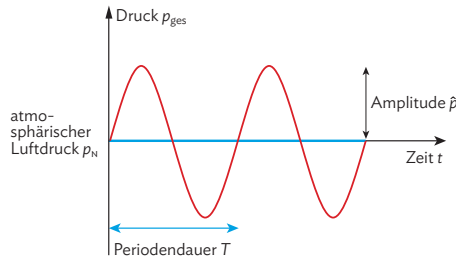
B8 Bewegung der Gasteilchen in einem Behältnis

Der Druck wird quantitativ definiert als der Quotient von Kraft und Flächeneinheit, auf das diese Kraft senkrecht einwirkt: $p = \frac{F}{A}$

Die Einheit des Drucks ist ein Pascal: $[p] = 1 \text{ Pa}$. Aus der Definition ergibt sich: $1 \text{ Pa} = 1 \frac{N}{m^2}$.

Mathematische Beschreibung von Schallwellen

Die einfachste Form einer Schallwelle stellt eine harmonische Welle dar, wie sie in der 11. Klasse ausschließlich betrachtet wurde. Dabei folgt die Auslenkung der Luftteilchen einer Sinuskurve; man spricht deshalb auch von einer Sinuswelle. Weil für Messgeräte der Schalldruck leichter zugänglich ist, wird meist diese Größe als Funktion der Zeit aufgetragen (B9). An einer festen Stelle (z. B. dem Messgerät oder dem Ohr) ist dann der Druckverlauf:



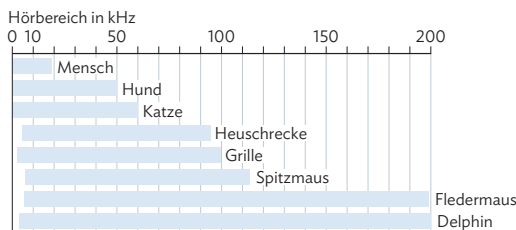
B9 | Schwingungsdiagramm einer sinusförmigen Schwingung

i Reine Töne in Form einer Sinuswelle kommen in der Natur nicht vor. Näherungsweise lässt sich eine Sinuswelle aber mit einer Stimmgabel erzeugen.

$$p_{ges}(t) = p_n + p \cdot \sin(\omega t)$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$. Der Gesamtdruck p_{ges} zu einer bestimmten Zeit t setzt sich also aus dem zeitlich konstanten, statischen Luftdruck p_n (Normaldruck im Medium) und dem überlagerten, sinusförmigen Schalldruck $p \cdot \sin(\omega t)$ zusammen. Der Schalldruck ist dabei für übliche Töne und Geräusche um etliche Größenordnungen kleiner als der statische Luftdruck.

Zur Beschreibung der Tonhöhe eines Sinustons gibt man seine Frequenz f an, die der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde entspricht. Töne mit einer großen Frequenz empfinden wir als hoch, solche mit einer geringen Frequenz als tief. Unser Gehör kann Töne in einem Frequenzbereich von 16 Hz bis etwa 20 kHz wahrnehmen. Im Alter nimmt der Hörbereich des Menschen jedoch ab.



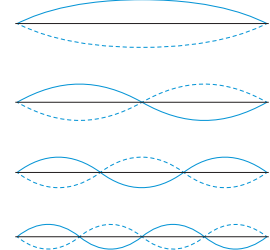
B10 | Hörbereiche des Menschen und verschiedener Tiere

Frequenzen unterhalb des Hörbereichs liegen im Infraschallbereich, Töne oberhalb im Ultraschallbereich. Das Hörvermögen vieler Tiere ist bezüglich der Wahrnehmung sehr hoher oder sehr tiefer Töne dem des Menschen überlegen (B10).

Musikinstrumente (z. B. Klarinetten, Geigen, Gitarren) erzeugen Schall, der aus einer Überlagerung von mehreren Sinustönen besteht. Dies lässt sich verstehen, wenn man betrachtet, wie der Klang z. B. bei einer Geigensaite erzeugt wird. Als Modell kann man ein Gummiband oder eine lange Schraubenfeder der Länge l einsetzen und periodisch auslenken. Weil die Saite an zwei Stellen befestigt ist und sich dort nicht bewegen kann, gibt es für ihre Schwingungen nur ganz bestimmte Muster („stehende Wellen“, B11). Für die zugehörigen Wellenlängen können deshalb nur bestimmte Werte auftreten. Aus der Grafik ergibt sich die Bedingung: $\frac{\lambda_k}{2} = \frac{l}{k+1}$ mit $k = 0, 1, 2, \dots$

i Für den Luftdruck p_n der Atmosphäre auf Meereshöhe hat man den empirisch ermittelten Normwert von 1013 hPa festgelegt; je nach Wetterlage schwankt der aktuell gemessene Luftdruck um diesen Wert.

i Erinnerung: Die Frequenz f einer Schwingung ist der Kehrwert der Periodendauer T : $f = \frac{1}{T}$. Die Einheit der Frequenz ist 1 Hz (Hertz) = 1/s.



B11 | Schwingungsmuster einer Geigensaite



4.1 Grundlagen: Schallwellen und Frequenzspektren

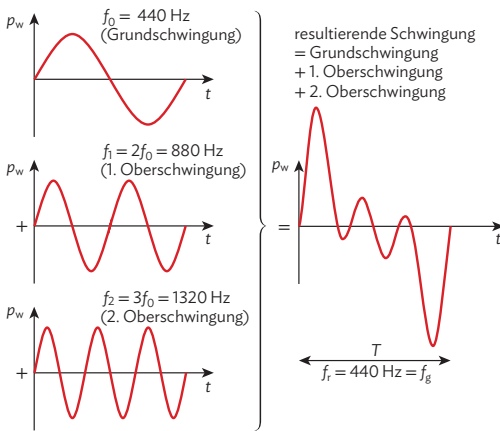
i

Vorsicht, in der Formel steht c_{Saite} für die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Saite, nicht für die Schallgeschwindigkeit in der Luft. c_{Saite} kann beim Stimmen durch die Saitenspannung beeinflusst werden.

Töne und Klänge

Weil bei jeder Welle die Wellenlänge und die Frequenz über die Ausbreitungsgeschwindigkeit verknüpft sind, kann eine Saite nur mit festen, genau bestimmten Frequenzen schwingen: $f_k = \frac{c_{\text{Saite}}}{\lambda_k} = \frac{c_{\text{Saite}}}{2 \cdot l} \cdot (k + 1)$. Diese Frequenzen sind die gleichen wie die der Schallwellen, die von der Saite angeregt werden. Mit $f_0 = \frac{c_{\text{Saite}}}{2 \cdot l}$ gilt:

Durch eine schwingende Saite können Töne mit festen Frequenzen $f_k = f_0 \cdot (k + 1)$ erzeugt werden. Dabei beschreibt $k = 0$ die Grundschiwingung, die Schwingungen mit $k = 1, 2, \dots$ heißen Oberschwingungen.

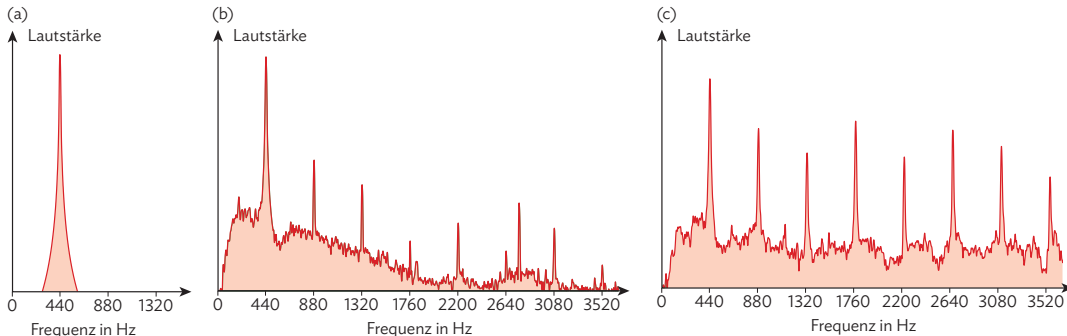


B12 Aufbau eines einfachen Klangs aus Grundschwingung und zwei Oberschwingungen

Die Frequenzen der Oberschwingungen sind also ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Je nach Art der Anregung schwingt die Geigensaite in verschiedenen dieser Muster gleichzeitig. Der zeitliche Verlauf eines solchen Klangs ist im Vergleich zum einfachen Sinuston deutlich komplizierter. Ähnlich wie bei der Interferenz ergibt sich der Schwingungsverlauf aus der Überlagerung mehrerer Grund- und Oberschwingungen. Im Schwingungsdiagramm werden zu jedem Zeitpunkt die einzelnen Werte des Schalldrucks addiert (B12). Das Ergebnis stellt also eine Superposition mehrerer Schwingungen dar. Dabei bleibt die Periodendauer der Grundschwingung erhalten. Man hört im gezeigten Beispiel immer noch den Grundton mit der Frequenz 440 Hz (musikalisch: Kammerton a¹), allerdings in einer für das Instrument charakteristischen Klangfarbe.

Um die Zusammensetzung eines Klangs zu analysieren, trägt man die Amplituden der darin enthaltenen Sinusschwingungen in einem Diagramm auf. Man erhält auf diese Weise das Frequenzspektrum des Klangs. Das mathematische Verfahren, das den zeitlichen Verlauf der Druckschwankung auf die Stärke der einzelnen Frequenzen abbildet, heißt Fourieranalyse.

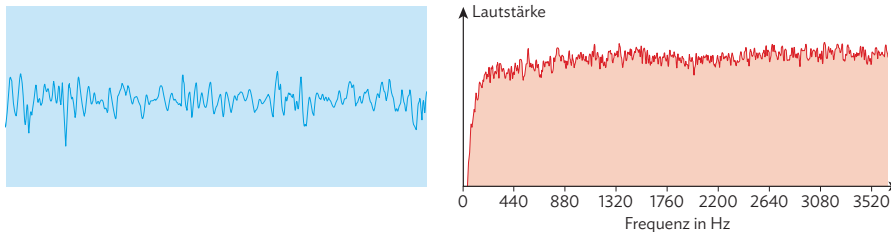
Betrachtet man Frequenzspektren, die von unterschiedlichen Quellen aufgenommen wurden, lassen sich charakteristische Unterschiede feststellen (B13): Reine Töne sind in der Darstellung senkrechte Linien, deren Länge ihre Amplitude angibt.



B13 Frequenzspektren eines (a) reinen Sinustons, (b) einer Stimmgabel und (c) einer Geige. Die „Lautstärke“ wird in Kapitel 4.2 genauer definiert; physikalisch exakt spricht man vom „Schallpegel“.

Klänge dagegen zeigen eine mehr oder weniger große Anzahl von abgesetzten Linien; man spricht von einem diskreten Spektrum.

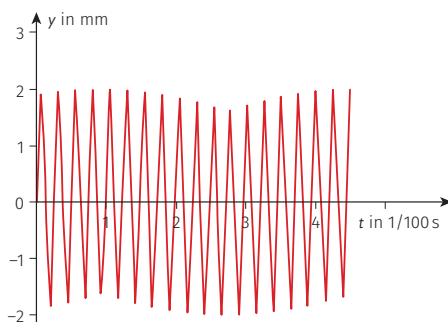
Im Gegensatz zu einem Ton oder Klang ist die Wellenform eines Geräusches nicht periodisch (B14 links). Einem Geräusch kann daher auch keine eindeutige Tonhöhe zugeordnet werden. Geräusche setzen sich aus sehr vielen Einzelschwingungen zusammen, die aber anders als bei harmonischen Klängen keine Vielfachen einer Grundfrequenz sind; die Frequenzabstände der einzelnen Schwingungen können dabei unendlich klein werden. Man spricht hier von einem „kontinuierlichen Spektrum“ des analysierten Geräusches (B14 rechts).



B14 Wellenform eines Geräusches (Zerknüllen von Papier) und das zugehörige Frequenzspektrum

Arbeitsaufträge

- 1) Nennen Sie die Eigenschaften einer Schallwelle und geben Sie jeweils eine Beobachtung an, die diese Eigenschaften verdeutlicht.
- 2) a) Eine Stimmgabel mit dem Kammerton a^1 hat die Frequenz 440 Hz. Berechnen Sie Periodendauer und Wellenlänge der von ihr in die Luft abgestrahlten Schallwelle ($c_{\text{Luft}} = 343 \text{ m/s}$).
b) Atmet man Heliumgas ein, dann verändert sich die Stimmlage beim Sprechen oder Singen. Erklären Sie das mit der anderen Schallgeschwindigkeit in Helium ($c_{\text{Helium}} = 981 \text{ m/s}$).
- 3) Fliegen, Mücken und Bienen können wir anhand ihrer verschiedenen Summtöne unterscheiden.

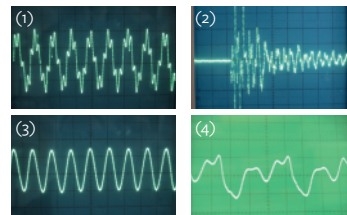


Flügelschlag einer Mücke

- a) Recherchieren Sie die Entstehung dieser Töne und stellen Sie Ihre Ergebnisse vor.
- b) Zur Bestimmung des Tons einer Stechmücke wurde in einem Experiment ihr Flügelausschlag $y(t)$ aufgezeichnet. Bestimmen Sie aus dem Messergebnis die Frequenz des Tons dieser Mücke.
- c) Begründen Sie, dass wir den Flügelschlag eines Schmetterlings nicht hören können.

- 4) Mit einem Oszilloskop können Klänge und Geräusche sichtbar gemacht werden. Ordnen Sie die Aufnahmen in der Abbildung den folgenden Schallereignissen zu und begründen Sie:

- Stimmgabel
- zwei gleichzeitig angeschlagene Stimmgabeln
- Knall
- gesungener Ton



Schallereignisse am Oszilloskop



4.2 Die Lautstärke und ihre Messung

Schallintensität

Neben der Frequenz eines Tons ist die Lautstärke von besonderem biologischem Interesse. Eine geeignete physikalische Größe, die die „Schallstärke“ beschreibt, ist die Schallintensität I . Sie ist definiert als Schalleistung P pro aufnehmender Fläche A .



Wenn die Schalleistung gleichmäßig in alle Richtungen abgegeben wird, ist die aufnehmende Fläche eine Kugeloberfläche mit Radius r und Flächeninhalt $A = 4\pi r^2$. Bei gerichteten Schallquellen reduziert sich diese Fläche.

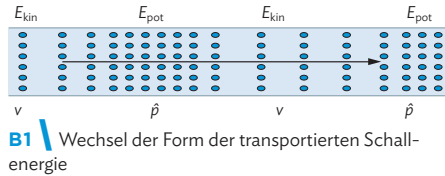
$$\text{Schallintensität } I = \frac{P}{A}$$

Die Einheit der Schallintensität ist $[I] = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Da die Schalleistung die aufgenommene Energiemenge ΔE pro Zeit Δt angibt, kann die Schallintensität auch als aufgenommene Energiemenge ΔE pro Zeit Δt und Fläche A geschrieben werden:

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A}$$

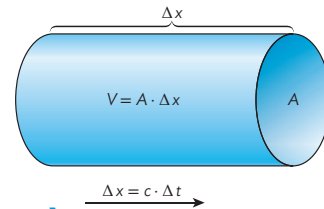
Die anschauliche Bedeutung der Schallintensität I kann man sich an folgender Analogiebetrachtung klarmachen: Bei einem Regenschauer sind neben der Regenmenge auch die Regendauer und die Fläche, auf die der Niederschlag fällt, entscheidend. Für die Stärke des Niederschlags ist also die Regenmenge pro Zeit und Fläche maßgebend. So können 3 Liter je nach Zeit und Fläche Starkregen oder Nieselregen bedeuten. Analog dazu gibt die Schallintensität die z. B. von der Fläche des Trommelfells aufgenommene Schallenergie pro Zeiteinheit an.

Da eine Schallwelle die räumliche Ausbreitung einer Schwingung des Mediums (in der Regel Luft) ist, wechselt die von der Welle mit der Schallgeschwindigkeit c transportierte Energiemenge ΔE zwischen der kinetischen Energie des schwingenden Mediums und der potentiellen Energie des durch die Druckamplitude \hat{p} komprimierten Mediums (B1).



Nimmt man vereinfachend an, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt die transportierte Energiemenge ΔE in einem bestimmten Volumen $V = A \cdot \Delta x$ nur in Form von kinetischer Energie der schwingenden Teilchen vorliegt, so gilt: $\Delta E = \frac{1}{2} m v^2$.

Hierbei steht m für die Gesamtmasse aller in dem Volumen V befindlichen Teilchen und v für deren Maximalgeschwindigkeit bei ihrer Schwingungsbewegung – nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c . Diese Energiemenge ΔE legt im Zeitintervall Δt die Strecke Δx mit der Schallgeschwindigkeit c zurück (B2).



Unter Verwendung von $m = \rho \cdot V$ und $V = A \cdot \Delta x$ sowie $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ergibt sich damit für die Schallintensität I :

$$I = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot v^2}{2 \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v^2$$

Die beschriebene kinetische Energie ΔE wird bei der weiteren Ausbreitung der Schallwelle in potentielle Energie umgewandelt, die dann im komprimierten Medium gespeichert ist (B2). Ähnliche Überlegungen zur potentiellen Energie (Aufgabe 10 auf S. 101) führen damit zu einer alternativen Darstellung der Schallintensität:

$$I = \frac{1}{2} \cdot p \cdot v \text{ mit der Amplitude } p \text{ des Schalldrucks (Kapitel 4.1).}$$

Setzt man die beiden erhaltenen Darstellungen für die Schallintensitäten gleich, erhält man: $\rho \cdot c \cdot v = p$. Die oben angegebene Schallintensität lässt sich somit auch mit p beschreiben:

Die Intensität einer Schallwelle in einem verlustfreien akustischen Medium ist

$$I = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot c} \cdot p^2$$

Schallpegel

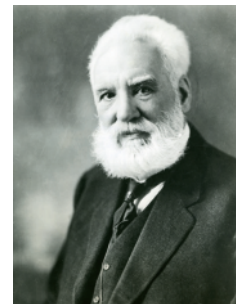
Obwohl die Lautstärke physikalisch sinnvoll durch die Schallintensität beschrieben werden kann, bringt dies doch zwei Nachteile mit sich:

- Unser Ohr kann Druckschwankungen in einem Bereich von 10^{-5} Pa (Hörschwelle) bis etwa 10^2 Pa (Schmerzgrenze) wahrnehmen; dies entspricht Schallintensitäten von 10^{-12} W/m² bis 10^2 W/m². Dies ist eine erstaunliche Wahrnehmungsleistung unseres Gehörs – kein technisches Messgerät kann ohne entsprechende Umschaltvorrichtung einen so weiten Messbereich abdecken. Eine lineare Lautstärkeskala über diesen ganzen Bereich erweist sich aber als sehr unpraktisch.
- Die menschliche Hörempfindung ist weder direkt proportional zu I noch zu p . Eine Verdoppelung der Schallintensität eines Sinustons empfinden wir nicht als Verdoppelung seiner Lautstärke. Dies hängt damit zusammen, dass für unsere Empfindung nicht der absolute Wert einer Reizänderung entscheidend ist, sondern der relative: Eine Reizerhöhung wird schwächer empfunden, wenn der Reiz vorher schon hoch war (Weber-Fechner'sches Gesetz).

Aus diesen Gründen führt man den Schallpegel L als logarithmischen Maßstab für die Beschreibung der Stärke des Schalls ein. Er berechnet sich aus dem Verhältnis von vorliegender Schallintensität I zur Hörschwelle $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Der Schallintensitätspegel ist ein dem menschlichen Höreindruck angepasstes Maß für die Lautstärke. Es gilt: $L_I = 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{I}{I_0}$

Der Schallpegel wird in Dezibel (dB) angegeben; dabei ist ein Dezibel der zehnte Teil eines Bels (B). Diese nach dem amerikanischen Ingenieur Alexander Graham Bell benannte Maßeinheit hat aber einen anderen Charakter als die bisher bekannten physikalischen Einheiten wie Meter oder Kilogramm. Die „Hilfseinheit“ Bel bzw. Dezibel weist nur darauf hin, dass es sich bei dem errechneten Zahlenwert für L um den Logarithmus eines Verhältnisses handelt.



B3 Alexander Bell (1847–1922) erhielt 1876 das erste Patent auf das Telefon und entwickelte dieses zur Serienreife.

4.2 Die Lautstärke und ihre Messung

Musteraufgabe

Ein Hund bellt mit einer Schalleistung von 1,0 mW. Bestimmen Sie den Schallintensitätspegel im Abstand von 5,0 m sowie den Schallintensitätspegel im gleichen Abstand von zwei solchen Hunden.

Lösung

Unter der Annahme, dass sich die Schalleistung gleichmäßig in alle Richtungen verteilt, ist die „beschallte“ Fläche eine Kugeloberfläche mit dem gegebenen Radius. Es ist dann:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{1,0 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{4\pi \cdot (5,0 \text{ m})^2} = 3,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Der Schallintensitätspegel berechnet sich zu

$$L_1 = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{I_1}{I_0} = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{10^{-12}} = 65 \text{ dB}.$$

Bei zwei Hunden verdoppelt sich die Schallintensität. Der zugehörige Schallintensitätspegel wird dann:

$$L_2 = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{I_2}{I_0} = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{6,4 \cdot 10^{-6}}{10^{-12}} = 68 \text{ dB}.$$

Der Schallpegel verdoppelt sich nicht, er steigt nur um 3 dB.



B4 Die Schallintensität wird mit einem Schallpegelmessgerät gemessen, das den Schalldruck am Messort erfasst.



In allen hier betrachteten Situationen liefern Schallintensitätspegel und Schalldruckpegel den gleichen Wert; wir sprechen deshalb oft auch nur von „Schallpegel“.

Statt Intensitäten kann man auch Schalldrücke vergleichen. Weil die Schallintensität quadratisch von p abhängt, findet man:

$$L_p = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{p^2}{p_{\text{Bezug}}^2} = 10 \text{ dB} \cdot \lg \left(\frac{p}{p_{\text{Bezug}}} \right)^2 = 20 \text{ dB} \cdot \lg \frac{p}{p_{\text{Bezug}}} = 20 \text{ dB} \cdot \lg \frac{p_{\text{eff}}}{p_0}$$

und spricht vom Schalldruckpegel. In der Praxis können mit Schallpegelmessgeräten nicht die Amplituden p bestimmt werden, sondern die sogenannten Effektivwerte p_{eff} . Der Bezugswert ist hier $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$.

Schallquelle	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{p_{\text{eff}}}{p_0}$	dB	Bemerkung
	10^0	10^0	0	Hörschwelle
normales Atmen	10^1		10	kaum hörbar
raschelnde Blätter	10^2	10^1	20	
leises Flüstern (5 m entfernt)	10^3		30	sehr leise
Bibliothek	10^4	10^2	40	
ruhiges Büro	10^5		50	leise
normale Unterhaltung (1 m entfernt)	10^6	10^3	60	
betriebsamer Verkehr	10^7		70	
Fabrikdurchschnittswert	10^8	10^4	80	
Schwertransporter (15 m entfernt); Wasserfall	10^9		90	Dauerbelastung (Hörschäden)
alte U-Bahn	10^{10}	10^5	100	
Baulärm (3 m entfernt)	10^{11}		110	
Rockkonzert (2 m entfernt); Abheben eines Düsenflugzeugs	10^{12}	10^6	120	Schmerzgrenze
Presslufthammer; Maschinengewehrfeuer	10^{13}		130	
Abheben eines Düsenflugzeugs (in unmittelbarer Nähe)	10^{15}	10^7	150	
großes Raketentriebwerk (in unmittelbarer Nähe)	10^{18}		180	

T1 Relative Intensitäten und Schallpegel einiger Schallquellen ($I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$; $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$)

Die Verwendung der Dezibel-Skala für den Schallpegel führt zu zahlenmäßig gut handhabbaren Werten und entspricht eher unserem nichtlinearen Hörempfinden. So werden z. B. die beiden Hunde in der Musteraufgabe (S. 80) eben nicht als doppelt so laut wie ein Hund wahrgenommen. Entsprechend ändert sich der Schallpegel lediglich um 3 dB. In Tabelle T1 sind einige Schallquellen und die Größenordnungen ihrer jeweiligen Schallintensitäten bzw. Schallpegel aufgelistet. Die Schallintensität steigt jeweils um den Faktor 100, wenn der Schallpegel um 20 dB zunimmt.

Am oberen Ende liegt die Schmerzgrenze bei einem Schallpegelwert von rund 130 dB. In unmittelbarer Nähe des Ohrs abgefeuerte Schusswaffen, aber auch Spielzeugpistolen oder Knallkörper erreichen Spitzenwerte von mehr als 150 dB. Die Intensität des Schalls ist hier so groß, dass es zu einem Knalltrauma kommen kann, bei dem das Ohr dauerhaft geschädigt wird.

i

Dies lässt sich auch allgemein zeigen:

$$\begin{aligned} 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{100 \cdot I}{I_0} \\ &= 10 \text{ dB} \cdot (\lg 100 + \lg \frac{I}{I_0}) \\ &= 10 \text{ dB} \cdot (2 + \lg \frac{I}{I_0}) \end{aligned}$$

Musteraufgabe

Eine Lautsprecherbox steht im Abstand von 2,0 m.

- a) Bestimmen Sie die Schallleistung, die die Box maximal haben darf, um auch in längerer Dauer keine Hörschäden zu verursachen. Geben Sie die Voraussetzungen an, die dieser Rechnung zugrunde liegen, und entscheiden Sie, ob sie hier erfüllt sind.
- b) Berechnen Sie den Effektivwert des Schalldrucks, der bei der Schallleistung aus a) auftritt.

Lösung

- a) Die Grenze, ab der eine Dauerbelastung zu Hörschäden führt, ist in Tabelle T1 mit 90 dB angegeben. Für die zugehörige Schallintensität gilt:

$$\frac{L_I}{10 \text{ dB}} = \frac{90 \text{ dB}}{10 \text{ dB}} = 9,0 = \lg \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 1,0 \cdot 10^9$$

Es darf also höchstens

$$I = 1,0 \cdot 10^9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ sein.}$$

Die Schallleistung darf dann maximal

$$P = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 4\pi \cdot (2,0 \text{ m})^2 = 50 \text{ mW}$$

betragen.

Bei Lautsprechern ist allerdings die Voraussetzung einer gleichmäßigen Schallabgabe vermutlich nicht erfüllt. Wenn die Schallleistung gerichtet ist, dann muss der sichere Wert deutlich unter den berechneten 50 mW liegen.

- b) Der Effektivwert des Schalldrucks berechnet sich analog zur Schallintensität:

$$\frac{L_p}{20 \text{ dB}} = \frac{90 \text{ dB}}{20 \text{ dB}} = 4,5 = \lg \frac{p_{\text{eff}}}{p_0} \Rightarrow \frac{p_{\text{eff}}}{p_0} = 10^{4,5} = 3,16 \cdot 10^4$$

Es ist also dann $p_{\text{eff}} = 3,16 \cdot 10^4 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} = 0,63 \text{ Pa}$

Die Hörkurve des Menschen

Bei einem Hörtest (B5) spielt man einem Probanden Messtöne unterschiedlicher Frequenz mit variabler Lautstärke vor. Bei der Bestimmung des Schallpegels, bei dem die Testperson den Ton einer bestimmten Frequenz gerade noch hört, stellt man erhebliche Unterschiede für die Hörschwelle bei hohen und tiefen Tönen fest. Die empfundene Lautstärke eines Schallereignisses hängt nicht nur von der Größe des Schalldrucks, sondern auch stark von der Frequenz des jeweiligen Tons ab.

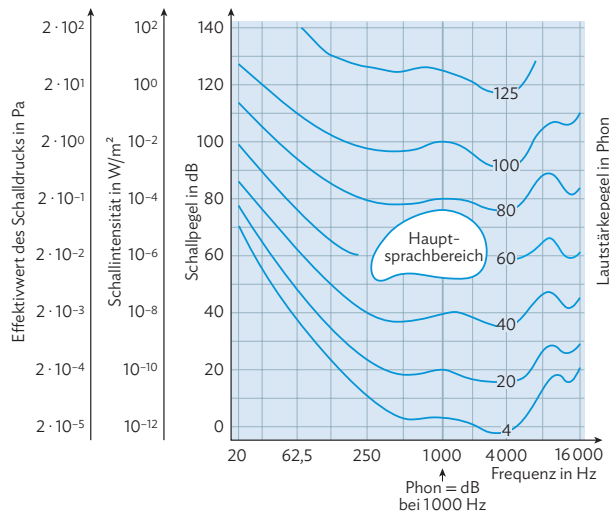


B5 | Hörtest

4.2 Die Lautstärke und ihre Messung



Die Frequenz ist so aufgetragen, dass sich ihr Wert mit jedem Kästchen verdoppelt.



B6 Hörfläche mit Kurven gleicher Lautstärkeempfindung

Das Ergebnis eines Hörtests wird in der Hörkurve festgehalten. Die untere Kurve in B6 zeigt für jede Frequenz, wie groß der Schallpegel eines Messtons sein muss, damit eine durchschnittliche Testperson den Ton gerade noch wahrnehmen kann. Ein junger Mensch mit gesundem Gehör kann aber durchaus auch Töne der Frequenz 1 kHz hören, deren Schalldruck kleiner als $20 \mu Pa$ ist. In diesem Fall erhält man für den Schalldruckpegel L_p einen negativen Wert.

Am empfindlichsten ist unser Ohr für Töne im Frequenzbereich von 200 Hz bis 4 kHz. Dies ist gerade der Bereich, der für unsere sprachliche Kommunikation am wichtigsten ist. Er umfasst die Hauptfrequenzen der Konsonanten und der Obertöne der Vokale. Im Gegensatz dazu muss der Schallpegel sehr tiefer und sehr hoher Töne um bis zu 60 dB größer sein, damit sie überhaupt wahrgenommen werden.

Soll bei einem Hörtest die Probandin oder der Proband alle Töne gleichlaut, d. h. „isophon“, empfinden, so muss der Schallpegel frequenzabhängig angepasst werden. Durch Befragung vieler Testpersonen kann man Linien gleicher Lautstärkeempfindung (Isophone) statistisch ermitteln. Der aus vielen Versuchen ermittelte Durchschnittswert solcher Isophonen ist in B6 ebenfalls dargestellt.

In dem Koordinatensystem von B6 lassen sich jedem Ton die physikalischen Größen Frequenz und Schallpegel zuordnen. Je nachdem, auf welcher Isophone der Ton liegt, lässt sich jetzt auch die Hörempfindung als physiologische (d. h. an unsere Sinneswahrnehmung angepasste) Größe beschreiben. Dazu misst man die Lautstärke in der Einheit „Phon“ und legt fest: Für einen Sinuston der Frequenz 1000 Hz stimmen die Einheiten Phon und Dezibel überein.

Bei der Beurteilung der Lautstärkeempfindung tritt aber eine weitere Schwierigkeit auf: In Kapitel 4.1 wurde dargestellt, dass sich ein natürlicher Ton bzw. ein Klang aus einer großen Anzahl einzelner Sinusschwingungen zusammensetzt. Die bisherige Betrachtung bezieht sich aber nur auf Töne mit fester Frequenz. Eine Quantifizierung der empfundenen Lautstärke eines natürlichen Schallereignisses in Phon ist daher nicht sinnvoll.

Arbeitsaufträge

- 1) Stellen Sie die Größen der Analogiebetrachtung zur Schallintensität und Niederschlagsintensität tabellarisch gegenüber und erläutern Sie die Bedeutung der meteorologischen Angabe: „8mm Niederschlag pro Stunde“.
- 2) Erläutern Sie den Unterschied der beiden Geschwindigkeiten v und c , die in der Formel $I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v^2$ für die Schallintensität vorkommen.
- 3) In einem Schulatlas werden Städte unterschiedlicher Größe mit verschiedenen Symbolen gekennzeichnet.
 - a) Geben Sie die Intervalle der Einwohnerzahlen an, die dabei in einer konkreten Einteilung zusammengefasst werden. Erörtern Sie die Sinnhaftigkeit dieser Einteilung.
 - b) Geben Sie weitere Beispiele für Größen an, bei denen eine nichtlineare Einteilung sinnvoll ist, und begründen Sie diese.
- 4) a) Erläutern Sie, dass zur Messung von Schalleignissen die physikalische Größe „Schallpegel“ eingeführt wurde.
 b) Ein Staubsauger in 1,0m Entfernung erzeugt einen Schallpegel von 70 dB. Berechnen Sie den Schallpegel zweier solcher Staubsauger in 1,0m Entfernung.
 c) Berechnen Sie die Intensität und den Schalldruck eines Geräuschs mit Schallpegel $L = -0,45$ dB.
- 5) Brüllaffen gehören zu den lautesten Lebewesen. Ein Brüllaffe schreit mit 100 dB.
 - a) Berechnen Sie das Verhältnis zwischen der Schallintensität eines Brüllaffen und der Hörschwelle des Menschen.
 - b) Berechnen Sie dieses Verhältnis bei einer Herde von sechs Brüllaffen und bestimmen Sie den Schallpegel der gesamten Herde.
 - c) Ein Marktschreier („Wurst-Achim“) bringt es auf 110,2 dB. Schätzen Sie die Anzahl der Brüllaffen ab, die nötig sind, um ihn zu übertönen.
- 6) a) Suchen Sie nach Programmen, die eine Lautstärkemessung mit dem Handy ermöglichen.
 b) Begründen Sie, dass für sinnvolle Messungen eine Kalibration nötig ist. Erläutern Sie die Bedeutung dieses Wortes und recherchieren Sie die konkrete Durchführung für das von Ihnen gewählte Programm.
 c) Messen Sie mit dem kalibrierten Programm verschiedene Schallquellen in Ihrer Umgebung aus und beurteilen Sie mögliche Gesundheitsgefährdungen. Beschreiben Sie Konsequenzen, die sich daraus für Ihren Umgang mit diesen Schallquellen ergeben.
- 7) Mobile Geräte (z. B. Smartphones), die über Kopfhörer auch zum Musikhören verwendet werden, müssen laut einer EU-Richtlinie aus Gehörschutzgründen auf 85 dB begrenzt sein.
 - a) Die Leistung eines Ohrhörers beträgt 50 mW. Nehmen Sie an, dass er gleichmäßig eine Halbkugel mit Radius 2 cm „beschallt“ (Abstand zum Trommelfell). Entscheiden Sie damit, ob er der genannten Richtlinie entspricht.
 - b) Berechnen Sie die maximale Leistung des Ohrhörers, um unter den Bedingungen aus a) die EU-Richtlinie nicht zu verletzen.
 - c) Bewerten Sie, ob der Einsatz von Ohrhörern, die außerhalb der EU verkauft werden, für Sie in Frage kommt.



- 8) Lärm im Beruf ist ein wichtiges Thema, da an vielen Arbeitsplätzen hohe Lärmpegel auftreten, die die Gesundheit und das Wohlbefinden der Arbeitnehmer beeinträchtigen können. Erstellen Sie eine Präsentation zum Thema „Lärmschutz am Arbeitsplatz“. Erläutern Sie dabei auch die Begriffe „aurale und extra-aurale Lärmquellen“.





5

EVA: Ohr und Gehör

Fahrplan für dieses Kapitel

Überblick

Dieses Kapitel widmet sich dem Hörvorgang im Ohr als Anwendung der Akustik. Ziel des eigenverantwortlichen Arbeitens (EVA) ist es, dass Sie sich einen Teilbereich der Theorie innerhalb einer Arbeitsgruppe anhand vorgegebener Materialien erarbeiten, dabei auch selbst nach geeigneten Materialien recherchieren und Ihre Ergebnisse präsentieren.

Bearbeiten Sie zunächst die folgenden Methodenseiten, die Ihnen die notwendigen Grundlagen zu der Bearbeitung der Materialien der jeweiligen Gruppe vermittelt.

Kapitel 5.1: Funktion des Außenohrs

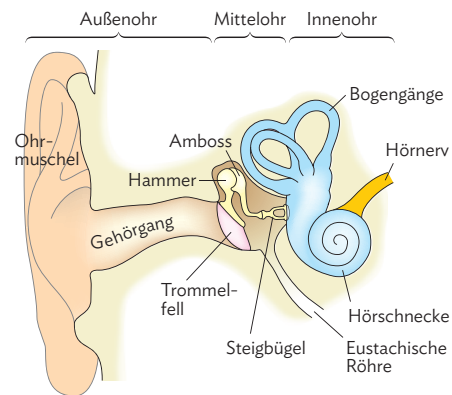
Das Außenohr hat neben der Leitung des Schalls durch den Gehörgang an das Trommelfell zwei weitere wichtige Aufgaben zu erfüllen: die Lokalisierung von Schallquellen und die Verstärkung bestimmter Frequenzen.

In zwei Arbeitsgruppen (entsprechend M1 und M2) widmen Sie sich diesen Themen, recherchieren eigenständig und bearbeiten jeweils den Arbeitsauftrag 1 oder 2. Im Anschluss bilden Sie jeweils Paare aus den beiden Arbeitsgruppen, führen in Partnerarbeit eine Ergebnissicherung durch und bearbeiten den abschließenden Arbeitsauftrag für die Partnerarbeit auf S. 92.

Kapitel 5.2: Aufbau und Funktion des Innenohrs

Im Innenohr findet die eigentliche Umsetzung der Schallwellen in Nervenpulse statt. Dabei werden sowohl Informationen über die Tonhöhe, d. h. die Frequenz, als auch über die Lautstärke, d. h. die Amplitude, gewonnen. Zuvor wurde im Mittelohr die Schallwelle vom Medium Luft auf das Medium Flüssigkeit übertragen; dabei wurde der Schalldruck mechanisch deutlich verstärkt.

Auch diesen Abschnitt erschließen Sie sich in zwei Arbeitsgruppen (entsprechend M3 und M4). Um die Wirkungsweise des Innenohrs verstehen zu können, machen sich beide Arbeitsgruppen zunächst mit dem Aufbau des Innenohrs vertraut (M1) und werten ein mechanisches Analogieexperiment aus (M2). Im Anschluss an die Arbeit mit M3 bzw. M4 bilden Sie wieder Paare aus den beiden Gruppen und erstellen eine gemeinsame Präsentation mithilfe selbst gewählter, auch digitaler Medien. Achten Sie dabei auch auf ästhetische Gestaltungskriterien.



Aufbau des menschlichen Ohrs

Methode**Gruppenarbeit organisieren**

Eine gelingende Gruppenarbeit funktioniert nach folgenden Regeln (nach H. Meyer):

- Sie sind erstens *für sich* und zweitens *für Ihre Gruppe* verantwortlich.
- Wenn Sie etwas stört, sagen Sie es den anderen Gruppenmitgliedern deutlich und verständlich.
- *Verstecken Sie sich nicht hinter anderen.* Wenn Sie etwas wollen, sagen Sie deutlich: „Ich will das so, weil ...“ Achten Sie auf die Argumente der anderen und beziehen Sie sich in Ihren Begründungen darauf.
- *Bestimmen Sie eine Gruppenleitung.* Sie ist für Absprachen mit der Lehrkraft und mit den anderen Gruppen zuständig. Sie achtet darauf, dass die Arbeitsplanung eingehalten und dass gemeinsame Arbeiten gerecht verteilt werden.
- *Achten Sie auf die Zeit.* Wenn Sie nicht bis zum abgesprochenen Zeitpunkt fertig werden, melden Sie dies der Lehrkraft rechtzeitig.
- Jede Gruppe muss dafür sorgen, dass die *Arbeitsergebnisse festgehalten* werden. Wenn im Arbeitsauftrag nichts anderes festgelegt worden ist, können Sie sich selbst aussuchen, wie Sie die Arbeitsergebnisse festhalten (vgl. Methode: Produkte für Präsentationen).

Methode**Quellen suchen**

In der wissenschaftlichen Praxis sind ausschließlich *Texte* und *Abbildungen* als *Quellen* zugelassen. Wie finden Sie zuverlässige Quellen zu physikalischen Themen?

- Achten Sie bei Quellen im Internet darauf, dass die Seiten von ausgewiesenen *Bildungsorganisationen* sind, etwa öffentlichen Einrichtungen, *Fachzeitschriften* oder redaktionell betreuten *Bildungsportalen* wie „LEIFphysik.de“ oder „weltderphysik.de“. Ein Blick ins Impressum der Seite hilft Ihnen bei der Einordnung.
- *Wissenschaftliche Suchmaschinen* wie „scholar.google.com“ oder „tib.eu“ helfen Ihnen, wissenschaftliche Bücher oder Zeitschriftenartikel zu finden. Manche von ihnen sind frei verfügbar, manche erhalten Sie nur über eine Bibliothek.
- Sehen Sie sich mindestens *eine weitere zuverlässige Quelle* zu dem Thema an. Decken sich die Informationen mit Ihrer ersten Quelle? Falls nicht, müssen Sie noch einmal genauer recherchieren.
- Achten Sie darauf, dass Ihre *Quellen nicht zu alt* sind und somit eventuell nicht den aktuellen Stand der Forschung widerspiegeln.

Methode**Texte erschließen**

Die wichtigste Quelle in der EVA-Zeit sind Sachtexte. Um einen Sachtext besser zu verstehen, können Sie dieses Fünf-Phasen-Schema anwenden:

1. Orientieren Sie sich im Text

- Suchen Sie das Thema.
- Machen Sie sich mit den Abbildungen vertraut.
- Überfliegen Sie den Text („skimming“ – sich einen Überblick über den Text verschaffen).
- Trennen Sie offensichtliche Sinnabschnitte mit einem Strich voneinander.

2. Suchen Sie „Verstehensinseln“ im Text

- „Verstehensinseln“ sind die Teile eines Textes, die Sie verstehen und von denen die Erschließung ausgeht. Beginnen Sie von hier aus.
- Markieren Sie alle Fachnomen, Fachverben und Adjektive/Adverbien farblich.

3. Erschließen Sie den Text abschnittsweise

- Erstellen Sie ein Begriffsnetz (Concept Map), indem Sie die Nomen aufschreiben und mit Pfeilen verbinden. Die Beschriftung der Pfeile orientiert sich an den Verben und Adjektiven.
- Setzen Sie die Verstehensinseln zueinander in Beziehung. Gehen Sie hier gründlich vor!

4. Suchen Sie den roten Faden

- Lesen Sie den Text noch einmal und verbinden Sie die Sinnabschnitte geistig miteinander.
- Fassen Sie den Text kompakt zusammen.

5. Reflektieren Sie abschließend

- Ordnen Sie den Sinn des Texts für sich neu.
- Überprüfen Sie, was Sie verstanden haben.
- Notieren Sie offene Fragen.

Methode

Quellen angeben

Sie müssen stets die Quellen angeben, die Sie für Ihre Arbeit verwenden. Damit belegen Sie Ihre Aussagen und machen sie nachprüfbar.

- Bei Büchern wird dabei mindestens der Name der Autoren, das Erscheinungsjahr, der Titel und der Verlagsort und die einzelne Seite angegeben. Beispiel:
Quelle: Hanslmeier, A. (2020), Einführung in Astronomie und Astrophysik, Berlin, S. 129
- Internetseiten zitiert man mit dem Namen der Autoren (oder Herausgebern, Institution, Stiftung, Website, ...), Titel der Quelle, Abrufdatum und URL. Beispiel:
Quelle: LEIFPhysik, Grundwissen Reversible und Irreversible Vorgänge, zuletzt aufgerufen am 02.05.2023, <https://www.leifphysik.de/uebergreifend/energieentwertung/grundwissen/reversible-und-irreversible-vorgaenge>
- Zeitschriftenartikel werden – auch, wenn Sie sie online abgerufen haben – angegeben mit Name, Erscheinungsjahr, Titel, Zeitschriftennamen, Jahrgang (Heftnummer), Seitenzahl. Beispiel:
Quelle: Janssen, M., Renn, J. (2015), Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie, Spektrum der Wissenschaft, 15(10), S. 48-55

Methode

Produkte für Präsentationen erstellen

Machen Sie sich vor dem Erstellen einer Präsentation klar, an wen Sie sich damit wenden möchten. Richten Sie die Präsentation an dieser Zielgruppe aus. So z. B. unterscheidet sich eine Präsentation für Experten eines Fachs deutlich von einer für Laien, die Sie für das Thema begeistern wollen.



Beantworten Sie im Vorfeld z. B. folgende Fragen:

- Wie alt ist die Zielgruppe? Das ist z. B. dafür wichtig, wie Sie die Informationen visualisieren (vgl. auch Methode auf S. 87).
- Welches Vorwissen hat die Zielgruppe? Ggf. müssten Sie zu Beginn der Präsentation zunächst einige Grundlagen erklären.
- Welche Interessen hat die Zielgruppe? Das kann dabei helfen, die Zielgruppe stärker für das Thema zu begeistern.
- Welche Erwartungen hat die Zielgruppe an Ihre Darstellung? (Erweiterung des Wissens, Einholen eines Ratschlags, Überblick erhalten, ...)

Zentrale Elemente einer Präsentation sind eine *klare inhaltliche Struktur* sowie *Visualisierungen und Abbildungen*, die von erklärenden Stichpunkten oder Textbausteinen begleitet werden. Dabei müssen alle verwendeten *Quellen angegeben* werden.

- **Klassisches Plakat:** Auf einem DIN-A2- oder DIN-A1-Karton können Sie Ihre Ergebnisse darstellen, zum Beispiel auch als zweidimensionale Mindmap oder Concept Map. Ein Poster muss selbsterklärend sein, das heißt, die Inhalte müs-

sen sich alleine durch das Lesen der Texte und Betrachten der Abbildungen erschließen lassen.

- **Flyer (Faltprospekt):** Ein Flyer erfüllt zwei Funktionen: Zum einen können die Inhalte ansprechend und übersichtlich aufbereitet werden. Zum anderen erhalten Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler ein Produkt, das sie als Sicherung mitnehmen können. Eine Form des Flyers sind Minibooks (vgl. Mediencode), die digital erstellt, ausgedruckt und so gefaltet werden, dass ein kleines Buch entsteht.  [MC 67055-15](#)
- **Digitale Pinnwand:** Eine Variante zum klassischen Plakat sind digitale Arbeitsflächen, auf denen Sie kollaborativ arbeiten, aber auch Ihre Informationen entsprechend aufbereiten können (Beispiele siehe Mediencode). Es gelten die gleichen Gestaltungsprinzipien wie  [MC 67055-16](#) beim klassischen Poster.
- **Erklärvideo:** In einem Erklärvideo können Sie Ihre Inhalte multimedial präsentieren. Grundlage kann eine klassische Folienpräsentation sein, deren Folien einzeln mit einem Audiokommentar besprochen und anschließend als Video exportiert werden. Eine Alternative sind Erklärvideos, die mit der Legetechnik erstellt werden. Beim Sprechen ist vor allem darauf zu achten, dass die Intonation und Modulation der Stimme abwechslungsreich und anregend sind.

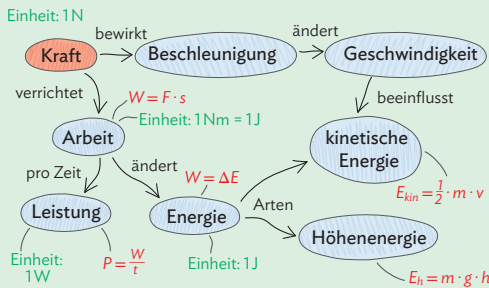
Methode

Informationen visualisieren

Visualisierungen dienen dazu, Informationen leichter erfassbar zu machen. Einen Text oder einen Zusammenhang zu visualisieren, ist eine große Hilfe für das eigene Verständnis und für Präsentationen unerlässlich.

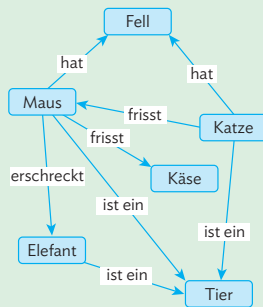
Mindmap

Fachinhalte werden hierarchisch gegliedert. Diese Darstellung eignet sich sehr gut für Kategorisierungen. Sie ermöglicht einen schnellen Überblick.



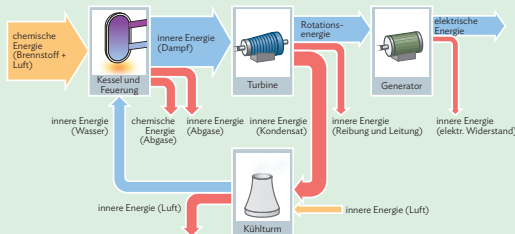
Conceptmap (Begriffsnetz)

Fachnamen werden durch beschriftete Pfeile miteinander verbunden, die die Beziehung zwischen den Begriffen ausdrücken. Diese Darstellung eignet sich, um wechselseitige und komplexe Beziehungen zum Ausdruck zu bringen.



Flussdiagramm

Auch hier werden Fachbegriffe mit Pfeilen verbunden. Es stehen Wirkrichtungen, Gabelungen durch Entscheidungen oder Prozesse im Vordergrund. Diese Darstellung eignet sich, um Abläufe, Wirkrichtungen und Varianten zu veranschaulichen.



Video/Animationen

Mit Videos oder Animationen lassen sich insbesondere Prozesse veranschaulichen, die nichtstatisch sind. Dieses Mittel ist allerdings nur digitalen Visualisierungen vorbehalten.

Diagramm

Ein Kurvendiagramm zeigt den qualitativen oder quantitativen Zusammenhang zwischen zwei Größen auf Balken-, Säulen- oder Tortendiagramme veranschaulichen Zahlen oder Verhältnisse.

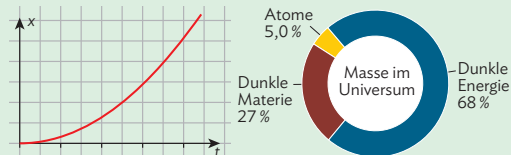
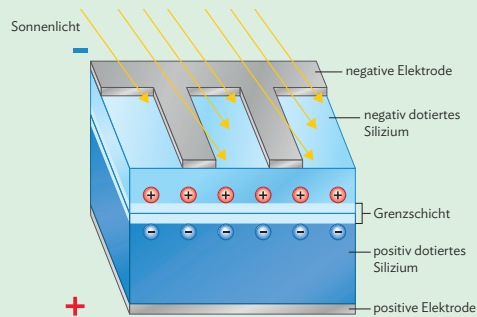


Illustration (Schaubild)

Ein Schema ist eine bildliche Vereinfachung von realen Gegenständen, kann aber auch Elemente enthalten, die in der Realität nicht sichtbar sind. In einer Illustration findet sich nur, was wichtig für das Verstehen ist. Die Kunst ist es, geeignete Reduktionen vorzunehmen. Beschriftungen sollten sich immer in unmittelbarer Nähe der bezeichneten Elemente befinden.



Foto

Natürlich ist auch das Foto eines Gegenstands oder eines Vorgangs eine Visualisierung.



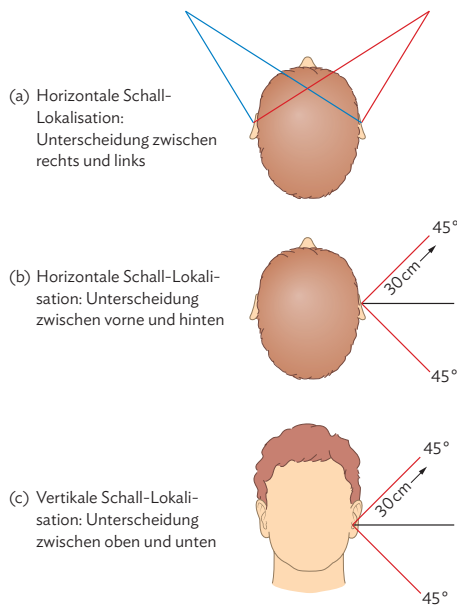
5.1 Funktion des Außenohrs

► M1: Möglichkeiten zum Richtungshören

Für die Information, ob der Schall von rechts oder links kommt, werden beim Menschen die Unterschiede der akustischen Signale im rechten und linken Ohr ausgewertet (B1a). Abhängig von der Position der Schallquelle sind folgende Effekte denkbar:

- Die Laufzeiten von der Schallquelle bis zum rechten bzw. linken Ohr unterscheiden sich (Interaural Time Difference, ITD).
- Die wahrgenommenen Lautstärken unterscheiden sich, hervorgerufen durch akustischen Schatten und geometrische Abschwächung, zwischen rechtem und linkem Ohr (Interaural Level Difference, ILD).

Für die Information, ob der Schall von vorne oder hinten (horizontale Schall-Lokalisation, B1b) bzw. von oben oder unten (vertikale Schall-Lokalisation, B1c) kommt, werden außerdem Frequenzveränderungen des Schalls durch die Form der Ohrmuschel ausgewertet.



B1 | Formen der Schall-Lokalisation

Die Funktionsweise der Ohrmuschel bei der Schallquellenlokalisierung beruht auf Reflexion, Beugung und Interferenz (Kap. 4.1). Der auf die Ohrmuschel treffende Schall wird – je nach Frequenz – von den knorpeligen Windungen der Ohrmuschel unterschiedlich stark gebeugt bzw. reflektiert und in den

Arbeitsauftrag 1

a) Erstellen Sie eine Übersicht zu den im Text erläuterten Hypthesen zur Funktion des Richtungshörens.

b) Verbinden Sie einen ca. 1 m langen

✓ Schlauch mit zwei Trichtern und markieren Sie die Schlauchmitte. Stülpen Sie dann diese Vorrichtung über die beiden Ohren der Versuchsperson (siehe Abbildung). Der Partner der Testperson klopft nun mit einem Stift oder dem Finger auf den Schlauch, wobei er bei jeder Wiederholung die Seite zur Schlauchmitte variiert und den Abstand zur Mittenmarkierung verringert. Die Testperson gibt jedes Mal an, auf welcher Seite sie das Klopfen hört. Die Seite und der Abstand des Klopfens zur Mittenmarkierung sowie die Aussage der Testperson werden protokolliert. Leiten Sie aus Ihren Messdaten ab, bis zu welchem Abstand zur Schlauchmitte die Testperson die richtige Seite des Klopfens zuverlässig zuordnen kann.



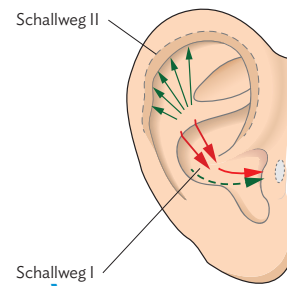
c) Das menschliche Gehör kann Laufzeitunterschiede bis zu $10 \mu\text{s}$ unterscheiden. Prüfen Sie durch Rechnung, ob Ihre Ergebnisse aus b) mit diesem Wert erklärbar sind.

d) Ob ITD oder ILD den stärkeren Beitrag zum Richtungshören leistet, ist frequenzabhängig. Recherchieren Sie dazu im Internet.

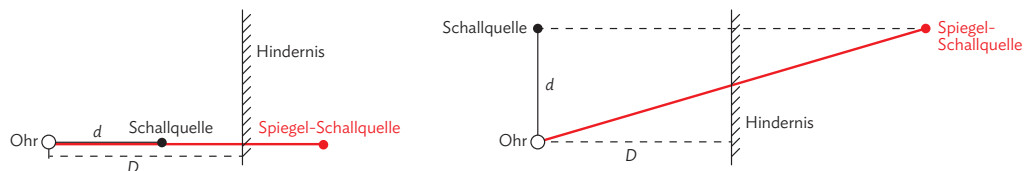
e) Beurteilen Sie, ob Interferenzeffekte an der Ohrmuschel tatsächlich zum Richtungshören beitragen können. Vergleichen Sie dazu die erreichbaren Wegunterschiede mit den maßgeblichen Wellenlängen.

f) Berechnen Sie für die beiden Situationen in B3 jeweils den Wegunterschied sowie die Wellenlängen und Frequenzen, bei denen ein Interferenzmaximum auftritt. Daten: $D = 5,0 \text{ m}$, $d = 3,0 \text{ m}$

Gehörgang geleitet. Hohe Frequenzen werden besser reflektiert, während tiefere Frequenzen stärker gebeugt werden. Dadurch nimmt Schall unterschiedlicher Frequenz im Außenohr einen anderen Weg, obwohl der Schall auf die gleiche Stelle auftrifft. Als Folge kommt es zu frequenzabhängigen Laufzeitunterschieden (B2). Im Gehörgang interferieren diese Schallwellen, was zu einer Veränderung des Klangspektrums führt. Je nach der Position, an der der Schall im Außenohr auftrifft, ist dieser Effekt stärker oder schwächer ausgeprägt. Das Außenohr wirkt also wie ein Filtersystem, welches je nach Richtung einem Geräusch eine andere Klangfärbung verleiht. Schallquellen kommen nie isoliert im Raum vor. Es gibt immer Gegenstände, die den Schall reflektieren. Somit können im Ohr auch direkt einfallende und reflektierte Schallanteile interferieren. B3 zeigt dies für eine Schallquelle, die immer gleich weit vom Ohr entfernt ist, sich aber in unterschiedlichen Richtungen befindet. Für die Interferenz ist der Wegunterschied zwischen den beiden Anteilen entscheidend. Er lässt sich leichter durch Betrachtung einer „Spiegelschallquelle“ (Kap. 4.1) bestimmen. Je nach Richtung ergeben sich ein anderer Wegunterschied und damit auch andere Wellenlängen, für die ein Interferenzmaximum vorliegt.



B2 \ Entstehung frequenzabhängiger Laufzeitunterschiede



B3 \ Superposition von direkt einfallenden und reflektierten Schallanteilen

Arbeitsauftrag 2

- a) Für das folgende Experiment benötigen Sie: 4 kleine Kugeln aus Plastilin, Knetmasse oder Ohrstöpsel, 24 Spielkarten, davon 12 schwarze und 12 rote (ein Skatblatt ohne 7 und 8), Rassel oder kleine Dose mit etwa 20 Reiskörnern, Augenbinde, Uhr mit Sekundenzeiger.

Durchführung:

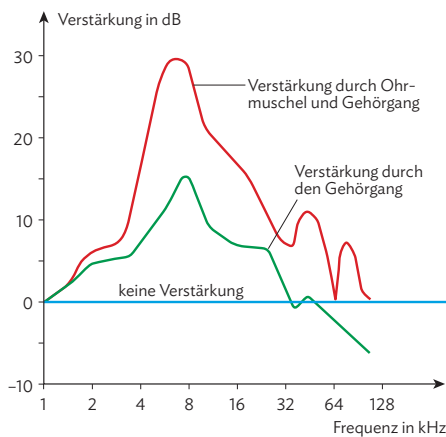
- Jeweils vier Personen bilden eine Versuchsgruppe. Ein Gruppenmitglied nimmt als Versuchsperson auf einem Stuhl Platz. Der Versuchsperson werden die Augen verbunden.
 - Die zweite Person mischt die Karten und deckt für jeden von 24 Einzeltests (für jede Karte einen) im 5-Sekunden-Takt eine Karte auf. Je nach Versuchsvariante bedeutet eine rote Karte oben oder vorne. Eine schwarze Karte steht entsprechend für unten oder hinten.
 - Die dritte Person rasselt kurz zweimal hintereinander etwa 30 cm vom rechten Ohr entfernt. Für die vertikale Schall-Lokalisation wird das Geräusch im Winkel von etwa 45° über bzw. unter der geraden Hörachse erzeugt (B1c), für die horizontale Schall-Lokalisation vor bzw. hinter der Geraden (B1b). Der Ortswechsel der Schallquelle zwischen zwei Tests sollte möglichst geräuschlos erfolgen.
 - Eine Protokollantin oder ein Protokollant notiert jeweils den Ort des Schallereignisses und die Angabe der Versuchsperson, wo sie das Geräusch gehört hat.
- b) Wenn der Stapel Karten verbraucht ist, folgt ein zweiter Durchgang mit neu gemischten Karten. Diesmal bekommt die Versuchsperson in beide Ohren an die in der Abbildung dargestellten Stellen (1) und (2) Plastilin oder Ohrstöpsel.
- c) Werten Sie Ihre Daten aus und formulieren Sie ein Ergebnis.



5.1 Funktion des Außenohrs

M2: Das Außenohr als selektiver Frequenzfilter

Bei manchen Tierarten werden die Geräusche von Beutetieren durch das Außenohr verstärkt. Diese Verstärkung ist allerdings je nach Frequenz unterschiedlich und wird unter anderem auch durch die Form der Ohrmuscheln der Jäger bestimmt. In B4 ist der Verstärkungseffekt durch die Ohrmuschel bzw. den Gehörgang für die australische Gespenstfledermaus (*Macroderma gigas*) dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Verstärkung im Bereich zwischen 4 kHz und 30 kHz. Dies entspricht genau dem Frequenzbereich von typischen Raschelgeräuschen, die von Beutetieren der Fledermaus erzeugt werden.



B4 Verstärkung bestimmter Frequenzen durch Ohrmuschel und Gehörgang

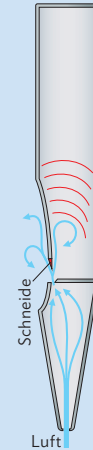
Die Verstärkung einzelner Frequenzen beruht auf Beugung und Interferenz von Schallwellen. Zusätzlich führen hier aber auch Resonanzeffekte (Kap. 5.2) zu einer Verstärkung bestimmter Frequenzen, denn die verschiedenen Eigenfrequenzen der schalleitenden Elemente des Außenohrs wirken ebenfalls frequenzselektiv. So wird z.B. beim Menschen im Gehörgang eine Resonanz bei ungefähr 3,3 kHz angeregt, die genau im Frequenzbereich der menschlichen Stimme liegt. Dort besitzt unser Ohr zudem die größte Empfindlichkeit (B6 auf S. 82).

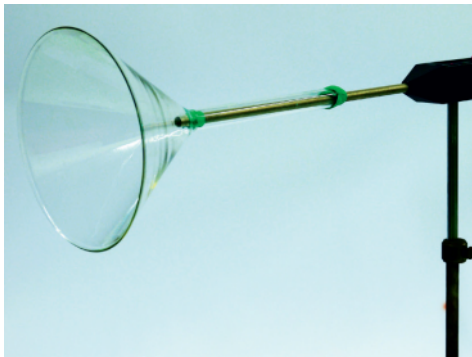
Der Einfluss der Ohrmuschel und des Gehörgangs auf die Klangfärbung eines Geräusches ist also bei der Verstärkung bestimmter Frequenzen bedeutsam. Er kann experimentell mit einem Trichter, einem Mikrophon und entsprechender Software zur Frequenzanalyse simuliert werden (B5).

Im Frequenzspektrum eines Geräusches ohne und mit auf dem Mikrophon aufgesetztem Trichter erkennt man deutlich eine Verstärkung des Schalldruckpegels bei hohen Frequenzen (B6). Der Trichter, der die Ohrmuschel simuliert, verändert also das Klangspektrum des Geräusches.

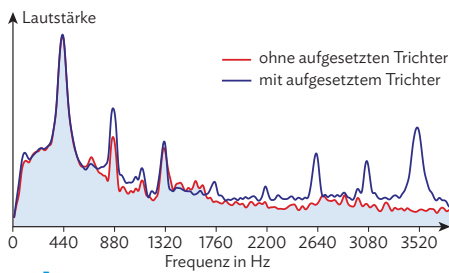
Arbeitsauftrag 1

- Beurteilen Sie, ob die Betrachtungen bei der Fledermaus ohne Weiteres auf den Menschen übertragbar sind. Gehen Sie dabei insbesondere auf die zugrunde liegenden Frequenz- bzw. Wellenlängenbereiche ein.
- Viele Orgelpfeifen erzeugen den Ton, indem ein Luftstrom auf eine Schneide geleitet wird. Die dort entstehenden Luftwirbel regen die Luftsäule im Inneren der Pfeife periodisch an. Die resultierende stehende Welle besitzt in der Regel nur einen Knoten (vgl. Wiederholungskasten auf S. 217 „Beugung und Interferenz von Wellen“). Begründen Sie damit den Zusammenhang zwischen der Länge l der Orgelpfeife und der Wellenlänge λ der stehenden Welle: $l = \frac{\lambda}{4}$.
- In einem einfachen Modell wird der Gehörgang als Röhre der Länge 2,5 cm betrachtet. Er ist an einer Seite offen und an der anderen Seite durch das Trommelfell abgeschlossen, entspricht also der abgebildeten Orgelpfeife. Berechnen Sie die Frequenz der stehenden Welle im Gehörgang; verwenden Sie dabei den Zusammenhang zwischen λ und f sowie die Schallgeschwindigkeit $c = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Angabe im nebenstehenden Text.



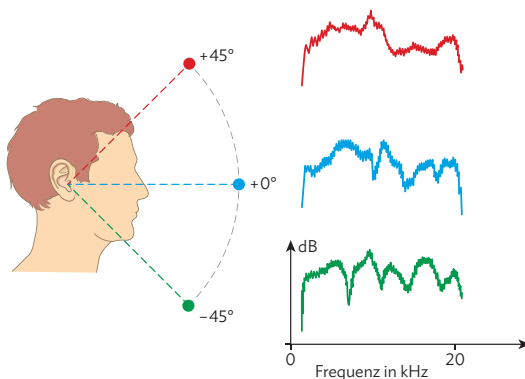


B5 Simulationsexperiment zum Einfluss des Außenohrs auf die Klangfärbung eines Geräusches



B6 Frequenzanalyse eines Geräusches ohne und mit auf dem Mikrofon aufgesetztem Trichter

Die selektive Verstärkung bzw. Abschwächung bestimmter Frequenzen kann auch zum Richtungshören beitragen. Abhängig von der Position der Schallquelle in der vertikalen Ebene verändern sich die Klangspektren auf charakteristische Weise. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die vertikale Position der Schallquelle (B7).



B7 Charakteristische Änderung des Klangspektrums abhängig von der vertikalen Position der Schallquelle

Arbeitsauftrag 2

- Führen Sie das folgende Experiment durch: Nehmen Sie mithilfe Ihres Smartphones das Frequenzspektrum eines gut reproduzierbaren Geräusches mit vielen unterschiedlichen Frequenzanteilen auf. Vergleichen Sie das Spektrum dieses Geräusches mit Spektren des gleichen Geräusches, wenn das Tonsignal durch einen Trichter oder eine zylinderförmige Rolle geleitet wird, bevor es auf das Smartphone trifft. Achten Sie darauf, dass das Schallsignal im Wesentlichen über den Trichter bzw. die Rolle an das Mikrofon gelangt. Suchen Sie dazu die Position des Mikrophons und dichten Sie die Anordnung eventuell mit etwas Knetgummi ab. Falls möglich, wiederholen Sie das Experiment mit einem Trichter anderer Größe und vergleichen Sie.
- Erstellen Sie eine Mindmap mit den wesentlichen Zusammenhängen und Begriffen im Kontext der Beugung und Interferenz. Gehen Sie dabei insbesondere auf den Gangunterschied, die Interferenzbedingungen für konstruktive und destruktive Interferenz, die Beugung und das Huygens'sche Prinzip ein.
- Erläutern Sie die Bedingungen, die die Wellenlänge des Schalls und die Abmessung von Hindernissen oder Strukturen erfüllen müssen, damit Beugung bzw. Interferenz beobachtbar sind.
- Führen Sie zur Überprüfung Ihrer Überlegungen aus Teilaufgabe c) folgendes Experiment durch: Erzeugen Sie mit zwei Smartphones über eine geeignete Tongenerator-App zwei Sinustöne gleicher Frequenz, z. B. 440 Hz. Platzieren Sie beide Smartphones im Abstand von 1,5 m voneinander und entfernen Sie sich etwas. Bewegen Sie sich vor den Smartphones und halten Sie sich dabei ein Ohr zu. Achten Sie auf Lautstärkeunterschiede. Wiederholen Sie das Experiment, wenn die Smartphones direkt nebeneinander liegen.



MC 67055-17

5.1 Funktion des Außenohrs

Abschließender Arbeitsauftrag für die Partnerarbeit

Bilden Sie jeweils Paare aus den beiden Arbeitsgruppen und arbeiten Sie gemeinsam.

Das Außenohr der Fledermaus

Die Ohren vieler Fledermausarten weisen eine Rillung auf. Die Abbildung unten zeigt ein stark vereinfachtes Modell der Ohrmuschel. Dabei wird der von der Fledermaus erzeugte und an der Beute reflektierte Ultraschall an den Rillen reflektiert und in Richtung Trommelfell geleitet. Rot markiert ist diejenige Wegstrecke, die für den Gangunterschied relevant ist. Zu beachten ist, dass im rechten Teil der Abbildung dieser Gangunterschied um die grüne Wegstrecke reduziert wird.

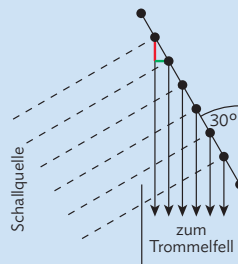
Berechnen Sie aus der Geometrie für beide Fällen den Gangunterschied zwischen Schallwellen, die an benachbarten Rillen gebeugt werden. Bestimmen Sie dann die Frequenzen im Bereich von 20 kHz bis 300 kHz, bei denen eine konstruktive bzw. destruktive Interferenz zu erwarten ist. Die Rillen haben einen Abstand von ca. 2,0 mm; die Formeln zum Doppelspalt gelten auch wie hier bei mehr Wellenzentren.

Skizzieren Sie qualitativ die am Trommelfell ankommenden Spektren bei senkrechtem und horizontalem Einfall im Vergleich. Gehen sie dabei davon aus, dass die Schallquelle alle Frequenzen im angegebenen Bereich gleichmäßig aussendet. Markieren Sie in den beiden Spektren zunächst die zuvor bestimmten Frequenzen, die verstärkt bzw. abgeschwächt werden.

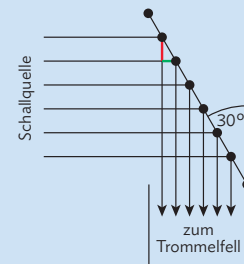
Erläutern Sie auf Basis ihrer Ergebnisse, wie die Fledermaus diese Interferenzen zur Lokalisation nutzt.



Ohren des Braunen Langohrs



links: senkrecht einfallender Schall,
rechts: horizontal einfallender Schall



Das Außenohr des Menschen

Berechnen Sie die maximalen Laufzeit- und Schallintensitätspegelunterschiede durch geometrische Abschwächung, die sich am linken und rechten Ohr ergeben. Verwenden Sie dabei folgende Informationen: Kopfbreite Mensch: 16 cm, Entfernung der Schallquelle vom rechten Ohr: 8,0 m.

Das menschliche Gehör kann Laufzeitunterschiede bis zu 10 μ s und (je nach Quelle) Pegelunterschiede von 0,3 dB bis 1,0 dB gerade noch wahrnehmen. Beurteilen Sie anhand ihrer obigen Ergebnisse, ob das menschliche Gehör in dieser Situation sowohl Laufzeit- als auch Pegelunterschiede auswerten kann. Bei hohen Tönen ergeben sich zusätzlich zu den Pegelunterschieden durch geometrische Abschwächung auch Pegelunterschiede durch den beugungsbedingten akustischen Schatten. Dieser Effekt tritt auf, sobald der Spalt oder das Hindernis kleiner als eine halbe Wellenlänge ist. Schätzen Sie auf Basis dieser Informationen ab, ab welcher Grenzfrequenz beim menschlichen Kopf ein akustischer Schatten auftritt.

Exkurs: Entfernungslokalisation und Echoortung

Um die Position einer Schallquelle zu bestimmen, sind nicht nur Informationen über die Richtung, sondern auch Informationen zur Entfernung der Schallquelle nötig. Diese Informationen können passiv (Lokalisation) oder aktiv (Ortung) erlangt werden.

Im Gegensatz zum Richtungshören werden zur Entfernungslokalisation die Signale vorwiegend mit erlernten Reizmustern verglichen. Daher funktioniert die Entfernungslokalisation nur bei bekannten Schallereignissen zuverlässig. Das Schallereignis wird unter anderem folgendermaßen verändert:

- Hohe Frequenzen werden stärker von der Luft absorbiert als tiefe.
- Tiefe Frequenzen werden an Hindernissen stärker gebeugt als hohe Frequenzen.
- Der Schallintensitätspegel nimmt mit der Entfernung ab.

Arbeitsauftrag

Überprüfen Sie diese Aussagen in Partnerarbeit experimentell. Sie benötigen zwei Smartphones. Partner 1 spielt mithilfe einer Tongenerator-App einen tiefen Ton mit fester Frequenz und Lautstärke ab. Partner 2 misst mithilfe einer App die Lautstärke (Schalldruckpegel) dieses Tons. Partner 2 entfernt sich nun von Partner 1 und misst dabei kontinuierlich den Schalldruckpegel. Partner 2 bleibt nun in einiger Entfernung zu Partner 1 stehen. Partner 1 erhöht nun schrittweise die Frequenz des Tones, während Partner 2 kontinuierlich den Schalldruckpegel misst. Der Versuch wird nun wiederholt. Dieses Mal wird die subjektive Lautstärkeempfindung von Partner 2 betrachtet. Vergleichen Sie die subjektiv wahrgenommenen Lautstärkeunterschiede mit ihren Messungen. Erklären Sie ihren Befund mithilfe der Hörkurve aus Kapitel 4.2. Partner 1 spielt mit der Tongenerator-App einen sehr tiefen Ton ab und stellt sich an eine Ecke. Partner 2 geht um die Ecke herum und stellt sich so hin, dass kein Sichtkontakt besteht. Partner 2 misst den Schalldruckpegel. Nun wird die Frequenz des Tones erhöht.

Da die Entfernungslokalisation nur bei bekannten Klangereignissen zuverlässig funktioniert, verwenden Tiere, die im Dunkeln jagen wie z. B. Fledermäuse (B8) und Zahnwale (B9), die Echoortung. Bei der Echoortung werden aktiv Schallwellen ausgesendet und anschließend die reflektierten Schallwellen ausgewertet. Somit ist sichergestellt, dass das ausgesendete Klangmuster bekannt ist und zuverlässig mit dem ankommenden Klangmuster verglichen werden kann. Zur Echoortung werden meist hochfrequente, oft im Ultraschall liegende Laute verwendet, da diese durch ihre kurze Wellenlänge auch von kleinen Objekten zurückgeworfen werden und eine höhere Auflösung ermöglichen. Zusätzlich kann auch der Zeitverzug zwischen dem ausgesendeten und reflektierten Signal bestimmt und damit die Entfernung ermittelt werden. Einige Aufmerksamkeit hat ein Video der blinden Mädchen Tatiana und Krista erlangt. Sie haben die Fähigkeit zur Echoortung erlernt, indem sie Geräusche aus ihrer Umgebung verwenden, um sich zu orientieren und ihre Umgebung wahrzunehmen. Diese Fähigkeit wird auch als menschliche Echoortung (human echolocation) bezeichnet und ist bei einigen blinden Menschen weltweit bekannt.



B8 | Fledermaus



B9 | Zahnwal

Arbeitsauftrag

Recherchieren Sie im Internet über die menschliche Echoortung. Beziehen Sie auch englischsprachige Quellen in Ihrer Recherche mit ein.

Versuchen Sie sich über Echoortung zu orientieren. Verwenden Sie eine geeignete App auf Ihrem Smartphone, die Ihnen ein Chirp-Geräusch bereitstellt. Schließen Sie die Augen und versuchen Sie, sich über Klang- und Lautstärkeveränderungen des Chirp-Geräusches zu orientieren. Am besten funktioniert dies, wenn die Pause zwischen den einzelnen Klangimpulsen sehr kurz ist. Ihr Partner hilft Ihnen, nicht über Hindernisse zu stolpern.

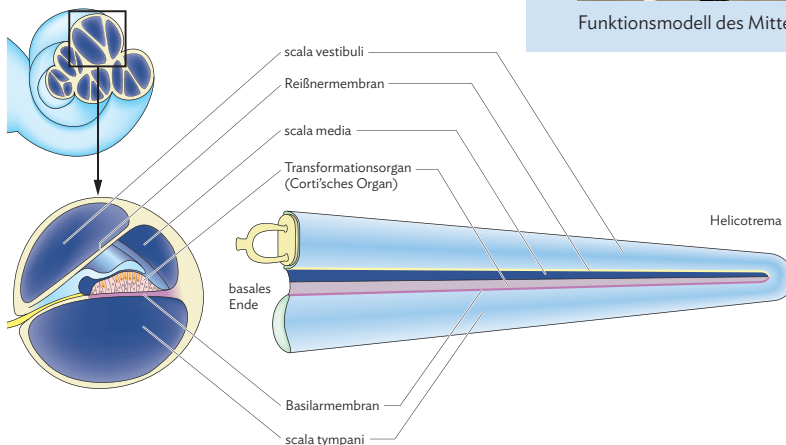


MC 67055-18

5.2 Aufbau und Funktion des Innenohrs

M1: Aufbau des Innenohrs

Das Innenohr schließt über das ovale Fenster an das Mittelohr an und besteht aus den Bogengängen, in denen das Gleichgewichtsorgan untergebracht ist, und aus der Hörschnecke (lateinisch: cochlea). In der Hörschnecke wird der eingehende Schall je nach Frequenz und Amplitude in elektrische Nervenimpulse umgewandelt. Sie werden über den Hörnerv ins Gehirn geleitet und dort zu einem Höreindruck verarbeitet. Ein Ausschnitt aus der Hörschnecke ist links in der Abbildung unten dargestellt, rechts sieht man die Hörschnecke aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit im ausgerollten Zustand. Man erkennt in der Abbildung drei Gänge. Der obere Gang (scala vestibuli) beginnt am ovalen Fenster und geht an der Spitze der Hörschnecke in den unteren Gang (scala tympani) über, welcher am runden Fenster der Hörschnecke endet. Der mittlere Gang (scala media) ist durch Membranen (unten: Basilarmembran; oben: Reißnermembran) von den anderen Gängen getrennt und beherbergt das Corti-Organ mit den Haarzellen, welche die mechanischen Schwingungen in elektrische Reize umwandeln. Drückt der Steigbügel das ovale Fenster nach innen, so bewegt sich die Flüssigkeit im oberen Gang Richtung Spitze der Gehörschnecke, kehrt dort beim Übergang in den unteren Gang die Richtung um, um an der Basis der Gehörschnecke das runde Fenster nach außen zu drücken.



B1 | Hörschnecke (links: senkrechter Schnitt durch den Schneckengang; rechts: „ausgerollter“ Zustand)

Arbeitsauftrag

- In der Biologiesammlung Ihrer Schule existiert ein plastisches Modell des Ohrs und/oder des Innenohrs. Fotografieren Sie dieses Modell, beschriften Sie das Foto mit den Fachbegriffen aus dem nebenstehenden Text und machen Sie dieses Dokument dem Kurs auf einer geeigneten digitalen Plattform zugänglich. Achten Sie beim Fotografieren auf günstige Perspektiven und Lichtverhältnisse.
- Die Abbildung unten zeigt ein Funktionsmodell des Mittel- und Innenohrs; der Mediacode verlinkt ein Video dazu, in dem sich unterschiedliche Bewegungsmuster im rechten orangenen Teil (dem Innenohr) erkennen lassen. Beschreiben Sie die Vereinfachungen, die in diesem Modell gemacht werden, indem Sie das Funktionsmodell mit dem biologischen Modell aus a) vergleichen. Erklären Sie, dass dennoch beide Modellarten ihre Berechtigung haben.



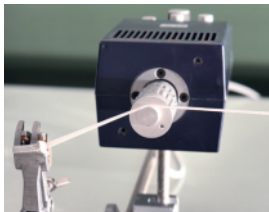
MC 67055-19



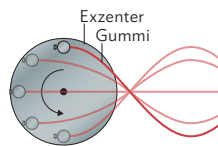
Funktionsmodell des Mittel- und Innenohrs

► M2: Mechanisches Analogieexperiment: Resonanz

In Kapitel 4.1 haben Sie verschiedene Schwingungsformen einer Geigensaiten betrachtet. Im Physiksaal lassen diese sich mit einem Gummiband demonstrieren, das quer durch den Raum gespannt ist und an einer Seite durch einen Motor mit Exzenter in Schwingungen versetzt wird. Nur bei bestimmten Drehzahlen des Motors entstehen stabile Schwingungsmuster wie in B3. Die Frequenzen des Motors, die zur Grund- und Oberschwingung gehören, heißen Eigenfrequenzen.



B2 Antrieb mit Exzenter



B3 Stehende Welle

Bei einem einfachen Federpendel ist die Eigenfrequenz diejenige, die sich bei einmaliger Anregung von außen ergibt. In der 11. Klasse haben Sie diese bereits untersucht; es gilt für diesen Fall: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D}{m}}$. Die Eigenfrequenz hängt von der Pendelmasse m und der Federhärte D ab.

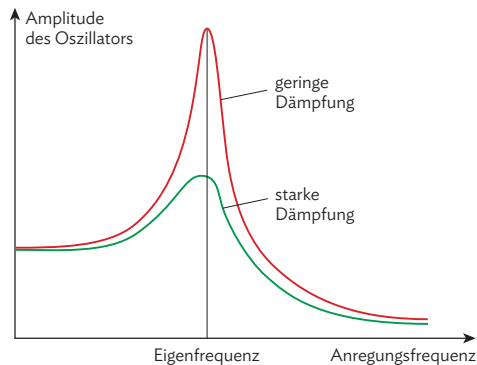
Regt man umgekehrt das Federpendel periodisch mit einer beliebigen Anregungsfrequenz f an, so schwingt es im Takt der Anregungsfrequenz. Jedoch ist die Amplitude dieser erzwungenen Schwingung je nach Anregungsfrequenz unterschiedlich. Sie ist am größten, wenn $f = f_0$ gilt (B4). Dieses Phänomen nennt man Resonanz.

Die Resonanzerscheinung ist umso ausgeprägter, je kleiner die Dämpfung des Oszillators ist. Unter Dämpfung versteht man einen hemmenden Einfluss wie z. B. den Luftwiderstand bei einem Pendel.

Resonanz kann nicht nur beim Federpendel, sondern bei allen schwingungsfähigen Systemen auftreten, weshalb z. B. sehr hohe Hochhäuser vor Resonanzschwingungen durch Windanregung geschützt werden („Dämpfungspendel“). Beim Innenohr wird Resonanz für das frequenzselektive Hören ausgenutzt.

Arbeitsauftrag

- Führen Sie das Experiment mit dem Gummiband selbst durch. Verändern Sie die Anregungsfrequenz durch den Motor so, dass Sie die Grundschwingung und möglichst viele Oberschwingungen erzeugen können.
- Der Exzenterantrieb (B2) kann auch verwendet werden, um ein einfaches Federpendel mit unterschiedlicher Frequenz anzutreiben. Führen Sie dieses Experiment durch und erstellen Sie ein Diagramm ähnlich wie im Text. Anstelle der Anregungsfrequenz können Sie nach rechts auch den Spannungswert am Motor auftragen.
- Beschreiben Sie die Extremfälle sehr kleiner und sehr großer Erregerfrequenz und demonstrieren Sie sie in einem geeigneten Freihandexperiment.
- Suchen Sie im Internet nach Filmen zum Stichwort „Tacoma Bridge“ und erklären Sie das dort sichtbare Phänomen.
- Sammeln und beschreiben Sie weitere Situationen, in denen Resonanz eine Rolle spielt.



B4 Resonanzkurven – Abhängigkeit der Schwingungsamplitude von der Anregungsfrequenz

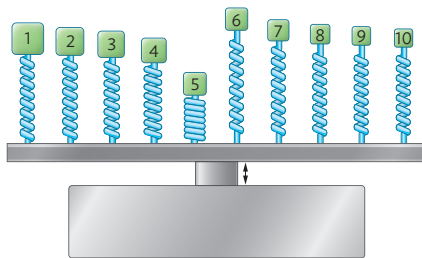
5.2 Aufbau und Funktion des Innenohrs

M3: Die Basilarmembran

Unser Ohr arbeitet sowohl frequenzselektiv als auch amplitudenselektiv, das heißt, wir können sowohl Tonhöhen als auch Lautstärken unterscheiden.

Text 1

Die Frequenzselektivität des Innenohrs lässt sich mit der Wanderwellentheorie erklären. Das Prinzip kann mit dem in B5 dargestellten Analogieexperiment veranschaulicht werden. Nur diejenigen Federpendel, deren Eigenfrequenzen nahe bei der Anregungsfrequenz des Kolbens liegen, schwingen stark, die anderen nehmen kaum Energie aus der Anregung auf. Man sagt, die Oszillatoren wirken frequenzselektiv.



B5 | Analogieexperiment zur Wanderwellentheorie

Im Fall des Innenohrs besteht das schwingungsfähige System nicht aus einzelnen Oszillatoren wie im Analogieexperiment, sondern aus der scala media mit der Basilarmembran und dem sich darauf befindlichen Corti-Organ (vgl. B1). Obwohl dieses ganze Gebilde schwingt, wird künftig vereinfachend nur von den Schwingungen und Eigenschaften der Basilarmembran die Rede sein.

Die von den Gehörknöchelchen im Mittelohr auf das ovale Fenster übertragenen Schwingungen lösen Flüssigkeitsbewegungen in der scala vestibuli und scala tympani aus, welche die Basilarmembran zu Schwingungen anregen. Schallwellen mit großen Frequenzen (hohe Töne) regen die Basilarmembran aufgrund von Resonanz an der Basis zu Schwingungen an, Wellen mit niedrigen Frequenzen (tiefe Töne) versetzen die Basilarmembran an der Spitze in Resonanzschwingungen (B6). Dies bedeutet, dass die Basilarmembran entlang ihrer Ausdehnung das Frequenzspektrum von Klängen und Geräuschen in ein „Ortsspektrum“ umwandelt, indem frequenzabhängig Sinneszellen an unterschiedlichen Orten der Membran angeregt werden. So ermöglicht die Ausnutzung von Resonanz frequenzselektives Hören.

Zum Verständnis der Wanderwellentheorie kann man sich die Basilarmembran als eine kontinuierliche Aneinanderreihung

Arbeitsauftrag

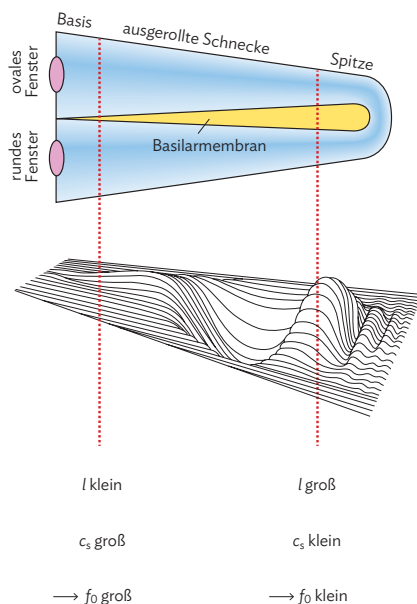
- Lesen Sie die nebenstehenden Texte und erschließen Sie sie sich nach der Methode auf S. 85. Klären Sie vorab unbekannte Wörter aus dem englischen Text.
- Mit sogenannten Zungenfrequenzmessern wurden früher Abweichungen der Frequenz im Stromnetz gemessen. Informieren Sie sich im Internet über ihre Funktionsweise.



- Der Begriff „Wanderwelle“ stammt aus der Biologie. Beurteilen Sie, ob diese Sprechweise mit der in der Physik gebräuchlichen übereinstimmt. Wiederholen Sie dazu gegebenenfalls die Definition zum Begriff „Welle“ aus der 11. Klasse.
- Fassen Sie beide Texte zu einer Präsentation für Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler zusammen. Wählen Sie eines der vorgestellten Analogieexperimente aus und beschreiben Sie damit das Schwingungsverhalten der Basilarmembran. Erläutern Sie die Fähigkeit des Ohrs zu einer frequenzselektiven Wahrnehmung. Beachten Sie in Ihrer Präsentation die Fachsprache und formulieren Sie in Kausalketten (Methode auf S. 86). Belegen Sie verwendete Quellen und kennzeichnen Sie – falls vorhanden – wörtliche Zitate (Methode auf S. 86).

von Geigen- oder Harfensaiten vorstellen. Jede von ihnen besitzt sogar mehrere Eigenfrequenzen, die von der Länge l der Saite und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_s in der Saite abhängen (vgl. Kap. 4.1). Die kleinste dieser Eigenfrequenzen beträgt $f_0 = \frac{c_s}{2l}$.

Abbildung B6 zeigt, dass die Breite der Basilarmembran von der Basis zur Spitze hin zunimmt, sich also vergrößert. Gleichzeitig nimmt die Steifigkeit und mit ihr c_s ab. Beides führt zu einem Abnehmen der Resonanzfrequenz, je näher die Schallwelle der Spitze kommt.



B6 Verteilung der Eigenfrequenzen f_0 entlang der Basilarmembran und Zusammenhang mit der Breite der Basilarmembran l und der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schwingungen in der Membran c_s

Text 2

“These components allow for sound detection and sound frequency analysis in the following fashion. The inner ear represents a closed tube (both confining windows are elastic membranes). However, an excitation at the oval window cannot form resonances along this tube because that would limit the frequencies we hear to a set of harmonics, as discussed in the previous section. Instead, the excitation at the oval window leads to a one-dimensional travelling wave, similar to the single bulge you form on a rope stretched between your hand and the wall if you briefly swing your hand up and down. [...] For each sound frequency, a specific point exists, between the oval window and the apex, where the travelling wave amplifies in the perilymph and causes the basilar membrane to vibrate. This process is controlled by the stiffness of the basilar membrane, which reduces for a factor of 10^4 along its entire length. This is caused by a thickness variation of the basilar membrane. It starts with a thickness of 0.04 mm at the oval window and ends with a thickness of 0.5 mm at the apex.”

Quelle: Martin Zinke-Allmang (2009), *Physics for the Life Sciences*, Nelson Education Ltd., Toronto, 1. Auflage, S. 554

e) Die Basilarmembran soll durch eine Reihe von eingespannten Saiten modelliert werden. Diese sind am Anfang der Gehörschnecke kurz und werden dann immer länger.

(1) An der Stelle, an der Töne mit $f = 20$ kHz wahrgenommen werden, ist die Basilarmembran etwa 0,1 mm breit. Bestätigen Sie, dass dort die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der „Saite“ etwa 4 m/s beträgt.

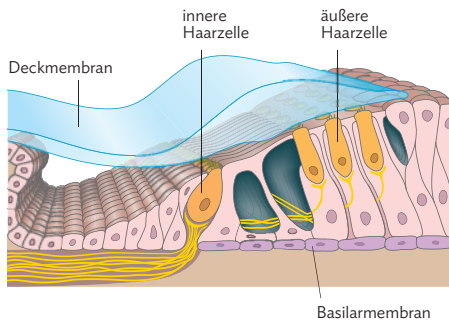
(2) Berechnen Sie die Breite der Basilarmembran an der Stelle, an der Töne mit $f = 20$ Hz wahrgenommen werden.

(3) Tatsächlich beträgt die entsprechende Breite nur ca. 0,5 mm. Erläutern Sie im Rahmen des verwendeten Modells die Auflösung dieses scheinbaren Widerspruchs.

5.2 Aufbau und Funktion des Innenohrs

M4: Das Corti'sche Organ

Unser Innenohr arbeitet sowohl frequenzselektiv als auch amplitudenselektiv, das heißt, wir können sowohl Tonhöhen als auch Lautstärken unterscheiden.



B7 Das Corti'sche Organ mit inneren und äußeren Haarzellen

Text 1

Die amplitudenselektive Umwandlung der Schwingungen in elektrische Signale erfolgt durch die sogenannten Haarzellen im Corti-Organ auf der Basilarmembran. Der Name der Haarzellen kommt von den haarartigen Fortsätzen der Zellen, die teilweise bis zur darüber liegenden Deckmembran reichen und bei einer Relativbewegung zwischen Basilarmembran und Deckmembran Scherkräfte erfahren. Eine Schädigung der Haarzellen, z. B. durch eine zu große Schallamplitude, ist beim Menschen irreversibel. In B7 erkennt man, dass es im Corti-Organ unter der Deckmembran zwei Arten von Haarzellen gibt, die inneren Haarzellen (IHCs: inner hair cells) und die äußeren Haarzellen (OHCs: outer hair cells).

Die Rolle der äußeren Haarzellen (B7, B8) besteht darin, die relativ schwachen Schwingungen der Basilarmembran zu verstärken. Dies geschieht durch einen Rückkopplungseffekt: Werden die OHCs durch eine Schwingung der Basilarmembran gereizt, so beginnen sie sich im Takt der Erregung zusammenzuziehen und wieder zu strecken. Das Innenohr erzeugt sozusagen selbst Schallwellen. Da die OHCs mit der Basilarmembran fest verbunden sind, wird somit deren Schwingung durch die Bewegungen der OHCs verstärkt (B9).

Die inneren Haarzellen erzeugen die Nervensignale, die über den Hörnerv an das Gehirn weitergeleitet werden. Dies geschieht, indem die IHCs zwischen Deckmembran und Basilarmembran seitlich ausgelenkt (geschert) werden. Diese Auslenkung führt an der Wurzel der Haarzellen zu einer mechanischen Öffnung von Ionenkanälen, durch die positive K^+ -Ionen in die Zelle

Arbeitsauftrag

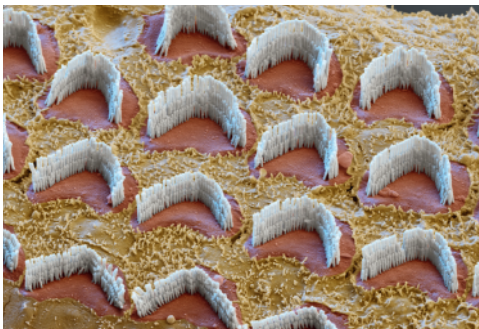
- Lesen Sie die nebenstehenden Texte und erschließen Sie sie sich nach der Methode auf S. 85. Klären Sie vorab unbekannte Wörter aus dem englischen Text.
- Die Millennium Bridge in London ist eine Fußgängerbrücke, die im Jahr 2000 eröffnet wurde. Es zeigte sich sehr schnell, dass Personen durch ihre Gangweise kleine Schwingungen der Brücke so sehr verstärken konnten, dass die Brücke kurz nach der Einweihung wieder geschlossen werden musste. Recherchieren Sie nach Filmaufnahmen und Erklärungen für diesen auch für Fachleute unerwarteten Effekt.



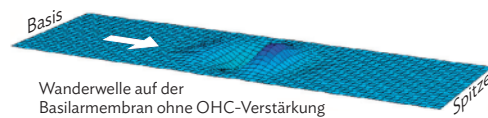
- Fassen Sie die drei Texte zu einer Präsentation für Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler zusammen. Gehen Sie dabei auch auf die Schwingungsverstärkung der Millennium Bridge als Analogiebeobachtung ein und erläutern Sie damit die Verstärkungswirkung der Haarzellen. Erläutern Sie die Fähigkeit des Ohrs zu einer amplitudenselektiven Wahrnehmung. Beachten Sie in Ihrer Präsentation die Fachsprache und formulieren Sie in Kausalketten (Methode auf S. 86). Belegen Sie verwendete Quellen und kennzeichnen Sie – falls vorhanden – wörtliche Zitate (Methode auf S. 86).

strömen (Kapitel 9). Das Zellinnere wird auf diese Weise positiv geladen. Je lauter der Ton, desto stärker die Scherung der IHCs und infolgedessen desto größer die Änderung des Ladungszustandes der Zelle. Diese Stärke der Ladungsänderung wird in den nachgeschalteten Nervenzellen in eine entsprechende Anzahl von Nervensignalen übersetzt, so dass ein lauter Ton in der gleichen Zeit mehr Nervensignale auslöst als ein leiser. Somit sind die IHCs für das amplitudenselektive Hören verantwortlich.

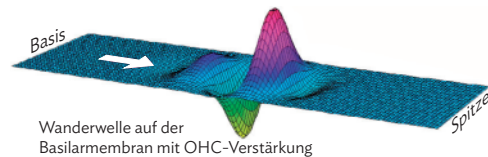
Bei einem länger anhaltenden Ton gelangen viele solcher Abfolgen von Nervensignalen nacheinander ins Gehirn. Ihre Frequenz entspricht der Tonfrequenz. Das Gehirn kann aber beide Anteile voneinander trennen und einmal als Information über die Amplitude und einmal als Information über die Frequenz interpretieren.



B8 | Mikroskopaufnahme der äußeren Haarzellen. Die Zellfortsätze jeder einzelnen Haarzelle sind in bogenförmigen Bündeln angeordnet.



Wanderwelle auf der Basilmembran ohne OHC-Verstärkung



Wanderwelle auf der Basilmembran mit OHC-Verstärkung

B9 | Verstärkung der Schwingung der Basilmembran durch die OHCs

Text 2

„What is reported to the brain? Two components of the vibrational motion of the basilar membrane are encoded in the sequence of the nerve impulses:

- **Tonotopic Mapping (Frequency-to-Place Mapping).** The response of a particular dendrite identifies the position along the cochlea where the resonance in the basilar membrane has occurred. If the travelling wave contains different frequencies, they are separately and concurrently detected by different dendrites along the cochlea, pretty much in the same fashion that Fourier analysis is developed mathematically. This mechanism was already proposed by Georg Ohm and Hermann von Helmholtz in the 19th century.
- **Temporal Coding of Frequencies.** The frequency at which the dendrites in the organ of Corti send their signals to the brain is synchronized with the actual frequency of the sound wave.“

Quelle: Martin Zinke-Allmang (2009), *Physics for the Life Sciences*, Toronto, S. 556

Text 3

„Unterschiedliche Schallfrequenzen werden entlang der Kochlea und im Verlauf der Hörbahn an bestimmten Orten repräsentiert (tonotope Gliederung). Jede Nervenfasern, die die Kochlea verlässt, wird durch eine bestimmte Schallfrequenz am stärksten erregt. [...] Die Empfindung der Tonhöhe wird neben der Ortsanalyse zusätzlich durch eine sogenannte Periodizitätsanalyse ermöglicht. Sie beruht darauf, dass in einer einzelnen Nervenfasern die ausgelöste Aktionspotenzialfrequenz mit der Schallwellenfrequenz nicht 1 : 1 übereinstimmen muss, sondern oft nur ein periodisches Abbild darstellt. Aus der Analyse der Aktivität mehrerer paralleler Fasern kann das Gehirn die Schallfrequenz dann errechnen.“

Quelle: Jens Huppelsberg und Kerstin Walter (2005), *Kurzlehrbuch Physiologie*, Thieme Verlag, Stuttgart, 2. korr. Auflage, S. 361

Basisaufgaben

1\ Hufeisennasen-Fledermaus

Hufeisennasen-Fledermäuse stoßen zur Orientierung und zum Beutefang Ultraschallwellen der Frequenz $f = 86 \text{ kHz}$ aus, die von Objekten als Reflexionen zurückgeworfen werden. Sie emittieren die Schallwellen aus den beiden Nasenlöchern ihrer hufeisenförmigen Nase.

- Berechnen Sie die Wellenlänge dieser Ultraschallwellen ($c_{\text{Schall}} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).
- Erstellen Sie eine Skizze mit den beiden Schallquellen und den Richtungen, in denen konstruktive bzw. destruktive Interferenz auftritt. Formulieren Sie zu diesen Richtungen jeweils einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Abstand der Nasenlöcher, dem Winkel und der Wellenlänge der Ultraschallwellen.
- Schätzen Sie den Abstand ab , den die Nasenlöcher voneinander haben müssen, damit sich die Ultraschallsignale nirgendwo im Raum vor der Fledermaus gegenseitig auslöschen.

2\ Geigentöne

Neben dem gespielten Grundton sind bei einer Geige auch Obertöne hörbar.

- Zeichnen Sie die Schwingungsform der Saite für den Grundton sowie für den zweiten Oberton.
- Eine Saite ist 330 mm lang. Berechnen Sie daraus die Frequenzen der Grundschwingung sowie der zweiten Oberschwingung.
- Bei höheren Temperaturen nimmt die Schallgeschwindigkeit in der Saite geringfügig zu. Beschreiben Sie die Konsequenzen, die dies für den Ton dieser Geige hat.

3\ Komplizierte Schwingungsmuster

Aus der Kombination von Grund- und Oberschwingungen lassen sich beliebig komplizierte Schwingungsmuster aufbauen.

- Verwenden Sie ein Programm, mit dem sich Graphen von Funktionen darstellen lassen, und erzeugen Sie schrittweise die Graphen zu folgenden Funktionstermen.

$$f(x) = \frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + \dots$$

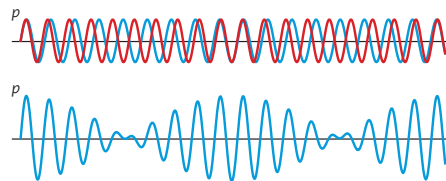
$$g(x) = \frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \dots$$

- Experimentieren Sie und erzeugen Sie weitere Überlagerungen von Grund- und Oberschwingungen.

4\ Schwebung

Bei der Überlagerung von zwei Sinuswellen mit minimal verschiedenen Frequenzen ergibt sich eine Schwebung.

- Beschreiben Sie das Zustandekommen der überlagerten Schwingung (unten) aus den beiden Einzelschwingungen (oben). Gehen Sie dabei insbesondere auf Zeiten mit konstruktiver und destruktiver Interferenz ein.



- Erklären Sie den Unterschied zu den bisher betrachteten Interferenzerscheinungen.
- Eine Schwebung kann experimentell mit zwei gleichen Stimmgabeln erzeugt werden, bei denen eine – z.B. durch eine Zusatzmasse – leicht verstimmt ist. Führen Sie das Experiment durch und beschreiben Sie Ihren Höreindruck. Erklären Sie ihn mit dem Schwingungsdiagramm.

5\ Schallpegel-Reduktion

Bestimmen Sie den Bruchteil, um den die akustische Leistung eines Geräusches gesenkt werden muss, um seinen Schallpegel von 90 dB auf 70 dB zu reduzieren.

6\ Playback-Sänger

Ein Chorsänger singt mit einer Schallintensität von $1,0 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$. Entscheiden Sie mit einer geeigneten Rechnung, ob es auffällt, wenn im Chor statt sechs Leuten nur fünf tatsächlich singen. Das menschliche Ohr kann Schallpegel als verschiedenen erkennen, die sich um 1 dB unterscheiden.

7\ Isophone

Erklären Sie knapp die Bedeutung der dick gezeichneten Linien im Diagramm B6 auf S. 82. Ergänzen Sie dann die folgenden Sätze:

- (1) Ein Ton mit 250 Hz und 80 dB wird genauso laut wahrgenommen wie ein Ton von 8000 Hz und ... dB.
- (2) Ein Ton mit 250 Hz und 40 dB wird ... wahrgenommen als ein Ton mit 4000 Hz und 40 dB.

8 \ Außenohr

- a) Erläutern Sie die Verstärkung bestimmter Frequenzen durch das Außenohr mithilfe von Interferenz und Resonanz.
- b) „Sowohl für die Schallquellenlokalisierung als auch für die Verstärkung bestimmter Frequenzen ist es von Vorteil, wenn die Abmessungen der Ohrmuschel und des Gehörgangs in der Größenordnung der zu verstärkenden bzw. zu lokalisierenden Wellenlängen liegen. Im für den Menschen besonders gut hörbaren Frequenzbereich liegen die Wellenlängen zwischen 8,25 cm und 1,65 m. Daher ist die Bedeutung der menschlichen Ohrmuschel noch umstritten. Neueste Untersuchungen deuten an, dass hier auch den Schultern eine stärkere Bedeutung zukommt.“

Untermauern Sie diese Aussage, indem Sie die Größen der menschlichen Ohrmuschel und der Schulter mit dem Wellenlängenbereich der menschlichen Stimme vergleichen.

9 \ Gespenstfledermaus

Berechnen Sie aus der Größe der Ohrmuschel der australischen Gespenstfledermaus (ca. 3–4 cm) den Frequenzbereich, für den Beugung an Hindernissen dieser Größenordnung effektiv wird, und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit B3 auf S. 90. Hinweis: Zum Ausmaß von Beugungseffekten wiederholen Sie den Lehrtext auf S. 73.



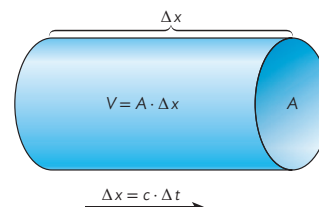
Australische Gespenstfledermaus (*Macroderma gigas*)

Zusammenfassende Aufgaben

10 \ Herleitung der Formel $I = \frac{1}{2} \cdot p \cdot v$

Bei einer – von links nach rechts laufenden – Schallwelle wechseln sich Luftbereiche hoher Dichte (mittlere Teilchengeschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung gering) mit Bereichen geringer Dichte (mittlere Teilchengeschwindigkeit groß) ab. Die linke Begrenzung des Zylinders (Flächeninhalt A) in der Abbildung markiere die Grenzfläche zwischen zwei solchen Bereichen. Die im Mittel schnelleren Teilchen links dieser Grenzfläche schieben diese Grenzfläche nach rechts, komprimieren dadurch das Volumen in der Zeit Δt um $\Delta V = A \cdot \Delta x$ und erhöhen damit die potentielle Energie des rechten Bereichs. Um den gleichen Betrag wird die kinetische Energie des linken Bereiches erniedrigt. Die Zunahme der potentiellen Energie ergibt sich ähnlich wie beim Spannen einer Feder mit $\Delta E = \bar{F} \cdot \Delta x$, wobei $\bar{F} = \frac{1}{2} \cdot F$ die mittlere Druckkraft ist (F ist die Kraft am Ende der Kompression).

Leiten Sie damit unter Verwendung von $F = p \cdot A$ und $\Delta x = v \cdot \Delta t$ die Formel $I = \frac{1}{2} \cdot p \cdot v$ her.

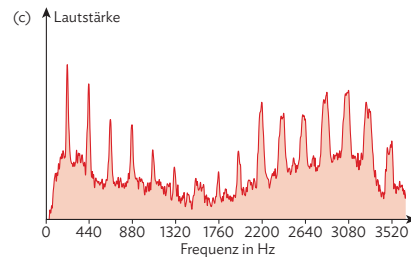
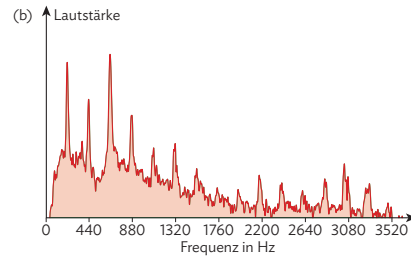
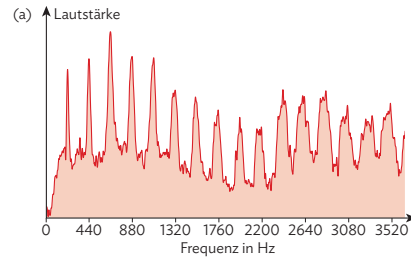




11\ Frequenzspektren von Vokalen

Auch die menschliche Stimme kann mithilfe der Fourieranalyse eingehend untersucht werden. Bei der Analyse unserer Sprache zeigt sich, dass Vokale wie Klänge aufgebaut sind: Sie besitzen eine Grundschwingung und eine charakteristische Obertonreihe.

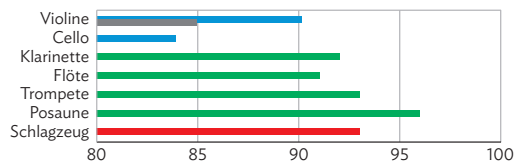
Die hier aufgezeichneten Frequenzspektren von Vokalen haben alle die gleiche Grundschwingung (bei 220 Hz), die in allen Fällen gleich stark ausgeprägt ist. Deutlich unterscheiden sich die einzelnen Vokale jedoch in der Stärke ihrer Obertöne. Daraus kann man schließen, dass wir Vokale nur aufgrund der verschiedenen Lautstärke ihrer Obertöne unterscheiden können. Sprechen Sie selbst verschiedene Vokale und bestimmen Sie mit einem geeigneten Programm die relative Stärke der enthaltenen Frequenzen. Vergleichen Sie mit der Abbildung und mit den Ergebnissen Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler. Versuchen Sie anschließend, die abgebildeten Frequenzspektren bestimmten Vokalen zuzuordnen.



Frequenzspektren unterschiedlicher gesungener Vokale

12\ Schallintensität von Musikinstrumenten

Für Orchestermusiker ist der Schallschutz sehr wichtig, weil sie sowohl beim Proben als auch bei Aufführungen für lange Zeit exponiert sind. Das Diagramm zeigt Werte für die Schallpegel an



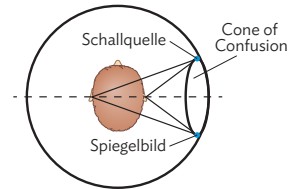
Schallpegel einiger Musikinstrumente in dB(A). Bei der Violine sind die unterschiedlichen Schallpegel an den beiden Ohren des Spielers eingezeichnet.

- a) Bei der Violine fällt auf, dass die Schallpegel an den beiden Ohren sehr unterschiedlich sind. Berechnen Sie für die beiden Werte jeweils die Schallintensität und bilden Sie ihr Verhältnis.
b) Geben Sie den Zusammenhang zwischen der Schallintensität und der Entfernung zur Schallquelle an. Bestätigen Sie, dass sich das in a) berechnete Verhältnis ergibt, wenn das rechte Ohr des Geigers 1,8-mal so weit von der Geige entfernt ist wie das linke Ohr. Es darf angenommen werden, dass die Schallabstrahlung gleichmäßig in alle Richtungen geschieht.

- c) In Publikumsentfernung beträgt die Schallintensität einer Trompete etwa $1,6 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$. In einem Orchester spielen drei Trompeter, die zusammen einen Schallpegel von 76,8 dB erzeugen (diese Angabe muss nicht nachgeprüft werden). Entscheiden Sie mit einer geeigneten Rechnung, ob es auffällt, wenn einer der Trompeter „aussetzt“ und nur scheinbar spielt. Berechnen Sie dazu den entsprechenden Schallpegel für zwei Trompeten. Das menschliche Ohr kann Schallpegel als verschieden erkennen, die sich um 1 dB unterscheiden.
- d) In Publikumsentfernung beträgt die Schallintensität einer Posaune $I_P = 2,30 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$, die einer Trompete hat den Wert $I_T = 1,60 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$. Der Dirigent des Orchesters möchte, dass die Trompeten insgesamt lauter zu hören sind als die Posaunen. Hierzu sollen die Trompeten mindestens 2,00 dB lauter sein als die Posaunen. Berechnen Sie die Anzahl der Trompeten, die mindestens vorhanden sein müssen, damit diese 2,00 dB lauter zu hören sind als drei Posaunen (Zwischenergebnis: $L_{\text{Posaunen gesamt}} = 78,4$ dB).

13\ Cone of Confusion

Liegt eine Schallquelle auf dem sogenannten „Cone of Confusion“ (siehe Abbildung), so kommt es zu Beeinträchtigungen bei der exakten Lokalisation. Erläutern Sie mithilfe der Abbildung den Grund für diese Beeinträchtigungen. Beschreiben Sie anschließend andere Mechanismen zur räumlichen Wahrnehmung von Geräuschen, die eine solche falsche Lokalisation verhindern.

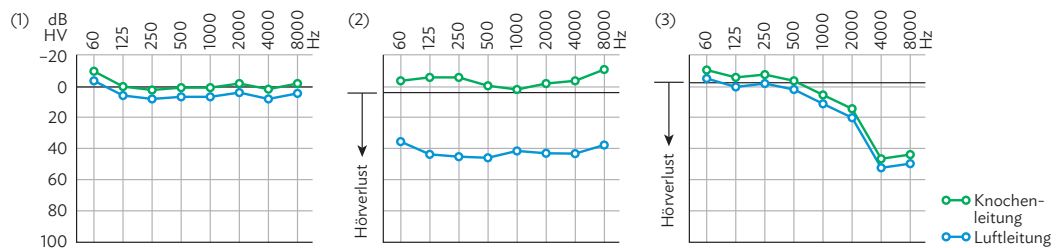


14\ Schwerhörigkeit

Schallwellen können nicht nur durch die Luft des Gehörgangs zum Innenohr übertragen werden, sondern auch über den Schädelknochen. Bei der Diagnose einer Schwerhörigkeit werden deshalb beide Übertragungswege getestet. Je nach Befund lassen sich unterschiedliche Ursachen der Schwerhörigkeit angeben:

Bei der Schalleitungs-Schwerhörigkeit liegen die Probleme im Außen- und Mittelohr, z. B. kann die Beweglichkeit der Hörknöchelchen eingeschränkt sein. Bei der Schallempfindungs-Schwerhörigkeit sind Strukturen im Innenohr betroffen, z. B. können Haarzellen oder Nerven geschädigt sein. Bei dauerhafter Einwirkung von Lärm über 85 dB werden zunächst Haarzellen an der Basis der Cochlea irreversibel zerstört.

Die Abbildungen zeigen eine normale, ungestörte Tonempfindung (1), daneben zwei typische Verläufe bei Schwerhörigkeit. Ordnen Sie die Diagramme (2) und (3) den beschriebenen Arten der Schwerhörigkeit zu und begründen Sie Ihre Entscheidung.



Selbsttest: Überprüfen Sie Ihre Kenntnisse und Kompetenzen

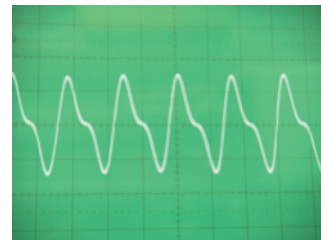


Selbsttest-Checkliste

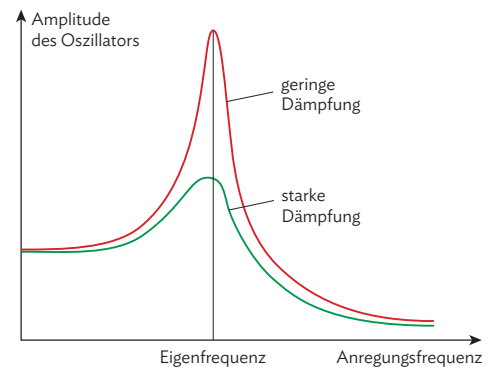
- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen unter [MC 67055-20](#)
- ✓ Bewerten Sie Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen 😊, 😐 oder 😞.



- 1 Zwei Lautsprecher stehen im Abstand von 2,0 m vor einer Wand und spielen den gleichen Ton einer Stimmgabel ab.
 - a) Stellen Sie die Situation mit einer Skizze dar. Beschreiben Sie Ihre Wahrnehmung, wenn Sie sich parallel zur Wand vor den Lautsprechern bewegen.
 - b) Erklären Sie die Wahrnehmung mit physikalischen Fachbegriffen und begründen Sie, dass es ausgezeichnete Stellen gibt, an denen besondere Höreindrücke herrschen.
 - c) Geben Sie für diese besonderen Stellen einen allgemeinen mathematischen Zusammenhang zwischen geeigneten geometrischen Abmessungen und der Wellenlänge des Tons an. Stellen Sie auch die physikalischen Voraussetzungen dar, die für diesen Zusammenhang gegeben sein müssen.
 - d) Begründen Sie, dass sich die besonderen Stellen bei einem höheren Ton verschieben. Erklären Sie, ob das auch für einen leiseren Ton gilt.
 - e) Beschreiben Sie die Veränderung Ihrer Beobachtungen, wenn statt des ursprünglichen Tons ein musikalischer Klang, z. B. einer Geige, abgespielt wird.
 - f) Erklären Sie allgemein das Superpositionsprinzip im Zusammenhang mit akustischen Schwingungen.
- 2 Die Abbildung zeigt den Druckverlauf bei einer akustischen Schwingung, die mit einem Mikrofon aufgenommen wurde.
 - a) Geben Sie die Art der dargestellten Schwingung an und begründen Sie, dass im zugehörigen Frequenzspektrum nicht nur eine einzige Frequenz enthalten sein kann.
 - b) Stellen Sie eine begründete Vermutung über die Art der Schallquelle an.
 - c) Eine Gitarrensaite kann in verschiedenen Arten schwingen. Zeichnen Sie drei mögliche Schwingungen auf und geben Sie jeweils einen allgemeinen Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen und der Schwingungsfrequenz an.
 - d) Erstellen Sie ein Frequenzspektrum für einen Klang, in dem die drei Schwingungsformen aus c) gleichzeitig vorhanden sind.
- 3 Eine Trompete kann in 1,0 m Entfernung einen Schallpegel von 93 Dezibel erzeugen.
 - a) Berechnen Sie die Schallintensität an dieser Stelle und die Schallleistung der Trompete. Es darf angenommen werden, dass die Schallabstrahlung gleichmäßig in alle Richtungen geschieht.
 - b) Ein Zuhörer befindet sich 10 m von der Trompete entfernt. Berechnen Sie die Abnahme des Schallintensitätspegels im Vergleich zur Entfernung von 1,0 m.



- c) Beurteilen Sie, ob mit dem Trompetenspiel gesundheitliche Gefährdungen verbunden sind und nennen Sie gegebenenfalls mögliche Schutzmaßnahmen. Betrachten Sie dabei die Situation ...
- für den Trompeter/die Trompeterin selbst.
 - für eine Person, die in der angegebenen Entfernung ein Trompetenkonzert besucht.
- 4 a) Nennen Sie drei Anforderungen, die an das Ohr als Warnsystem vor Gefahren gestellt werden.
- b) Beschreiben Sie zwei mögliche Mechanismen, die zur Erklärung des Richtungshörens herangezogen werden können. Gehen Sie dabei insbesondere auf die dafür verantwortlichen physikalischen Phänomene ein.
- 5 a) Erklären Sie anhand der Abbildung den Begriff der Resonanz. Beschreiben Sie dazu einen geeigneten mechanischen Versuch.
- b) Die Basilarmembran ist am Anfang der Gehörschnecke schmal und wird dann immer breiter. Berechnen Sie die Breite der Basilarmembran, wenn dort die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schwingungen $3,7 \text{ m/s}$ beträgt und die Resonanzfrequenz 18 kHz ist. Es wird angenommen, dass die Membran an der vorgegebenen Stelle in der Grundschiwingung schwingt.
- c) Erläutern Sie den Begriff „frequenzselektive Wahrnehmung“ und ihre biologische Realisierung im Innenohr.
- 6 a) Skizzieren Sie den Aufbau des Corti'schen Organs und beschreiben Sie seine Lage innerhalb des Innenohrs.
- b) Erläutern Sie jeweils die Bedeutung der inneren und äußeren Haarzellen bei der Wahrnehmung unterschiedlicher Amplituden. Verfassen Sie diesen Text einmal für eine Mitschülerin, die sich in einem Biologie-Kurs auf das Abitur vorbereitet und einmal für einen Patienten, der wegen Schwerhörigkeit des Innenohrs in Behandlung ist, aber über keine biologische oder medizinische Ausbildung verfügt.



Auswertungstabelle

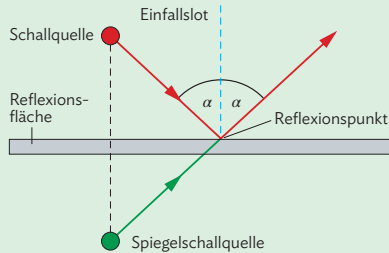
Ich kann ...	Hilfe
1 experimentelle Ergebnisse zur Interferenz von Schallwellen mit dem Superpositionsprinzip erklären.	S. 72–74
2 Frequenzspektren von Tönen und Klängen unterscheiden und Zusammenhänge mit den zugehörigen Schwingungsdiagrammen herstellen.	S. 75–77
3 Berechnungen zur Lautstärke in Alltagssituationen durchführen und Gesundheitsgefährdungen, die von hohen Schalldruckpegeln ausgehen, beurteilen.	S. 78–82
4 die Funktion des Außenohrs erklären und verschiedene Hypothesen zum Richtungshören beurteilen.	S. 88–92
5 Resonanzexperimente beschreiben und damit die Funktion der Basilarmembran im Innenohr plausibel machen. Dabei sind die Formulierungen fachsprachlich korrekt und sinnvoll strukturiert.	S. 94–97
6 die Funktionsweise des Corti'schen Organs ziel- und sachgerecht darstellen, dabei Schwerpunkte setzen und die Darstellungsformen an unterschiedliche Adressaten anpassen.	S. 98–99

Zusammenfassung

Schallwellen

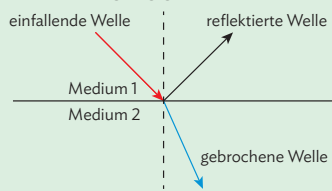
Reflexion

Es gilt das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel und Ausfallswinkel der Schallwelle sind gleich groß.



Brechung

Ein Teil einer Schallwelle wird an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten reflektiert, der andere Teil wird beim Übergang gebrochen.



Beugung

Schallwellen werden von einem Hindernis nicht vollständig abgeschattet, wenn die Wellenlänge des Schalls mindestens in der Größenordnung des Hindernisses liegt.

Für Schallwellen gilt allgemein der Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz:

$$c = \lambda \cdot f$$

Schalldruck an einer festen Stelle:

$$p_{\text{ges}}(t) = p_n + p_w(t) = p_n + p \cdot \sin(\omega t)$$

p_n : Normaldruck im Medium

$p_w(t)$: Schallwechseldruck

Durch eine schwingende Saite können Töne mit festen Frequenzen $f_k = f_0 \cdot (k + 1)$ erzeugt werden. Dabei beschreibt $k = 0$ die Grundschwingung, die Schwingungen mit $k = 1, 2, \dots$ heißen Oberschwingungen. f_0 bestimmt sich aus der Länge der Saite l und der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen in der Saite c_{Saite} : $f_0 = \frac{c_{\text{Saite}}}{2 \cdot l}$.

Lautstärke

Schallintensität

$$\text{Schallintensität } I = \frac{P}{A} \quad [I] = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

P : Schalleistung

A : aufnehmende Fläche

Bei gleichmäßiger Schallabstrahlung in alle Raumrichtungen gilt im Abstand r von der Schallquelle:

$$I(r) = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

Intensität einer Schallwelle in einem verlustfreien akustischen Medium:

$$I = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot c} \cdot p^2$$

Schallintensitätspegel:

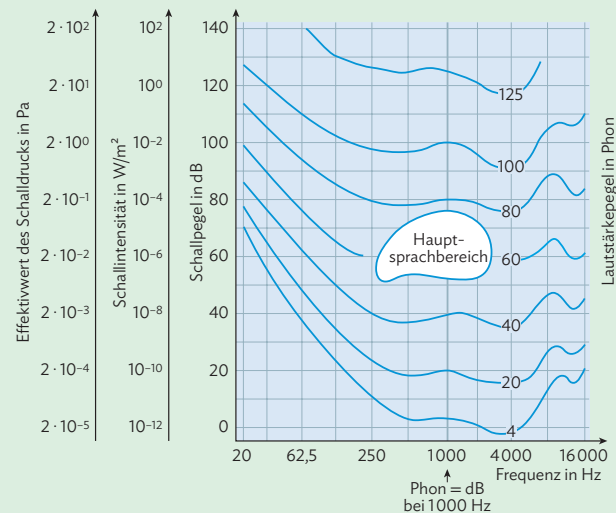
$$L_I = 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \text{ dB} \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

Schalldruckpegel:

$$L_p = 20 \text{ dB} \cdot \lg \frac{p_{\text{eff}}}{p_0}$$

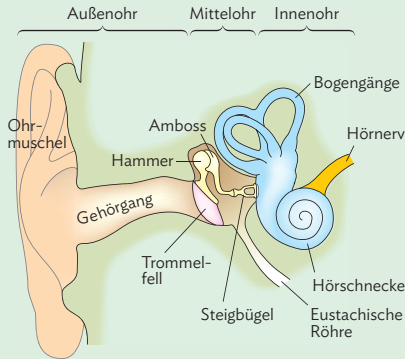
Hörkurve des Menschen

Kurven gleicher Lautstärkeempfindung:

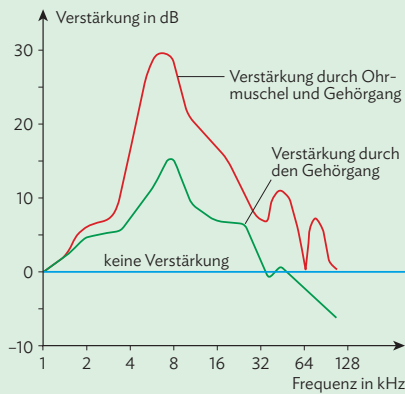


Außenohr

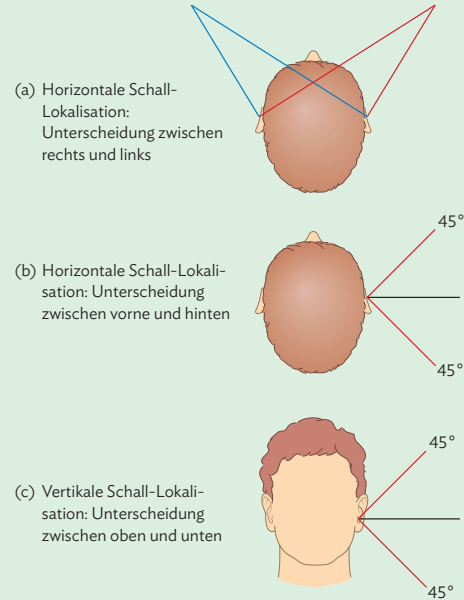
Aufbau des menschlichen Ohrs



Verstärkung bestimmter Frequenzen durch Ohrmuschel und Gehörgang



Richtungshören und Schall-Lokalisation

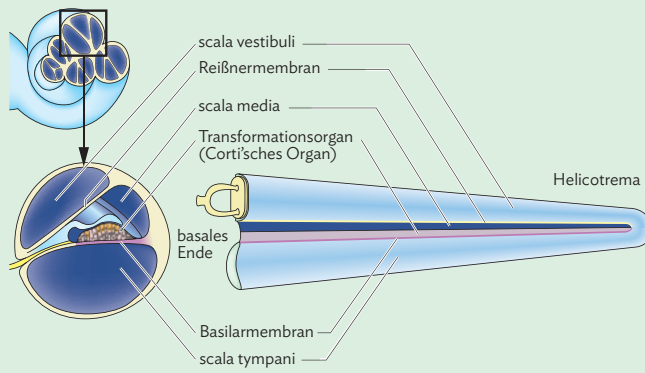


Die wesentlichen Mechanismen sind Laufzeitunterschiede zu den beiden Ohren (ITD) und Lautstärkeunterschiede an den beiden Ohren (ILD).

Innenohr

Hörschnecke

Senkrechter Schnitt durch den Schneckengang (links), „ausgerollter“ Zustand (rechts)



Basilarmembran und Corti-Organ

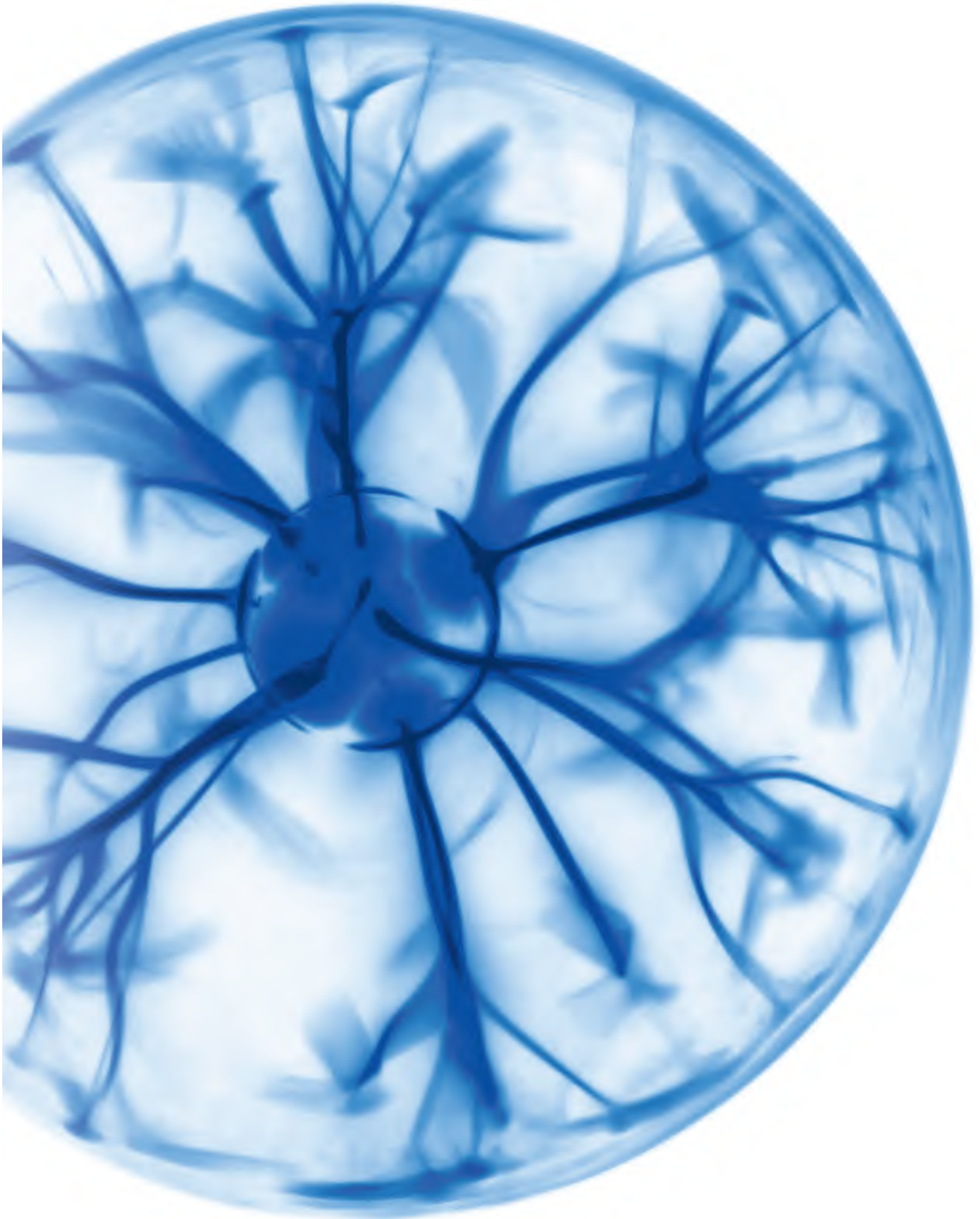
Das menschliche Ohr ist sowohl frequenzselektiv als auch amplitudenselektiv, d. h. wir können Tonhöhen und Lautstärken unterscheiden. Schallwellen versetzen die Basilarmembran in Abhängigkeit von ihrer Frequenz durch Resonanz in unterschiedliche Schwingungen. Die amplitudenselektive Umwandlung der Schwingungen in elektrische Signale erfolgt durch die Haarzellen im Corti-Organ auf der Basilarmembran.

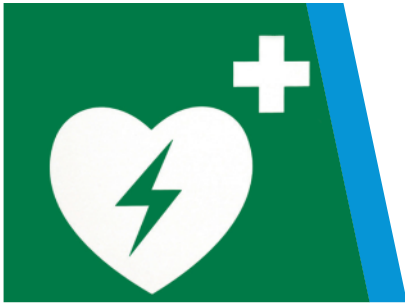
C \ Strahlenphysik und Anwendungen



Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- wie biologische Sachverhalte durch elektrische und magnetische Felder modelliert werden können.
- wie in einem EKG Informationen über die Ladungsverteilung des Herzens gewonnen werden.
- wie bei Strahlentherapien elektrische und magnetische Felder zur Beschleunigung von Teilchen genutzt werden.
- wie Röntgenstrahlen in der Medizin eingesetzt werden und welche Folgen dabei zu bedenken sind.





6

Elektrische Felder

Materialien zu Kapitel 6.1

► M1 Lernaufgabe: Elektrische Sinnesorgane

Die meisten höheren Tiere orientieren sich in ihrer Umgebung mit Augen und Ohren. Praktisch alle Lebewesen besitzen daneben noch weitere Sinnesorgane. So können etwa Haie mithilfe der sehr empfindlichen Lorenzini-Ampullen elektrische Felder wahrnehmen.

Diese schlauchartigen Einstülpungen befinden sich an der Oberfläche der Kopfhaut und sind mit einer gallertartigen Flüssigkeit gefüllt. An ihrem Ende befinden sich Elektrorezeptoren, die den Spannungsabfall an der Haut messen. Durch das elektrische Feld öffnen sich Ionenkanäle in der Zellmembran (Kapitel 9), und die dadurch ausgelöste Erregung wird ins Gehirn des Hais weitergeleitet.

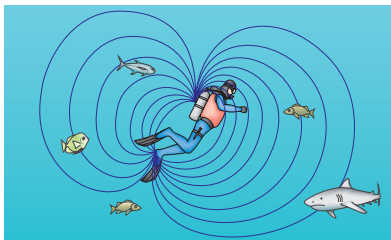
Dieser weitere Sinn ist bei der Jagd sehr nützlich: Die Muskeln von Beutefischen ändern bei der Bewegung (Kontraktion) das elektrische Feld in der Umgebung. Diese Feldänderungen lassen sich nicht verbergen. Sogar im Ruhezustand sendet jedes Lebewesen durch



Haischnauze mit Lorenzini-Ampullen

die Kontraktion des Herzens elektrische Signale aus. Hinzu kommt, dass sich durch die unterschiedliche Ionenkonzentration im Fisch und dem umgebenden Salzwasser stets eine gewisse Spannung einstellt. Der Hai kann alle diese Felder erkennen; aufgrund der Vielzahl der Rezeptoren ist auch eine Ortung im Raum möglich.

In den großen Meeresströmungen lassen sich ebenfalls Änderungen von elektrischen und magnetischen Feldern nachweisen. Haie können auch diese spüren und besitzen somit einen „natürlichen Kompass“.



Taucher mit Schutzgerät

Die Empfindlichkeit der Haie für elektrische Felder lässt sich zum Schutz von Tauchern nutzen. Der Taucher trägt ein Gerät mit sich, das ein leichtes elektrisches Feld erzeugt. Dieses ist ungefährlich für den Taucher und die meisten Fische in seiner Nähe. Haie empfinden das von dem Gerät erzeugte Feld als unangenehm und drehen ab.

Arbeitsauftrag

- Stellen Sie die Vorteile zusammen, die Haie durch ihre elektrischen Sinnesorgane gegenüber anderen Meerestieren haben.
- Die Abbildung eines Tauchers unten ist einer Werbebroschüre nachempfunden. Stellen Sie Vermutungen über die Bedeutung der Linien auf. Berücksichtigen Sie Darstellungsweisen, die Sie aus anderen Zusammenhängen, z. B. bei magnetischen Feldern, kennen.
- Beschreiben Sie Möglichkeiten, um ein elektrisches Feld zu erzeugen. Beurteilen Sie deren Eignung für ein Schutzgerät für Taucher. Stellen Sie Hypothesen zur technischen Ausführung des Geräts auf.

Materialien zu Kapitel 6.5

► M2 Einstieg: Muskelfunktion und Elektrizität

Der italienische Anatom Luigi Galvani (1737–1798) entdeckte den Zusammenhang zwischen Elektrizität und Muskelbewegung. Froschschenkel, die er nach dem Sezieren aufgehängt hatte, begannen zu zucken. Galvani konnte das gleiche Resultat auch durch das Verbinden verschiedener Metalle erzielen. Alessandro Volta erkannte, dass die Bewegung des Froschschenkels durch Spannungen von außen hervorgerufen wurde und nicht, wie Galvani annahm, durch „animalische Elektrizität“.

Heute ist bekannt, dass Muskelfasern aus Myofibrillen bestehen, die aus Myosin- und Aktinfilamenten aufgebaut sind.

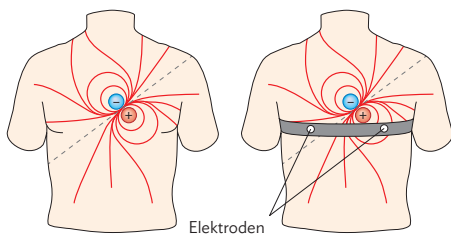
Die Moleküle der Myosinfilamente sind gelenkartig

aufgebaut. Die Köpfe besitzen eine starke Affinität, mit dem Aktin eine Verbindung einzugehen, da der Abstand zwischen ihnen mit etwa 5 nm sehr gering ist. Die Muskelkontraktion läuft nach der Filament-Gleittheorie ab, bei der Aktin- und Myosinfilamente aneinander vorbeigleiten und ineinander hineingezogen werden. Die Kontraktion startet mit einem Nervenimpuls, der dafür sorgt, dass Kalziumionen ausgeschüttet werden. Diese verbinden sich mit dem Troponin so, dass eine Brückenbindung zwischen Aktin und Myosin nicht länger verhindert wird. Das Myosin-Köpfchen knickt um und zieht den Aktin-Strang mit sich. Da jede Muskelkontraktion von Nervenimpulsen begleitet ist und Ladungen in den Muskelzellen verschoben werden, entstehen dabei elektrische Felder. Diese Felder und die zugehörigen Potentiale von $50 \mu\text{V}$ bis 5 mV können an der Körperoberfläche gemessen werden.

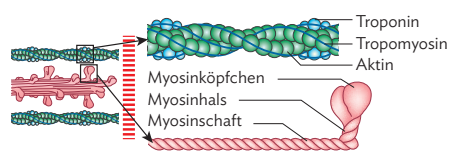
Eine spezielle Muskelkontraktion ist die des Herzmuskels. Durch die Verbindung zwischen zwei benachbarten Muskelzellen wird eine Weiterleitung von Zelle zu Zelle ermöglicht. Die Erregung läuft in einer charakteristischen Reihenfolge ab und das resultierende elektrische Feld ändert sich periodisch. Das Feld bzw. das entsprechende Potential kann an der Körperoberfläche mit Elektroden gemessen werden.

Beim Elektrokardiogramm (EKG) interessiert die genaue Form der Mess-

kurve; bei der Pulsmessung wird nur festgestellt, nach welcher Zeit sich das Signalmuster wiederholt. Bei Erwachsenen geschieht das mit einer Frequenz von ca. 60 Hz bis 80 Hz, bei Kleinkindern mit bis zu 120 Hz. Körperliche Belastung lässt die Herzfrequenz bis auf das Vierfache ansteigen; eine Kontrolle, z. B. beim Sport, ist deshalb sinnvoll.




Schematische Darstellung eines Pulsmessers



Detail eines Aktin- und Myosinfilaments

Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie den genauen Ablauf einer Muskelkontraktion. Beschreiben Sie die Rolle der Kalziumionen und erklären Sie, dass sich bei einer Kontraktion der elektrische Zustand der Myofibrillen ändert. Verwenden Sie die Zeichnungen (Medien-code).  MC 67055-21

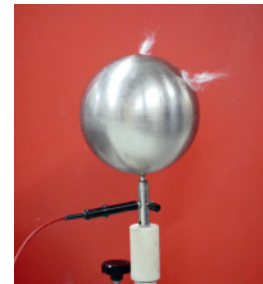
b) Wenn Sie Zugang zu einem Pulsmesser haben, der mit Elektroden arbeitet, testen Sie seine Funktionsweise. Dokumentieren Sie die Messwerte vor und nach körperlicher Betätigung. Verändern Sie auch die Position der Elektroden.

c) Geben Sie auf die Elektroden des Pulsmessers aus b) ein (schwaches!) periodisches Spannungssignal und testen Sie die Anzeige.

6.1 Beschreibung elektrischer Felder

Darstellung von elektrischen Feldlinien

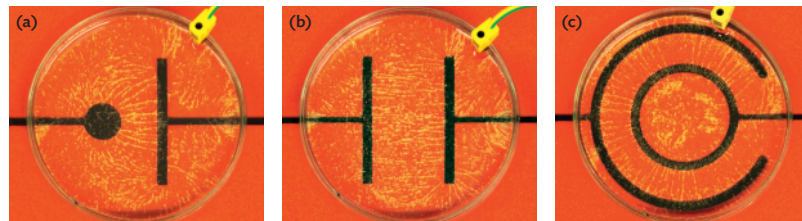
Aus der 10. Klasse ist Ihnen der Begriff des magnetischen Feldes vertraut. Die damit verbundene Vorstellung lässt sich verallgemeinern: Immer dann, wenn in einem Raumbereich Kraftwirkungen auf Gegenstände oder Teilchen zu beobachten sind, kann man auf das Vorhandensein eines physikalischen Feldes schließen. So werden beispielsweise Wattebällchen in der Nähe einer geladenen Kugel ausgerichtet. Elektrische Ladungen erzeugen in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld.



B1 Nachweis des elektrischen Feldes in der Nähe einer geladenen Kugel

Um diesen besonderen Zustand des Raumes zu veranschaulichen, stellt man elektrische Felder meist durch Feldlinien oder alternativ durch Äquipotentiallinien (Kapitel 6.2) dar. Dabei sind Feldlinien gedachte Linien, die an jedem Punkt des elektrischen Feldes die Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung angeben.

Um nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke des elektrischen Feldes anschaulich darzustellen, legt man fest: Sind in einer Abbildung die Linien eng beieinander, so bedeutet dies, dass das Feld dort sehr stark ist. Umgekehrt bedeutet ein großer Abstand der Feldlinien ein schwaches Feld mit geringer Feldstärke.



B2 Experimentelle Darstellung von elektrischen Feldlinien

Eigenschaften elektrischer Felder

Mit Grießkörnern in Öl lassen sich in einem einfachen Experiment Feldlinienbilder erzeugen (B2). In den Grießkörnern werden dabei positive und negative Ladungen gegeneinander verschoben und sie richten sich nach dem vorgegebenen Feld aus. In den Anordnungen werden wichtige Eigenschaften statischer (zeitlich unveränderlicher) elektrischer Felder und ihrer Darstellungen sichtbar:

- Elektrische Feldlinien stehen auf Leiterflächen senkrecht. Da Feldlinien Kraftrichtungen angeben, könnte man einer nicht senkrecht auf dem Leiter stehenden Feldlinie zwei Kraftkomponenten zuordnen: eine senkrecht zum Leiter und eine parallel dazu. Die parallele Kraftkomponente würde zu einer Verschiebung von Ladungen im Leiter und damit zu einer Veränderung des Feldes führen.
- Elektrische Feldlinien schneiden sich nicht. Denn ansonsten würden auf eine Probeladung im Schnittpunkt zwei Kräfte wirken. Diese beiden Kräfte könnten zu einer einzigen Kraft zusammengesetzt werden, die eine neue, resultierende Feldlinie definieren würde.
- Elektrische Feldlinien beginnen und enden immer auf Ladungen oder setzen sich bis ins Unendliche fort, da zeitlich unveränderliche Felder nur von Ladungen hervorgerufen werden können.

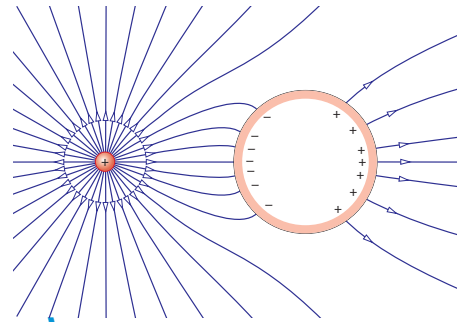
i

Hier wird auch noch einmal der Modellcharakter der Feldlinien deutlich.

i

Weil die Grießkörnerchen ausgedehnt sind, kann man dort – im Gegensatz zu den idealisierten Feldlinien – durchaus gelegentliche „Verästelungen“ feststellen.

- Im Inneren eines Leiters existiert kein Feld, egal, ob er selbst geladen ist oder nicht. Dies zeigen auch Versuche mit dem Faraday-Käfig: Befindet sich ein neutraler Leiter in einem elektrischen Feld, so werden in ihm Ladungen verschoben. Diese Verschiebung verläuft so, dass das Feld im Inneren kompensiert wird (B3).
- Ladungen in Leitern konzentrieren sich dort, wo das Feld am stärksten ist, d. h. wo die meisten Feldlinien auftreten. Dies wird z. B. beim Blitzableiter verwendet (B4).
- Außerdem definiert man: Elektrische Felder zeigen aufgrund der Definition der Feldlinien (Kraftwirkung auf positiv geladene Teilchen) von der positiven Elektrode zur negativen.



B3 | Feldfreier Raum im Inneren eines Leiters

Die beschriebenen Eigenschaften gelten für statische Felder. Bei stromdurchflossenen Leitern oder bei sich rasch ändernden elektromagnetischen Feldern liegt eine andere Situation vor. Langsame Bewegungen von Ladungen, wie z. B. im Fall des Tauchers (S. 110) können jedoch in guter Näherung durch ein statisches elektrisches Feld dargestellt werden.

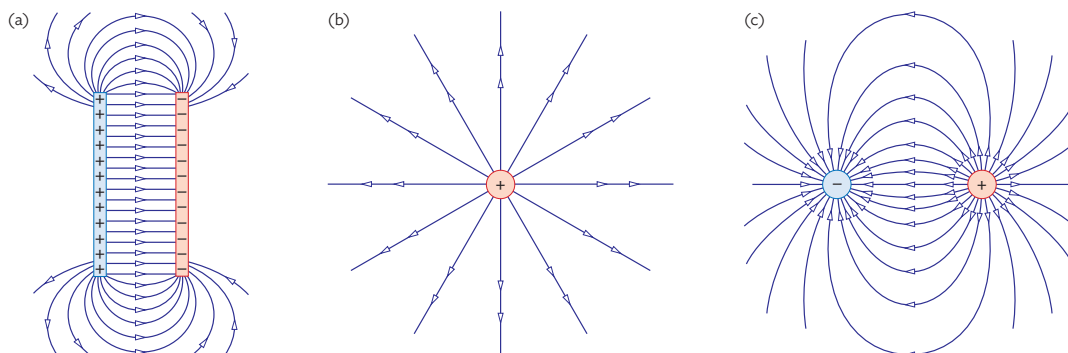
Die Felder in B2b und B2c lassen sich besonders einfach beschreiben und werden daher häufig für Modellierungen oder Berechnungen verwendet:

Homogenes Feld (B5a): Im homogenen Feld hat das Feld überall die gleiche Richtung und auch die gleiche Stärke. Im Feldlinienbild wird dies durch parallele Linien, die alle den gleichen Abstand zueinander haben, dargestellt. Zwischen zwei geladenen, parallelen Leiterplatten herrscht in sehr guter Näherung ein homogenes elektrisches Feld.

Radialsymmetrisches Feld (B5b): Die Feldlinien verlaufen gleichmäßig radial. Dabei nimmt die Stärke des Feldes nach außen hin ab. Das radialsymmetrische Feld kann entweder mit zwei gegensätzlich geladenen konzentrischen Kreiselektroden verwirklicht werden oder mit einer Kugelladung, bei der sich die zweite Elektrode „im Unendlichen“ befindet.



B4 | Blitzeinschlag



B5 | Elektrische Feldlinien für ein (a) homogenes Feld, (b) ein radialsymmetrisches Feld und (c) ein Dipolfeld



6.1 Beschreibung elektrischer Felder

Speziell in der Biophysik tritt eine weitere Feldart häufig auf, das **Dipolfeld**. Es wird erzeugt durch eine positive und eine negative (Punkt-)Ladung, die sich in einem bestimmten Abstand gegenüber stehen (B5c). Es tritt immer dann auf, wenn in einem ursprünglich neutralen Objekt Ladungen leicht verschoben werden. So strömen beispielsweise Ca^{2+} -Ionen aus der Umgebung in eine Muskelzelle ein und lösen eine Kontraktion aus. Weil diese positiven Ladungen an anderer Stelle fehlen und dort eine negative „Restladung“ zurücklassen, hat das elektrische Feld in der Umgebung dieser Zelle dann die Struktur eines elektrischen Dipols.

Definition der elektrischen Feldstärke

Elektrische Feldlinien wurden so eingeführt, dass sie an jedem Punkt des Feldes mit der Krafrichtung auf eine positive Probeladung übereinstimmen. Daraus lässt sich eine quantitative Beschreibung entwickeln. Weil das Feld umso stärker ist, je größer die Kraft ist, die es auf die gleiche Probeladung ausübt, ist der Quotient aus dieser Kraft und der Probeladung eine sinnvolle Größe für die Stärke des elektrischen Feldes. Man spricht von der elektrischen Feldstärke \vec{E} .



Hier wird die Ladung mit q bezeichnet, um zu betonen, dass die Probeladung möglichst klein sein sollte. Andernfalls würde nämlich durch die Probeladung das betrachtete elektrische Feld merklich verändert. Die genaue Größe der Probeladung spielt hingegen keine Rolle: Experimentell lässt sich nachweisen, dass F_{el} und q zueinander direkt proportional sind; ihr Quotient ist also immer konstant.

$$\text{Elektrische Feldstärke: } \vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}$$

Für die Einheit von \vec{E} ergibt sich aus der Definition zunächst $[\vec{E}] = \frac{1\text{N}}{1\text{C}}$. Wir werden in Kapitel 6.3 sehen, dass dies gleichbedeutend ist mit der gebräuchlicheren Einheit $[\vec{E}] = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$. Beispiele für Größenordnungen gibt die Tabelle T1.

Situation/elektrisches Gerät	E in V/m
Sinnesorgane von Haien (minimale Empfindlichkeit)	$1 \cdot 10^{-6}$
Glühbirne (im Abstand von 30 cm)	5
Föhn (im Abstand von 30 cm)	80
Kühlschrank (im Abstand von 30 cm)	120
Hochspannungsleitung (1 m über dem Boden)	$1 \cdot 10^3$ bis $6 \cdot 10^3$

T1 Beispiele für elektrische Feldstärken

Die Feldstärke ist in hohem Maße abhängig von der Entfernung zu den felderzeugenden Ladungen. In den Feldlinienbildern ist das an der Dichte der Feldlinien zu erkennen. Besonders einfach ist der Fall des radialsymmetrischen Feldes. Um eine geladene Kugel (Ladungsmenge Q) herum nimmt die Feldstärke nach außen hin, also mit zunehmendem Radius r , ab. Eine genauere Untersuchung ergibt:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Die Größe $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ ist dabei eine universelle Naturkonstante und heißt elektrische Feldkonstante oder Permittivität des Vakuums.

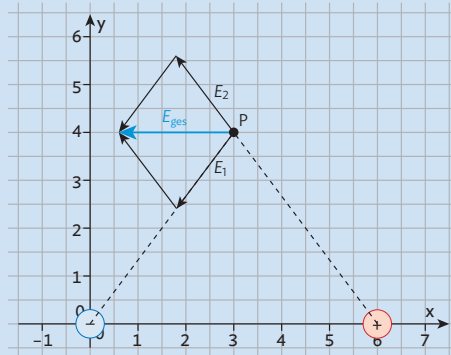
Die elektrische Feldstärke besitzt wie die elektrische Kraft eine Richtung, sie ist also eine vektorielle Größe. Feldstärken können deshalb auf die gleiche Weise wie Kräfte vektoriell addiert werden. Das ist hilfreich, um in komplizierteren Ladungsanordnungen zunächst die Feldstärken zu bestimmen, die von den Einzelladungen erzeugt werden. Aus ihnen ergibt sich dann die Gesamtfeldstärke.

Musteraufgabe

In einem Koordinatensystem befindet sich eine negative Ladung an der Stelle $Q_1(0/0)$ und eine betragsgleiche positive Ladung an der Stelle $Q_2(6/0)$. Der Punkt P befindet sich jeweils 5,0 cm von Q_1 und Q_2 entfernt; dort sind die Feldstärken, die die jeweiligen Ladungen hervorrufen, $E_1 = E_2 = 2,0 \text{ V/m}$. Bestimmen Sie graphisch Betrag und Richtung der Gesamtfeldstärke im Punkt P.

Lösung

Die Pfeile der Einzelfeldstärken \vec{E}_1 und \vec{E}_2 sind jeweils entlang der Verbindungslinien zwischen P und den Ladungen orientiert. Weil sie über die Kraft auf eine positive Probeladung definiert sind, zeigt \vec{E}_1 auf Q_1 zu und \vec{E}_2 von Q_2 weg. In einer Zeichnung wählt man z. B. den Maßstab $1 \frac{\text{V}}{\text{m}} \triangleq 1 \text{ cm}$. Dann erhält man \vec{E}_{ges} durch Pfeiladdition („Kräfteparallelogramm“). Der Betrag ist $E_{\text{ges}} = 2,4 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.




Ladungen in einem Koordinatensystem

i

Das allgemeine physikalische Prinzip heißt Superposition. Sie sind ihm schon mehrfach begegnet, z. B. bei zweidimensionalen Bewegungen oder bei der Interferenz von Wellen.

Arbeitsaufträge

- Erklären Sie die Eigenschaften elektrischer Feldlinien jeweils mit einer Skizze.
- Mit dem Mediencode gelangen Sie zu einer Simulation, mit der die elektrischen Feldlinien zu beliebigen Ladungsanordnungen dargestellt werden können.  [MC 67055-22](#)
 - Bestätigen Sie damit die Feldlinienbilder in Abbildung B5.
 - Erstellen Sie weitere Ladungsanordnungen. Skizzieren Sie zunächst den von Ihnen erwarteten Verlauf der Feldlinien und überprüfen Sie Ihre Hypothese mit der Simulation.
- Bestätigen Sie rechnerisch, dass mit den Angaben aus der Musteraufgabe der Betrag der beiden felderzeugenden Ladungen $Q = 5,6 \cdot 10^{-13} \text{ C}$ ist.
 - Bestimmen Sie damit die Beträge der Einzelfeldstärken in den Punkten A (3 | 0) und B (0 | 4).
 - Zeichnen Sie die in b) berechneten Feldstärkepfeile maßstabsgerecht in ein Koordinatensystem ein. Bestimmen Sie dann zeichnerisch Betrag und Richtung der Gesamtfeldstärke in den Punkten A und B.
- Eine geladene metallische Kugel (Radius R) erzeugt in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld. Direkt an der Kugeloberfläche lässt es sich berechnen durch $E = \frac{5,0 \cdot 10^2}{R^2} \text{ V} \cdot \text{m}$.
 - Ab einer Feldstärke von $3,0 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ können durch die Luft Funken überschlagen. Bestimmen Sie die Mindestgröße der Kugel so, dass dies nicht geschieht.
 - Begründen Sie durch Argumentation mit dem Feldlinienbild, dass die Gefahr eines Funkenüberschlags bei kleinen Kugeln höher ist als bei großen.



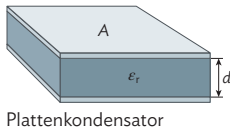
6.2 Kapazität

Kapazität

Jeder Leiter, der mit einem Pol einer Spannungsquelle verbunden wird, lädt sich auf. Die Kapazität C ist ein Maß dafür, wie viel Ladung bei einer bestimmten Spannung gespeichert werden kann. Man definiert deshalb:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Die Einheit der Kapazität ist: $[C] = \frac{1C}{1V} = 1F$ (Farad). Die Benennung erfolgte nach dem englischen Physiker Michael Faraday (1791–1867).



Plattenkondensator

Ein Bauteil für die Speicherung von elektrischer Ladung heißt Kondensator. Weil die gespeicherten Ladungen einen sehr geringen Betrag haben, liegen typische Kapazitäten von Kondensatoren im Bereich Pikofarad bis Mikrofarad.

Die Kapazität eines Kondensators hängt stark von seiner geometrischen Form ab. Einfach sind die Verhältnisse beim Plattenkondensator, bei dem sich zwei Metallplatten der Fläche A gegenüberstehen und durch einen kleinen Spalt der Breite d getrennt sind. Verändert man im Experiment diese beiden Größen, so findet man den Zusammenhang $C \sim \frac{A}{d}$. Die Proportionalitätskonstante ergibt sich wieder als die elektrische Feldkonstante ϵ_0 . Insgesamt gilt also:

Kapazität eines Plattenkondensators (luftgefüllt bzw. im Vakuum):

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$



Kapazitäten werden auch später wichtig bei der Modellierung von Nervenzellen. Dort befindet sich zwischen den „Kondensatorflächen“ allerdings das Membrangewebe. Die Formel muss dann um einen Faktor ϵ_r („Dielektrizitätszahl“) ergänzt werden: $C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$.

Musteraufgabe

Ein typischer Plattenkondensator für die Schule hat runde Platten mit einem Durchmesser von 26 cm. Berechnen Sie die Kapazität bei einem Plattenabstand von 2,0 cm.

Lösung

Der Radius der Platten beträgt $r = 13$ cm.

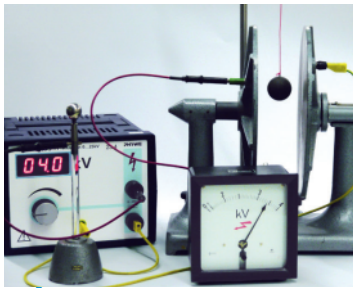
$$\begin{aligned} C &= \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \epsilon_0 \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{d} \\ &= 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot \frac{\pi \cdot (0,13m)^2}{0,02m} \\ &= 2,4 \cdot 10^{-11} F = 24 \text{ pF} \end{aligned}$$

Energie eines Kondensators

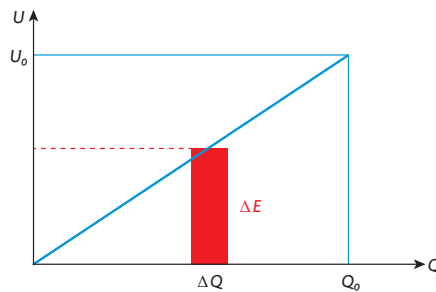
Von der Kapazität eines Kondensators hängt auch ab, wie viel Energie er speichern kann. Wir betrachten dazu das folgende Experiment (B1):

Im elektrischen Feld eines Plattenkondensators ist eine Kugel mit leitender Oberfläche aufgehängt und kann von einer Platte zur anderen schwingen. Wenn sie eine Platte berührt, lädt sie sich entsprechend auf und wird von der anders gepolten Platte angezogen. Beim Bewegen wird eine kleine Ladungsmenge ΔQ transportiert und die Ladung an den Platten verringert sich um diesen Betrag.

Die Energie des Kondensators nimmt ebenfalls ab, denn beim geschilderten Ladungstransport wurde eine Arbeit $W = U \cdot \Delta Q$ verrichtet. Wenn der Kondensator von der Spannungsquelle getrennt ist, verringert sich also bei jedem Hin- und Herschwingen der Kugel die Energie des Kondensators um $\Delta E = U \cdot \Delta Q$. Gleichzeitig wird jedoch auch die Plattenspannung U geringer. Das Diagramm in B1 zeigt die Situation: Spannung und Ladung am Kondensator sind direkt proportional zu-



B1 | Entladung eines Kondensators durch schrittweisen Ladungstransport



Das Diagramm enthält keine zeitliche Information. Beim Entladevorgang beginnt die Messwertaufnahme am rechten Ende der Ursprungsgeraden und verläuft dann bis zum Ursprung.

einander; die farbige Fläche gibt die Abnahme der Energie an. Die gesamte Änderung der Energie erhält man als Fläche unter dem Q - U -Graphen. Sie entspricht genau der Energie, die zuvor im Kondensator gespeichert war.

$$\text{Energieinhalt eines Kondensators: } E_{\text{Kond}} = \frac{1}{2} \cdot U_0 \cdot Q_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_0^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot U_0^2 \cdot C$$

Musteraufgabe

Der in der vorhergehenden Aufgabe betrachtete Plattenkondensator wird mit einer Spannung von $U_0 = 200 \text{ V}$ aufgeladen. Berechnen Sie die gespeicherte Energie.

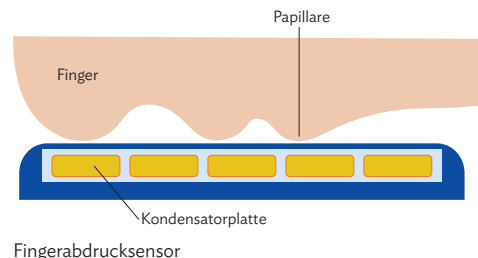
Lösung

Mit $C = 24 \text{ pF}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} E_{\text{Kond}} &= \frac{1}{2} \cdot U_0^2 \cdot C \\ &= \frac{1}{2} \cdot (200 \text{ V})^2 \cdot 24 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ J} \end{aligned}$$

Arbeitsaufträge

- 1) a) Berechnen Sie die Kapazität eines Kondensators mit Fläche $0,020 \text{ m}^2$ und Plattenabstand $0,010 \text{ m}$.
 b) Ein Dielektrikum erhöht die Kapazität des Kondensators aus a) um das 4-Fache. Geben Sie die zugehörige Dielektrizitätszahl an.
 c) Der Kondensator aus b) wird nun mit einer Spannung von 20 V betrieben. Berechnen Sie die Ladungsmenge, die der Kondensator maximal speichern kann.
- 2) a) Ein Elektrolytkondensator hat die Aufschrift „ $22\,000 \mu\text{F}$, 63 V “. Bestimmen Sie die im Kondensator gespeicherte Ladungsmenge und seinen Energieinhalt.
 b) Recherchieren Sie den Aufbau eines Elektrolytkondensators. Begründen Sie, dass bei seinem Einsatz die richtige Polung wichtig ist.
- 3) Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Fingerabdrucksensors. Er stellt einen Kondensator dar, bei dem eine „Platte“ durch die Hautrillen der Fingerspitze gebildet wird. Beschreiben Sie seine Funktionsweise; beziehen Sie sich dabei auf die Abbildung und auf die Formel für die Kapazität eines Plattenkondensators.

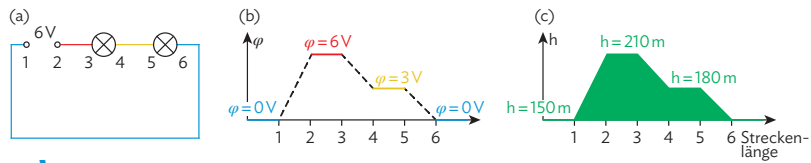




6.3 Potential und Feldstärke

Spannung und elektrische Feldstärke

Bereits in der 9. Jahrgangsstufe haben Sie einen weiteren elektrischen Begriff kennengelernt, den des elektrischen Potentials. Ausgehend von dem Wasserrutschenmodell oder einem ähnlichen Modell haben Sie die Vorstellung entwickelt, dass in einem Stromkreis die Elektronen durch die Spannungsquelle „angehoben“ werden und im weiteren Verlauf des Stromkreises wieder auf das Ausgangsniveau „zurückfallen“. Einen einfachen Fall zeigt B1. Längs eines Drahtes bleibt der Potentialwert φ dabei gleich, innerhalb der Spannungsquelle und der Glühlämpchen ändert er sich um einen Wert, der der Spannung am jeweiligen Bauteil entspricht: $\Delta\varphi = U$. Die Einheiten des Potentials und der Spannung sind also gleich, nämlich 1V.



B1 (a) Elektrischer Stromkreis, (b) Potentialverlauf, (c) mechanische Analogie

Das Potentialdiagramm in B1b kann analog gesehen werden zum Streckenprofil z. B. einer Bergwanderung (B1c). Die jeweils nach oben aufgetragenen Größen sind dabei ein Maß für die potentielle Energie der Ladung q bzw. der Masse m . Im Gravitationsfeld ist $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$, im elektrischen Feld längs der Schaltung ist $E_{\text{pot}} = q \cdot \varphi$.

Das gilt auch dann noch, wenn der Stromkreis an einer Stelle unterbrochen ist. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn eines der beiden Lämpchen in B1 durch einen Plattenkondensator ersetzt wird. Stromfluss kann in einer solchen Situation nur durch eine freie Ladung erfolgen, die sich von einer Platte zur anderen bewegt, genauso wie in Abbildung B1 im Kapitel 6.2. Die Energie der Ladung ändert sich um $\Delta E_{\text{pot}} = q \cdot \Delta\varphi = q \cdot U$. Diese Energie stammt aus dem elektrischen Feld; in ihm wirkt längs des gesamten Plattenabstands d die elektrische Kraft F_{el} . Die verrichtete Arbeit kann mit der Energieänderung gleichgesetzt werden:

$$F_{\text{el}} \cdot d = q \cdot U$$

Umstellen ergibt $\frac{F_{\text{el}}}{q} = \frac{U}{d}$; dabei steht auf der linken Seite die elektrische Feldstärke $E = \frac{F_{\text{el}}}{q}$.

Die elektrische Feldstärke im homogenen Feld eines Plattenkondensators hängt nur von der anliegenden Spannung U und dem Plattenabstand d ab. Es gilt:

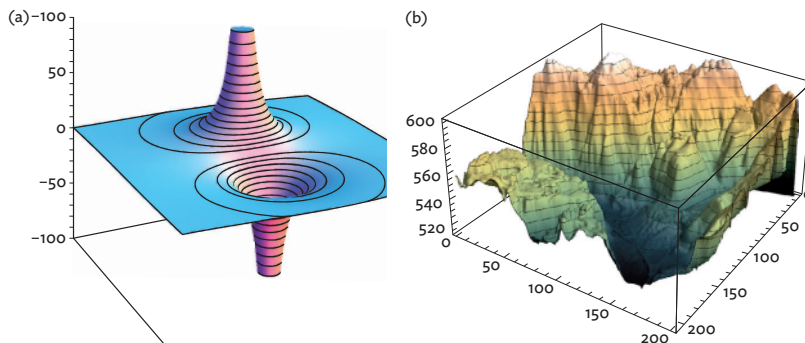
$$E = \frac{U}{d}$$

In allgemeinen elektrischen Feldern kann die Feldstärke aus der Potentialänderung $\Delta\varphi$ längs eines kurzen Wegstücks Δx bestimmt werden:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

Die Analogie in B1 kann auf zweidimensionale Situationen übertragen werden. Äquipotentiallinien entsprechen dabei den Höhenlinien auf einer Karte (B2).

Die Höhenlinien in B2b sind für Wanderer interessant, weil sie auf ihnen stets die gleiche potentielle Energie besitzen. Der genaue Zahlenwert dieser potentiellen



B2 (a) Darstellung des elektrischen Feldes eines Dipols durch Äquipotentiallinien und (b) Analogie mit Höhenlinien

Energie hängt vom Nullpunkt der Höhenmessung ab; für geographische Zwecke verwendet man meist den mittleren Meeresspiegel („Höhe über NN“).

Übertragen auf das elektrische Feld bedeutet das: Bewegungen auf den Äquipotentiallinien (d. h. bei konstantem φ) erfolgen ohne Energieänderung. Wie bei den Höhenlinien muss man zur konkreten Berechnung einen Bezugspunkt mit $\varphi = 0$ vereinbaren. In der Regel wählt man dafür eine Elektrodenfläche oder einen unendlich weit entfernten Punkt. Das Potential kann dann auch negativ werden.

Zusammenhang zwischen Feldlinien und Äquipotentiallinien

Rein anschaulich drückt sich die Stärke eines elektrischen Feldes in der „Steilheit“ des „Potentialgebirges“ aus. Es lässt sich auch mathematisch zeigen, dass die Feldlinien an jedem Punkt in die Richtung des stärksten „Gefälles“ zeigen. Dies ist diejenige Richtung, in der die Äquipotentiallinien die geringste Entfernung voneinander haben.

Feldlinien und Äquipotentiallinien stehen überall aufeinander senkrecht. Weil Feldlinien in Richtung der elektrischen Kraft zeigen, müsste es bei einem Schnittwinkel $\neq 90^\circ$ eine Kraftkomponente entlang der Äquipotentiallinie geben. Dies kann aber nicht sein, denn eine Äquipotentiallinie verhält sich wie ein Stück Draht, an dem überall die gleiche Spannung anliegt und längs dem es deshalb auch keine Kräfte auf die Ladungen gibt.

Arbeitsaufträge

- 1) Begründen Sie, dass sich die Einheit der elektrischen Feldstärke sowohl als $1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ schreiben lässt als auch als $1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.
- 2) Mit der Simulation in Kapitel 6.1, Aufgabe 2, lassen sich auch Äquipotentiallinien darstellen. Zeichnen Sie diese für Ihre Anordnungen aus 6.1 und bestätigen Sie, dass Feldlinien und Äquipotentiallinien sich stets rechtwinklig schneiden.
- 3) a) Erklären Sie, dass die Fallbeschleunigung g als „Gravitationsfeldstärke“ betrachtet werden kann.
b) Beschreiben Sie für die beiden Situationen in B2 jeweils die Bedeutung der Steigung in einem bestimmten Punkt.
c) Diskutieren Sie mit diesem Hintergrund die Grenzen der Analogie zwischen Äquipotentiallinien und Höhenlinien.

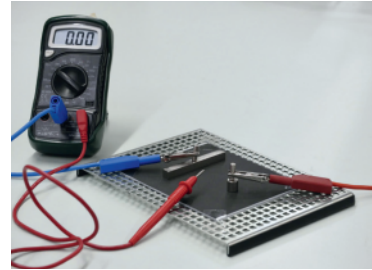
6.4 Schülerexperiment: Äquipotentiallinien eines Dipols

V1 Messverfahren zur Bestimmung des elektrischen Potentials

Zur Potentialbestimmung kann man sich den Zusammenhang zwischen Potential und Spannung zunutze machen: Spannungen in einem Stromkreis lassen sich leicht messen. Aus zwei gemessenen Spannungen ergibt sich eine Potentialdifferenz $U = \Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B$. Legt man nun eine beliebige Stelle zu $\varphi_B = 0$ fest, so ist durch diese Messvorschrift φ_A an allen Punkten A festgelegt.

Will man Anordnungen wie in B5 auf S. 113 untersuchen, wird man allerdings zwischen den Elektroden zunächst gar keine Spannung messen können, weil die beiden Anschlüsse voneinander isoliert sind. Nötig ist also eine schwach leitfähige Verbindung zwischen den felderzeugenden Elektroden und der Messstelle. Diese kann durch eine leitfähige Flüssigkeit (Ionenlösung) oder leitfähiges Papier hergestellt werden.

Auch normales Leitungswasser ist schwach leitfähig. Deshalb eignet sich für die Versuche hier auch ein feuchtes Papierhandtuch, das blasenfrei auf die Tischfläche gelegt und mit der Elektrodenanordnung in Kontakt gebracht wird. Für die Untersuchung eines elektrischen Dipols kann dabei ein 9-Volt-Block mit den Anschlüssen auf das Papierhandtuch gestellt werden.



Versuchsaufbau

Arbeitsauftrag

- Verbinden Sie die Enden einer Bleistiftmine mit den Polen einer 1,5-Volt-Batterie. Messen Sie die Spannung zwischen einem Pol der Batterie und verschiedenen Stellen längs der Mine. Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- Legen Sie auf ein mit Kohlenstoff imprägniertes Papier zwei parallele Metallstreifen und schließen Sie diese an eine Gleichspannungsquelle an. Eine Stahlplatte mit Isolierung als Unterlage kann helfen, um die Elektroden mit Neodymmagneten zu fixieren (unveränderliche elektrische und magnetische Felder beeinflussen sich gegenseitig nicht). Das elektrische Potential einer bestimmten Stelle auf dem Papier können Sie mit einem normalen Voltmeter messen. Geben Sie dazu die Positionen an, an denen Sie die beiden Messspitzen aufsetzen müssen. Beschreiben Sie auch die Veränderungen dieser Positionen, um das elektrische Potential einer weiteren Stelle zu messen. Vergleichen Sie Ihre Messwerte mit denen Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler und erklären Sie eventuelle Unterschiede.
- Positionen mit dem gleichen elektrischen Potential werden durch eine Äquipotentiallinie verbunden. Beschreiben Sie eine Vorgehensweise, mit der Sie zu möglichst aussagekräftigen Äquipotentialdarstellungen gelangen können.
- Wiederholen Sie die Messung mit verschieden geformten und unterschiedlich angeordneten Elektroden. Tragen Sie dann jeweils den Verlauf einiger Äquipotentiallinien ein. Dieser Versuch eignet sich für ein arbeitsteiliges Vorgehen in Ihrem Kurs.
- Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit denen des im Mediacode hinterlegten Simulationsprogramms.



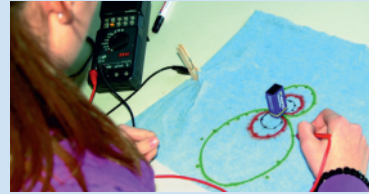
MC 67055-23

V2 Statischer Dipol

Ein Dipolfeld lässt sich sehr einfach mit einer Blockbatterie erzeugen. Es dient als erste Annäherung an die elektrischen Eigenschaften des menschlichen Herzens. Beim EKG wird dieses elektrische Feld durch festsitzende Elektroden an der Körperoberfläche erfasst.

Arbeitsauftrag

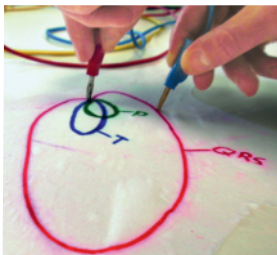
Stellen Sie eine 9-V-Blockbatterie mit den Kontakten nach unten in die Mitte eines feuchten Tuchs. Klemmen Sie mit einer Krokodilklemme das Kabel zur COM-Buchse eines Multimeters so an einer Tuchseite fest, dass die Verbindungslinie zur Batterie senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Kontakte der Batterie steht. Ermitteln Sie ähnlich wie in V1 die Äquipotentiallinien dieses statischen Batterie-Dipols.



Äquipotentiallinien eines statischen Dipols

V3 Dynamischer Dipol

Für dieses Experiment benötigen Sie ein Datenerfassungssystem, mit dem der zeitliche Verlauf der Spannung direkt aufgezeichnet werden kann. Sie können so die Aufnahme eines EKGs in einem Modellversuch nachvollziehen.



Mit den beiden Polen einer Spannungsquelle wird der dynamische Herz-Dipol im Modellversuch durch Abfahren der Vektorschleifen erzeugt.

Arbeitsauftrag

- Verfassen Sie eine knappe Zusammenstellung über die wesentlichen physikalischen Vorgänge im Laufe eines Herzschlags. Erklären Sie eine Möglichkeit, diese Vorgänge durch geeignete Messungen sichtbar zu machen. Verwenden Sie für diese Aufgaben das Informationsmaterial aus Kapitel 6.5.
 - Schneiden Sie aus Stoff eine ca. 50 cm große menschliche Figur mit abstehenden Armen und Beinen aus und befeuchten Sie sie mit Wasser. Malen Sie auf die Brust der Figur wie in der Abbildung die drei Schleifen, die von der Spitze des Summendipolvektors innerhalb eines Herzzyklus durchlaufen werden (B3 auf S. 124). Befestigen Sie dann die Elektroden eines Spannungssensors entsprechend der Ableitung II nach Einthoven an den Extremitäten der Figur.
 - Ein Pol einer Gleichspannungsquelle (ca. 9 V) wird auf den gemeinsamen Schnittpunkt der drei Schleifen gehalten. Erzeugen Sie dann den dynamischen Herz-Dipol, indem Sie mit dem anderen Pol nacheinander die Schleifen für P-Welle, QRS-Komplex und T-Welle nachfahren. Zeichnen Sie den Spannungsverlauf auf. Vergleichen Sie die gemessene „EKG-Kurve“ des Datenerfassungssystems mit dem Verlauf in B2 auf S. 123. Nennen Sie Gründe für die Abweichungen.
 - Wenn Sie über einen EKG-Sensor zu Ihrem Messwerterfassungssystem verfügen, können Sie auch ein (vereinfachtes) EKG Ihres eigenen Herzens aufnehmen. Ordnen Sie dort die einzelnen Bereiche den drei Schleifen zu.
- Bearbeiten Sie e) und f) mit der Anwendung „Vom Dipol zum EKG-Signal“.
- Verändern Sie die Richtung und den Betrag des Dipolvektors. Beschreiben Sie qualitativ den Zusammenhang dieser beiden Größen mit dem Spannungswert des EKG-Signals und gehen Sie dabei insbesondere auf die Lage der Projektionsachse ein.
 - Legen Sie für jede Erregungssituation Richtung und Betrag des Dipolvektors so fest, dass die entsprechenden Werte im EKG-Signal reproduziert werden. Begründen Sie die Richtung des Dipolvektors mit der dargestellten momentanen Erregungssituation des Herzgewebes.



MC 67055-24



Zelluläre Grundlagen des EKG-Signals

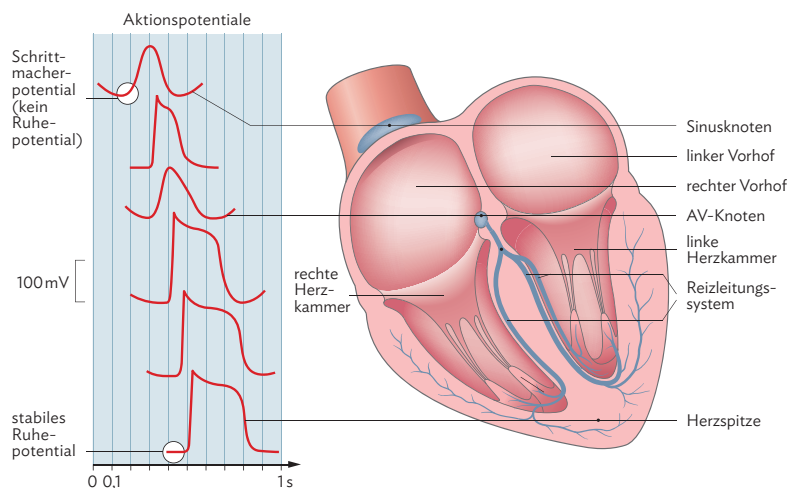
Der Zellinnenraum und der Zellaußenraum einer Herzmuskelzelle unterscheiden sich in der Konzentration von Ionen, insbesondere von Na^+ , Ca^{2+} und K^+ . Wie auch im Falle der Nervenzellen (Kapitel 9) ist die Zellmembran unterschiedlich gut durchlässig für diese Ionensorten. So stellen sich unterschiedliche Ionenkonzentrationen im Zellinnenraum und Zellaußenraum ein. Spezielle Membranproteine, die Ionen aktiv durch die Membran transportieren (z. B. die Na-K-Pumpe), sorgen dafür, dass diese Konzentrationsverhältnisse konstant bleiben und sich eine Potentialdifferenz („Ruhepotential“) einstellt. Wenn die Zellmembran elektrisch erregt wird, ändern sich die Ionendurchlässigkeiten und damit die Konzentrationsverhältnisse und die Potentialdifferenz in charakteristischer Weise („Aktionspotential“). Da benachbarte Herzmuskelzellen gegeneinander nicht isoliert, sondern über kleine Kanäle („Gap-Junctions“) leitend verbunden sind, breiten sich elektrische Erregungen über den gesamten Herzmuskel aus. Die erwähnten Membranproteine sorgen anschließend wieder für eine Wiederherstellung des Ruhepotentials.

Erregungsausbreitung und Kontraktion

Herzmuskelzellen ziehen sich bei elektrischer Erregung zusammen und sind so für die Kontraktion des Herzmuskels und damit für seine Pumpwirkung verantwortlich („elektromechanische Kopplung“). Die elektrische Erregung des Herzmuskels hat ihren Ursprung im Sinusknoten im rechten Vorhof, einem Bereich spezialisierter Zellen (dem „Reizleitungssystem“), die kein Ruhepotential ausbilden, sondern laufend Aktionspotentiale generieren. Das Aktionspotential breitet sich zuerst über den rechten und linken Vorhof aus und führt zur deren Kontraktion. Danach wird es über den AV-Knoten und das Reizleitungssystem sehr schnell zur Herzspitze geleitet, wo es auf die Herzmuskelzellen übergeht, sich in Richtung Herzbasis über beide Herzkammern ausbreitet und deren Kontraktion „von unten nach oben“ bedingt, sodass das Blut aus den Herzkammern herausgepumpt wird. Die elektrische Erregung hat für jeden Gewebetyp eine charakteristische Form (B1).



Die Bezeichnung der Herzkammern und Vorhöfe (links, rechts) erfolgt aus Sicht des untersuchten Menschen; die Zeichnung hier gibt die Lage aus Sicht des Untersuchenden an.



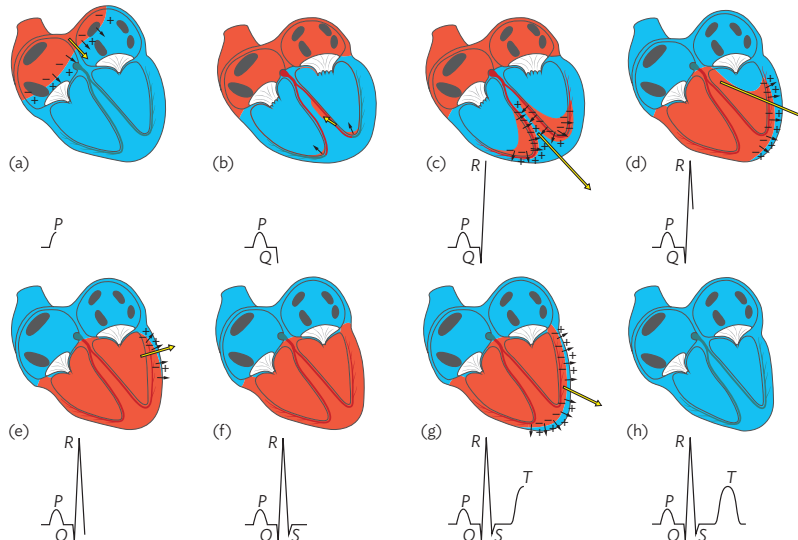
B1 Aktionspotentiale unterschiedlicher Bereiche des Herzens; das Diagramm zeigt auch die zeitlichen Verzögerungen bei der Erregungsausbreitung.

Das Herz als dynamischer Dipol

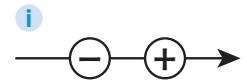
Befindet sich eine Herzmuskelzelle im nicht erregten Zustand, so ist ihr Außenbereich aufgrund der hohen Konzentration von Na^+ -Ionen elektrisch positiv geladen. Beim Ausbilden eines Aktionspotentials ändern sich die Ionenverhältnisse zwischen Innen- und Außenbereich der Zelle so, dass die Spannung an der Zellmembran ihr Vorzeichen ändert. Der Zellaußenbereich ist dann negativ geladen. Breitet sich also eine Erregungsfront über den Herzmuskel aus, so grenzen sich die gerade erregten, negativ geladenen Zellaußenbereiche scharf von den noch nicht erregten, positiv geladenen Bereichen ab.

Ein eng benachbartes Paar von positiven und negativen Ladungen lässt sich physikalisch als elektrischer Dipol beschreiben (B5c auf S. 113). Man stellt es abgekürzt als Dipolvektor dar, der vom negativen zum positiven Ladungsschwerpunkt zeigt. Die einzelnen Dipole an der Erregungsfront können mittels Pfeiladdition überlagert werden. Auf diese Weise erhält man einen resultierenden Dipolvektor aller Zellen in der unmittelbaren Umgebung der Erregungsfront. Er weist grob von der Erregungsfront (negativer Ladungsschwerpunkt) zu den nicht erregten Zellbereichen (positiver Ladungsschwerpunkt).

Während sich die Erregungsfront im Laufe eines Herzzyklus über den kompletten Herzmuskel bewegt und dabei zu dessen Kontraktion führt, ändert der resultierende Dipolvektor („Summendipolvektor“) permanent seinen Ursprung, seine Richtung im dreidimensionalen Raum und auch seinen Betrag. Durch Richtung und Betrag des Summendipolvektors ist die Erregungssituation des Herzens zu jedem Zeitpunkt charakterisiert. Abbildung B2 zeigt die Erregungssituationen des Herzmuskels zu verschiedenen Punkten während eines Herzzyklus zusammen mit den entsprechenden Summendipolvektoren.



B2 Im dreidimensionalen Fall ändert der Summendipolvektor ständig seinen Ursprung, seine Richtung und seinen Betrag. Darunter: EKG-Verlauf in der Ableitung II nach Einthoven mit der medizinischen Bezeichnung der charakteristischen Punkte. Rot gekennzeichnet sind die erregten Bereiche.



i Elektrischer Dipolvektor. Außerhalb der Ladungsschwerpunkte stimmt seine Richtung mit der des resultierenden elektrischen Feldes überein. Sein Betrag ist umso größer, je größer die beiden Ladungen sind und je weiter sie auseinander liegen.

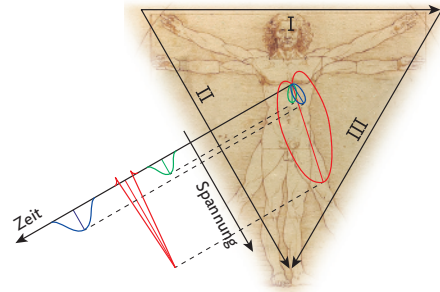


EKG-Messung als Vektorprojektion

Das durch den Summendipol erzeugte elektrische Feld auf der Körperoberfläche ist die Grundlage für die EKG-Messung. Das EKG-Signal ist die zeitabhängige Potentialdifferenz (d. h. die Spannung) zwischen zwei Messpunkten auf der Körperoberfläche.

Verschiebt man alle nacheinander auftretenden Summendipolvektoren in einen gemeinsamen Ursprung, so beschreibt ihre Spitze im Verlauf eines Herzzyklus eine Bahn im dreidimensionalen Raum. Sie besteht aus drei Schleifen, welche den charakteristischen Merkmalen einer typischen EKG-Kurve zugeordnet werden können. Abbildung B3 zeigt die drei Vektorschleifen im Zentrum eines Dreiecks, das von den Hand- und Fußgelenken gebildet wird.

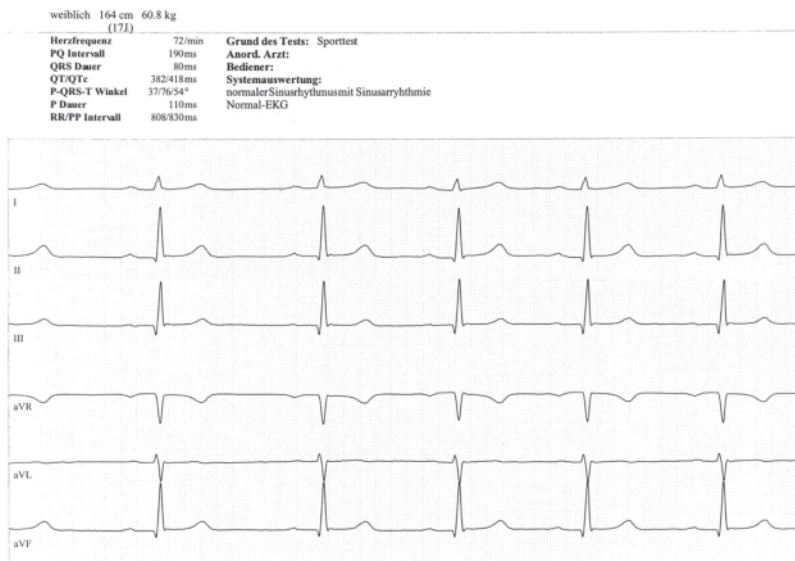
Bei der einfachsten Form eines EKG misst man die Spannung zwischen jeweils zwei Eckpunkten in diesem Dreieck; dort liegen an der zu untersuchenden Person Elektroden an. Die momentanen Spannungswerte ergeben sich dabei anschaulich als Projektion des Summendipolvektors auf die Verbindungslinie dieser Messelektroden. Dabei werden positive Spannungen gemessen, wenn die Vektorspitze des projizierten Vektors auf den positiven Pol der Messung zeigt (linker Knöchel in B3). Vektorprojektionen, deren Spitze vom positiven Pol weg zeigt, führen zu negativen Messwerten. Der Betrag der gemessenen Spannung ist umso größer, je stärker parallel der Summendipolvektor zur Messachse orientiert ist. Steht der Summendipolvektor senkrecht auf dieser Linie, so wird keine Potentialdifferenz gemessen.



B3 | Während einer Herzaktion durchläuft der Summendipolvektor drei Schleifen. Das EKG-Signal ergibt sich als Projektion der Summendipolvektoren auf die Verbindungslinie der Messelektroden.

In der medizinischen Praxis wurden definierte Messpunkte festgelegt; die EKG-Messungen zwischen diesen Punkten werden als Ableitungen bezeichnet. Bei den Einthoven-Ableitungen I bis III (nach Willem Einthoven, Nobelpreis für Medizin 1924) wird die Potentialdifferenz bei I zwischen linkem (Pluspol „+“) und rechtem Handgelenk (Minuspol „-“), bei II zwischen linkem Knöchel (+) und rechtem Handgelenk (-) und bei III zwischen linkem Knöchel (+) und linkem Handgelenk bestimmt. Das klinische EKG in Abbildung B4 zeigt neben den drei Ableitungen nach Einthoven noch drei weitere Extremitätenableitungen (nach Goldberger: aVR, aVL, aVF). Außerdem sind Ableitungen mit Elektroden im Brustbereich (nach Wilson: V1-V6) gebräuchlich. Sie entsprechen zusätzlichen Projektionen des Summendipolvektors, mit deren Hilfe weitere Informationen über den lokalen Zustand des Herzgewebes gewonnen werden können.

Die Beschreibung der elektrischen Aktivität des Herzens als dreidimensionaler elektrischer Dipolvektor ist ein physikalisches Modell des Herzens. Es enthält nicht alle biologischen Details. Weil aber alle EKG-Messungen stets an der Körperoberfläche, d. h. in größerer Entfernung vom Herzen, durchgeführt werden, ist die Betrachtung eines einzigen Summendipolvektors ausreichend.



B4 Die drei Abteilungen nach Einthoven (oben) bzw. Goldberger (unten) entsprechen unterschiedlichen Projektionen der Dipolvektorschleifen. Sie enthalten wichtige Informationen über den Zustand des Herzmuskels.

Methode

Modellierung von biologischen Sachverhalten

Eine physikalische Modellierung versucht, die wesentlichen Aspekte von biologischen Objekten und deren Wechselwirkungen untereinander mit Konzepten der Physik zu beschreiben. Dabei sind oftmals Details des biologischen Objekts nicht bekannt bzw. werden bei der Modellbildung außer Acht gelassen. Wie der Schatten eines Objekts, so ist eine Modellvorstellung nur ein informationsreduziertes Abbild des eigentlichen Objekts und nicht in der Lage, sämtliche Eigenschaften des Objekts zu beschreiben bzw. zu erklären. Jedes Modell hat somit seine Grenzen.

Das ist aber kein Nachteil. In der Biologie ist es sogar sinnvoll, denn die Vielzahl von Details verstellt oft den Blick auf die wesentlichen Prinzipien und Funktionsweisen. Es hat sich bewährt, zunächst eine möglichst starke Vereinfachung vorzunehmen und die Konsequenzen (z. B. Werte für die Messgrößen) in diesem Modell zu betrachten. Wenn sie ausreichend nahe an den tatsächlich im Experiment ermittelten Werten liegen, dann ist das Modell für den gewählten Zweck brauchbar. Sollen Feinheiten in den experimentellen Resultaten ebenfalls erklärt werden, dann muss die Modellierung genauer erfolgen, z. B. indem weitere biologische Details im Modell abgebildet werden. Das Modell wird dann genauer, es wird aber auch schwieriger, damit zu arbeiten.

Auf einer weiteren Ebene sind auch alle physikalischen Theorien (z. B. Newton'sche Mechanik, Quantenphysik, Relativitätstheorie) theoretische Modelle, d. h. sie machen uns bestimmte Aspekte unserer erfahrbaren Umgebung zugänglich und beschreibbar, bleiben aber immer nur mehr oder weniger stimmige und unvollständige Abbilder der Realität.



7

Magnetische Felder

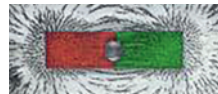
Materialien zu Kapitel 7.1 und 7.2

► M1 Einstieg: Magnetische Felder

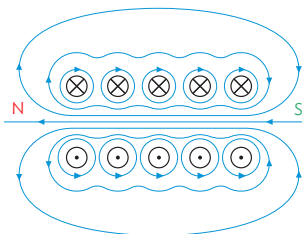
Das magnetische Feld von Permanentmagneten lässt sich mit Hilfe von Eisenfeilspänen darstellen. Dazu wird der Magnet zunächst unter eine Glasscheibe gelegt und diese dünn mit Eisenspänen bestreut. Durch leichtes Klopfen auf die Glasscheibe richten sich die Eisenspäne im Magnetfeld aus.

Beachten Sie, dass das Magnetfeld eines Magneten im ganzen Raum verläuft, im Experiment aber nur das Feld in einer Ebene dargestellt wird.

Auch ein stromdurchflossener Leiter erzeugt ein magnetisches Feld. Im Allgemeinen ist dieses Feld sehr schwach. Um diese Art eines Magneten zu nutzen,



Feld eines Stabmagneten



Spule als Elektromagnet (Querschnitt)

verwendet man deshalb meist eine Spule. Dazu umwickelt man einen Eisenkern mit dem Leiter. Dadurch können sehr starke Magnetfelder entstehen, die den zusätzlichen Vorteil besitzen, dass sie ein- und ausgeschaltet werden können.

Arbeitsauftrag

- a) Führen Sie den Versuch für einen Stab- und einen Hufeisenmagneten durch und skizzieren Sie die jeweiligen Felder. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit der Simulation (Mediencode).



MC 67055-25

- ▼ Untersuchen Sie das Magnetfeld eines Elektromagneten und vergleichen Sie es mit dem des Stabmagneten. Nutzen Sie für Ihr Experiment einen Eisenkern, der mit einem stromdurchflossenen Leiter umwickelt ist.
- b) Beschreiben Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede eines elektrischen und eines magnetischen Feldes.

► M2 Einstieg: Magnetotaktische Bakterien

Es gibt viele verschiedene Lebewesen, die Magnetfelder wahrnehmen können; zu ihnen zählen magnetotaktische Bakterien. Diese Bakterien leben im schlammigen Grund von Gewässern, da sie dort eine ganz bestimmte, geringe Sauerstoffkonzentration vorfinden, die sie zum Überleben brauchen. Ihren Weg in den schlammigen Grund finden die Bakterien, indem sie den Magnetfeldlinien der Erde folgen, die – fern vom Äquator – schräg zur Erdoberfläche verlaufen.

Die magnetotaktischen Bakterien besitzen lange Ketten von Nanopartikeln aus Magnetit (Fe_3O_4), sogenannte Magnetosomen, die sich im äußeren Magnetfeld ausrichten können. Dadurch drehen sich die Bakterien in Richtung des Erdmagnetfeldes und können sich sehr effektiv in die optimale Wassertiefe bewegen.



Das Bakterium *Magnetospirillum magnetotacticum* mit Magnetosomen

Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie nach weiteren Tieren, die sich am Erdmagnetfeld orientieren, und beschreiben Sie den Nutzen, den diese Tiere daraus ziehen.
- Das Erdmagnetfeld verläuft fern vom Äquator schräg in die Erdoberfläche hinein. Begründen Sie dies durch eine Skizze des gesamten Erdmagnetfelds. Erklären Sie dann mit dieser Skizze, dass es zwei unterschiedliche Varietäten der magnetotaktischen Bakterien gibt, je eine auf der Nord- und eine auf der Südhalbkugel.

Materialien zu Kapitel 7.3**► M3 Lernaufgabe: Therapie mit ionisierender Strahlung**

In der Medizin werden Ionenstrahlen zur Diagnose und Behandlung von Krankheiten verwendet. Die Ionen werden mithilfe von elektrischen und magnetischen Feldern beschleunigt, gebündelt und abgelenkt, so dass energiereiche Ionenstrahlen entstehen.

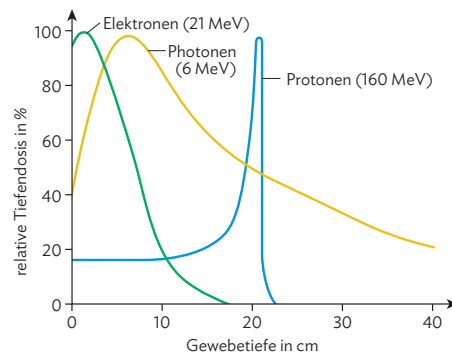
In der Tumorbehandlung ist die Bestrahlung neben Operation und Chemotherapie eine gängige Therapieform. 70 % der Krebspatienten werden operiert, 50 % bis 60 % bekommen eine Chemo- und 50 % bis 60 % eine Strahlentherapie. Somit werden häufig mehrere Therapiemethoden kombiniert angewendet.

Bei der Bestrahlung nutzt man die Tatsache, dass Krebszellen nicht so gut regenerieren wie gesundes Gewebe. Zunächst wird der Tumor kurzzeitig mit geringer Energiedosis, d.h. ans Gewebe abgegebener Energie pro Masse, bestrahlt. Bis zur nächsten Bestrahlung erholt sich das gesunde Gewebe besser als die Krebszellen. In der nächsten Bestrahlung wird das Tumorgewebe weiter geschwächt. Der Vorgang wird über einen längeren Zeitraum wiederholt. Diese Art der Bestrahlung nennt man „fraktionierte Bestrahlung“.

Zur Bestrahlung müssen die Strahlenart, die Energie der Strahlung und die an den Körper abgegebene Energiedosis so gewählt werden, dass möglichst viel Energie an das Tumorgewebe abgegeben wird und dieses zerstört oder zumindest dessen Wachstum eingeschränkt oder gestoppt wird. Dabei soll das gesunde Nachbargewebe möglichst wenig geschädigt werden und die Strahlenspätfolgen sollen gering sein. Um das optimal planen zu können, muss man wissen, wie Strahlung vom Körper absorbiert wird und wie weit sie eindringen kann. Dazu betrachtet man die Tiefendosisprofile verschiedener Teilchen. Mit der Tiefendosis bezeichnet man die Energiedosis, die in einer bestimmten Gewebetiefe im Körper abgegeben wird. Sie ist einerseits von der Art der Strahlung abhängig, andererseits auch von der Energie der Strahlung.

Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie zur „fraktionierten Bestrahlung“ und erstellen Sie eine Präsentation dazu. Gehen Sie auch auf mögliche Nebenwirkungen ein.
- Beurteilen Sie die Eignung der Strahlenarten in der Abbildung für eine Tumorbehandlung. Berücksichtigen Sie dabei verschiedene Kriterien.
- Begründen Sie, dass mithilfe einer Protonenbestrahlung eine gezielte Behandlung von Hirntumoren möglich ist, bei einer Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen hingegen nicht.



Tiefendosisprofile von Photonen- und Teilchenstrahlung im Vergleich. Der genaue Verlauf ist abhängig von den jeweiligen Energien.

7.1 Magnetische Flussdichte und Lorentzkraft



Elektrische Feldstärke E
Kraft F_{el} auf eine Ladung q :

$$E = \frac{F_{el}}{q}$$

Einheit: $\frac{V}{m} = \frac{N}{C}$

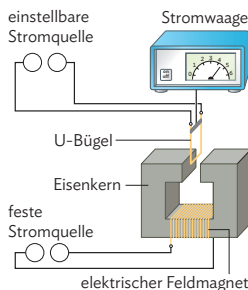


Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist benannt nach dem serbisch-amerikanischen Physiker Nikola Tesla (1856–1943).



Beispiele für Flussdichtewerte:

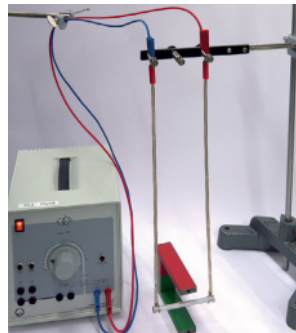
- Gehirnaktivität 10^{-13} T
- Erdmagnetfeld 0,05 mT
- Magnete und Spulen in Schulen < 1 T
- Starkmagnete in Forschung und Technik bis zu 100 T
- Neutronensterne 10^8 T



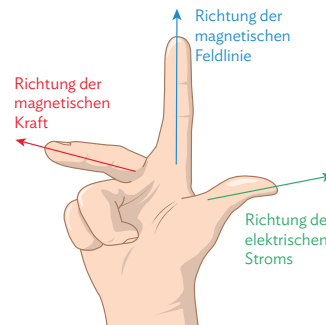
B3 Die Stromwaage misst die Kraft F_m auf das Leiterstück im homogenen Magnetfeld.

Magnetische Flussdichte

Richtung und Stärke eines Magnetfelds lassen sich anschaulich im Feldlinienbild angeben (M1). Daraus lässt sich jedoch keine quantitative physikalische Größe entwickeln. Stattdessen knüpft man an die Definition der elektrischen Feldstärke in Kapitel 6.1 an. Weil jedoch keine „magnetischen Ladungen“ existieren, quantifiziert man die Stärke des zu vermessenden Magnetfeldes stattdessen über die Kraft F , die ein gerader Leiter erfährt, durch den ein Strom der Stärke I fließt (B1) und der senkrecht zu den Feldlinien verläuft.



B1 Fließt Strom durch ein Leiterstück senkrecht zu den Magnetfeldlinien, so wird es ausgelenkt.



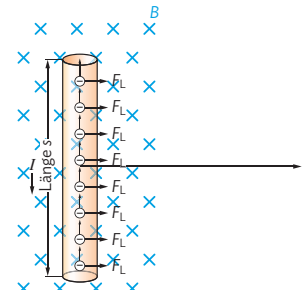
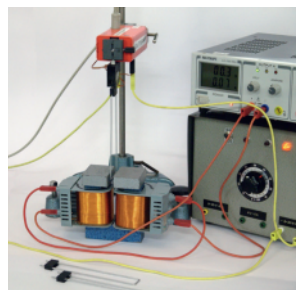
B2 Die Richtung der Auslenkung (= Krafrichtung) lässt sich mit der Drei-Finger-Regel bestimmen.

Besser als mit der Leiterschaukel lässt sich die magnetische Kraft F_m mit einer sogenannten Stromwaage messen (B3). Der Betrag von F_m hängt von der Stärke des Magnetfeldes ab. Außerdem findet man, dass F_m direkt proportional zur Stromstärke I (bei konstanter Drahtlänge) und direkt proportional zur Länge s des Leiterstücks ist (bei konstanter Stromstärke).

Es ist deshalb sinnvoll, als neue Größe die magnetischen Flussdichte B zu definieren:

$$\text{Magnetische Flussdichte: } B = \frac{F_m}{I \cdot s} \quad [B] = 1 \frac{N}{Am} = 1 \frac{Vs}{m^2} = 1 \text{ T (Tesla)}$$

Ihr Betrag gibt die Stärke des Magnetfelds an. Ihre Richtung entspricht der der magnetischen Feldlinien (M1). \vec{B} wird als vektorielle Größe definiert; die Vektoren \vec{I} , \vec{B} und \vec{F}_m sind verknüpft über die Drei-Finger-Regel der rechten Hand (B2).



B4 Kräfte auf bewegte Leitungselektronen im Magnetfeld, stark vereinfachend ist $N = 8$.

Die Lorentzkraft

Die in dem Versuch von B3 makroskopisch messbare Kraft F_m auf den stromführenden Leiter im Magnetfeld ist die Summe der Kräfte, die die Leitungselektronen erfahren. Wenn sich im Leiter N Elektronen befinden, gilt $F_m = N \cdot F_L$ (B4). Die Kraft auf ein einzelnes Elektron heißt Lorentzkraft F_L .

Entscheidend für die Stromstärke I sind jeweils die Ladungen e (Ladung eines Elektrons; Elementarladung), die sich mit der Geschwindigkeit v durch den Leiter der Länge s bewegen. In der Zeit $\Delta t = \frac{s}{v}$ durchläuft die Ladung $Q = N \cdot e$ den Leiter.

Aus der Definition der Flussdichte folgt: $F_m = N \cdot F_L = B \cdot I \cdot s$. Mit $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{N \cdot e}{\Delta t}$ ergibt sich $N \cdot F_L = B \cdot \frac{N \cdot e}{\Delta t} \cdot v \cdot \Delta t$, nach Vereinfachen also $F_L = B \cdot e \cdot v$.

Für beliebige bewegte Ladungen der Größe q ist die Lorentzkraft: $F_L = q \cdot v \cdot B$.

Das bedeutet: Bewegt sich eine Ladung vom Betrag q mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu den Feldlinien eines Feldes der Flussdichte B , so erfährt sie die Lorentzkraft vom Betrag $F_L = q \cdot v \cdot B$. Die Richtung von F_L ergibt sich für positive bewegte Ladungen aus der Drei-Finger-Regel der rechten Hand (B2), denn die dort eingezeichnete Stromrichtung entspricht der Bewegungsrichtung einer positiven Ladung. Bewegen sich negative Ladungen, z. B. Elektronen, in einem Draht, so muss der Daumen der rechten Hand entgegen der Geschwindigkeitsrichtung weisen. Bei einer Bewegung der Ladung parallel zu den Feldlinien wirkt keine Lorentzkraft.

Musteraufgabe

Ein waagrecht Draht der Masse $m = 50 \text{ g}$ und der Länge $s = 1,0 \text{ m}$, durch den der Strom $I = 30 \text{ A}$ fließt, wird von einem Magnetfeld in der Schwebe gehalten. Berechnen Sie die Stärke des Magnetfeldes.

Lösung

$$F_G = F_m$$

$$m \cdot g = B \cdot I \cdot s$$

$$B = \frac{m \cdot g}{I \cdot s} = \frac{0,050 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}}{30 \text{ A} \cdot 1,0 \text{ m}} = 0,016 \text{ T}$$

Arbeitsaufträge

- Berechnen Sie die Stromstärke, die durch ein Leiterstück der Länge $s = 0,30 \text{ m}$ fließt, wenn darauf in einem Magnetfeld, das senkrecht zum Leiter orientiert ist und die Flussdichte $B = 0,65 \text{ T}$ hat, die Kraft $F_m = 2,5 \text{ N}$ wirkt.
- Bei einem Experiment analog zu B3 werden keine Leiterröhmchen, sondern rechteckige Spulen (Spulenbreite 5 cm) in das homogene Magnetfeld eingebracht. Zwei Durchführungen eines solchen „Tauschspulenexperiments“ liefern (1) mit 50 Windungen bzw. (2) mit 100 Windungen die folgenden Messwerte:

I/A	0,00	0,25	0,50	0,75	
F/mN	0,0	2,5	4,0	6,0	(1)
F/mN	0,0	4,5	7,5	13	(2)

Ermitteln Sie die Flussdichte des Magnetfeldes.

- Mit einer Stromwaage wird die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter gemessen (B3). Beschreiben Sie die drei Größen, die im Experiment variiert werden können, um die Kraft F zu vergrößern bzw. zu verkleinern. Gehen Sie auf die Möglichkeiten ein, die Größen jeweils im Versuchsaufbau zu variieren.
- Begründen Sie, dass auf eine ruhende Ladung im Magnetfeld keine Kraft wirkt.



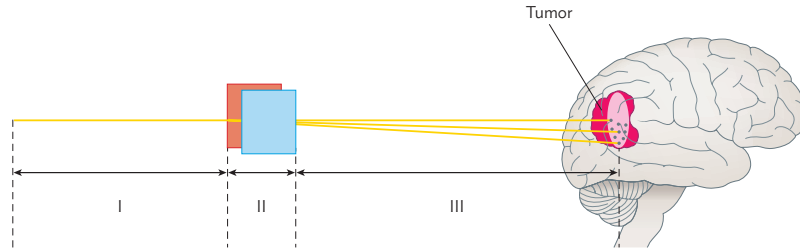
7.2 Bewegung geladener Teilchen

Einsatz geladener Teilchen in der Strahlentherapie

Die Strahlentherapie arbeitet mit elektromagnetischer Strahlung wie z. B. Röntgenstrahlung (Kapitel 8). Aber auch Teilchenstrahlen werden verwendet, um Krebszellen gezielt zu zerstören (B1). Dabei kommen geladene Teilchen wie Elektronen, Protonen oder auch positive Kohlenstoff-Ionen zum Einsatz.



Die Geschwindigkeit bzw. die Energie der Teilchen bestimmt die Eindringtiefe. Diese ist entscheidend, um möglichst nur den Tumor zu treffen und die Umgebung weitgehend zu verschonen.

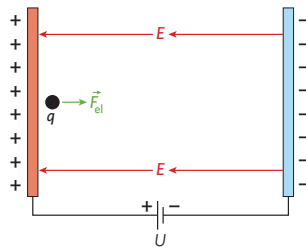


B1 | Geladene Teilchen treffen mit einer bestimmten Geschwindigkeit exakt den Ort des Tumors.

Um den Tumor des Patienten exakt zu treffen, müssen zuerst geladene Teilchen erzeugt, dann auf einen bestimmten Geschwindigkeitsbetrag und anschließend in eine genau bestimmte Richtung gebracht werden.

Bewegung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Längsfeld

Um den Betrag der Geschwindigkeit geladener Teilchen zu beeinflussen, dient ein Plattenkondensator. Im Inneren des Plattenkondensators sind die elektrischen Feldlinien parallel und gleichgerichtet, d. h. es herrscht ein homogenes elektrisches Feld (Kapitel 6.1). Die elektrische Feldstärke E kann mit $E = \frac{U}{d}$ berechnet werden. Dabei sind U die angelegte Spannung und d der Plattenabstand.



Im homogenen elektrischen Feld wirkt auf ein Teilchen mit der Ladung q überall die konstante elektrische Kraft $F_{el} = q \cdot E$ (B2). Hat es eine negative Ladung, so wirkt die Kraft entgegen der elektrischen Feldlinien; hat es positive Ladung, so wirkt die Kraft in Richtung der elektrischen Feldlinien. Hatte das Teilchen bereits eine Anfangsgeschwindigkeit, wird der Geschwindigkeitsbetrag kleiner bzw. größer, ohne Anfangsgeschwindigkeit wird das Teilchen entsprechend in die eine oder andere Richtung beschleunigt.

B2 | Auf ein positiv geladenes Teilchen im Kondensator wirkt eine Kraft F_{el} .

Beim Verschieben des geladenen Teilchens um einen bestimmten Weg s längs der elektrischen Feldlinien ändert sich die potentielle Energie des geladenen Teilchens um den Betrag $E_{pot} = F_{el} \cdot s$, da Kraft und Weg parallel sind und die Kraft konstant bleibt. Bei einer Verschiebung senkrecht zu den Feldlinien, also auf den Äquipotentiallinien, ändert sich die potentielle Energie nicht (Kapitel 6.2).

In der Situation von B2 hat das geladene Teilchen auf der linken Kondensatorplatte eine potentielle Energie vom Betrag $E_{pot} = F_{el} \cdot d = q \cdot E \cdot d = q \cdot U_B$. Dabei sind F_{el} die elektrische Kraft, q die Ladung des Teilchens, E die elektrische Feldstärke, d der Plattenabstand und U_B die Beschleunigungsspannung (= angelegte Spannung am Kondensator). Der beliebig wählbare Nullpunkt der potentiellen Energie wurde dabei auf die rechte Kondensatorplatte gelegt.



Hier finden Sie genauere Informationen, wie ein Elektronenstrahl erzeugt wird:



MC 67055-26



In der 9. Klasse haben Sie diese Situation in Analogie zur Höhenenergie im Gravitationsfeld betrachtet: $E_h = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$.

Startet das geladene Teilchen auf einer Platte mit der Geschwindigkeit $v = 0$ in Richtung der gegenüberliegenden Kondensatorplatte, wird dabei der Betrag der Geschwindigkeit größer und entsprechend auch die kinetische Energie E_{kin} . Gleichzeitig nimmt die potentielle Energie E_{pot} im elektrischen Feld ab. Nach dem Energieerhaltungssatz ist die Gesamtenergie am Ende und die Gesamtenergie am Anfang gleich:

$$\text{Gesamtenergie } E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$$

$$\text{am Anfang: } E_{\text{ges}} = 0 + E_{\text{pot}} = q \cdot U_B \quad \text{am Ende: } E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + 0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$\text{Also gilt: } \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = q \cdot U_B \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_B}{m}}$$

v ist der Geschwindigkeitsbetrag nach Durchlaufen des Kondensators. Dieser kann für ein Teilchen der Ladung q und der Masse m durch die angelegte Spannung U_B am Kondensator variiert werden. Je größer die Masse des Teilchens ist, umso geringer ist bei fest angelegter Beschleunigungsspannung der Geschwindigkeitsbetrag v .

In einem elektrischen Längsfeld kann der Geschwindigkeitsbetrag v eines geladenen Teilchens verändert werden. Zur Berechnung von v kann der Energieerhaltungssatz verwendet werden. Beim Start aus der Ruhe ist

$$v_{\text{Ende}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_B}{m}}$$



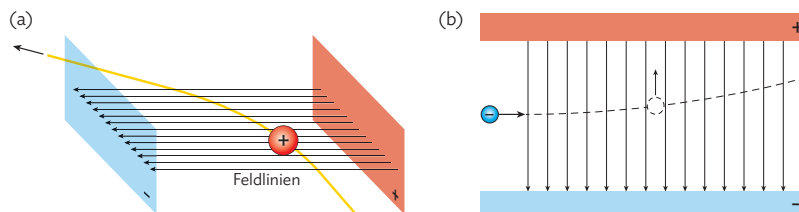
Hier finden Sie
weitere
Informationen:



MC 67055-27

Bewegung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Querfeld

Schießt man geladene Teilchen nicht entlang der Feldlinien in den Kondensator ein, sondern senkrecht dazu, so ändern sie ihre Flugrichtung. Auf sie wirkt ebenfalls die elektrische Kraft F_{el} in Richtung der Feldlinien; die Krafrichtung stimmt jetzt aber nicht mehr mit der Bewegungsrichtung überein. Als Folge werden positive Ladungen in Richtung auf die negative Platte abgelenkt (B3a) und negative Ladungen in Richtung auf die positive Platte (B3b).

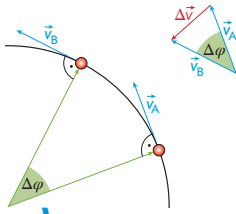


B3 | Ablenkung geladener Teilchen im elektrischen Querfeld nach links (a) bzw. nach oben (b)

In einem elektrischen Querfeld kann die Richtung der geladenen Teilchen beeinflusst werden.



7.2 Bewegung geladener Teilchen



B4 Kreisbewegung

i $\Delta \vec{v}$ und $\Delta \vec{F}$ zeigen laut dem Newton'schen Bewegungsgesetz immer in die gleiche Richtung. Bei einer Kreisbewegung muss also eine Kraft in Richtung Kreismittelpunkt wirken. Diese Kraft wird Zentripetalkraft genannt:

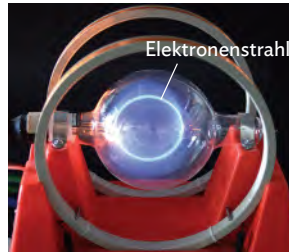
$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$$
$$\vec{F}_Z \perp \vec{v}$$

m : Masse des Körpers
 v : Betrag der Geschwindigkeit des Körpers
 r : Radius der Kreisbahn

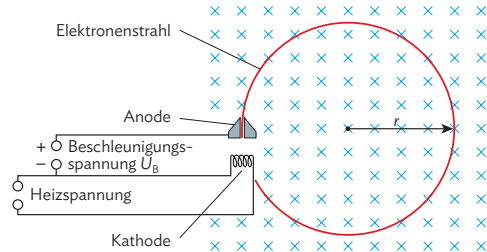
Bewegung geladener Teilchen im homogenen Magnetfeld - Fadenstrahlrohr

In einem homogenen Magnetfeld wirkt die Lorentzkraft $F_L = q \cdot v \cdot B$ auf geladene Teilchen. Allerdings tritt sie im Gegensatz zur elektrischen Kraft F_{el} nur dann auf, wenn sich die geladenen Teilchen bewegen, d.h. eine von null verschiedene Geschwindigkeit \vec{v} haben. Weil die Lorentzkraft \vec{F}_L senkrecht zu \vec{v} steht, ändert sie nicht den Betrag der Geschwindigkeit $|\vec{v}|$, sondern nur deren Richtung. Das bedeutet aber auch, dass sich der Betrag der Lorentzkraft nicht ändert. Damit hat die Lorentzkraft genau die Eigenschaften, die eine Zentripetalkraft bei einer Kreisbewegung haben muss (B4). Werden geladene Teilchen senkrecht zu den Feldlinien in ein homogenes Magnetfeld eingeschossen, so bewegen sie sich also auf einer Kreisbahn.

Beobachten lässt sich diese Kreisbahn sehr gut im folgenden Experiment, in dem Elektronen als geladene Teilchen verwendet werden.



B5 Fadenstrahlrohr: Realexperiment und schematische Versuchsanordnung



Ein Fadenstrahlrohr (B5) ist ein luftevakuierter Glaskolben, der ein Leuchtgas unter sehr geringem Druck enthält und in dem sich eine Glühkathode befindet. Die von ihr ausgesandten Elektronen werden von einer Beschleunigungsspannung U_B auf die Geschwindigkeit v gebracht und treten durch ein Loch in der Anode aus. Die Elektronen kollidieren zufällig entlang der Kreisbahn mit Atomen des Leuchtgas und bilden so eine „Leuchtspur“. Wird das Fadenstrahlrohr von einem Magnetfeld durchsetzt, das senkrecht zur Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen gerichtet und geeignet gepolt ist, so erfolgt wegen der Lorentzkraft F_L eine kreisförmige Krümmung der Bahn. Bei hinreichend großer Flussdichte B sieht man einen vollständigen Kreis.

Sein Radius ergibt sich durch Gleichsetzen von Zentripetal- und Lorentzkraft:

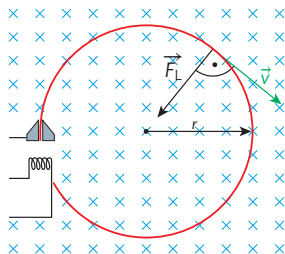
$$F_Z = F_L$$
$$\frac{m_e \cdot v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \Rightarrow r = \frac{m_e \cdot v}{e \cdot B} \quad (2)$$

r ist von der Masse der Teilchen abhängig, was bedeutet, dass bei der Verwendung von Teilchen größerer Masse wie z. B. Protonen der Radius größer ist. Ebenso ist der Bahnradius von der Geschwindigkeit der Elektronen abhängig, d.h. wenn die Geschwindigkeit der Elektronen zunimmt, wird der Bahnradius größer.

i Mehr Informationen zu Elektronen im B-Feld:



MC 67055-28



B6 Die Lorentzkraft F_L wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung und bewirkt eine Richtungsänderung des Elektrons.

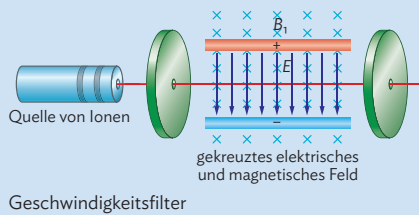
In einem homogenen Magnetfeld können senkrecht dazu bewegte geladene Teilchen durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gezwungen werden. Es ändert sich die Richtung der Geschwindigkeit, nicht aber ihr Betrag. Um den Bahnradius r zu bestimmen, betrachtet man die auf das geladene Teilchen wirkende Lorentzkraft als Zentripetalkraft:

$$F_Z = F_L \quad \frac{m_e \cdot v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad r = \frac{m_e \cdot v}{e \cdot B}$$

Musteraufgabe

Um aus einer Quelle nur Ionen (mit gleicher Ladung) einer einheitlichen Geschwindigkeit v zu erhalten, kombiniert man ein homogenes magnetisches Feld mit einem homogenen elektrischen Feld.

Zeigen Sie, dass bei bekannter Feldstärke E und Flussdichte B nur Ionen einer bestimmten Geschwindigkeit diese Anordnung ohne Ablenkung durchlaufen. Begründen Sie, dass dies unabhängig vom Ladungsvorzeichen der Ionen der Fall ist.



Lösung

Auf die fliegenden Ionen wirken sowohl die Lorentzkraft F_L als auch die elektrische Kraft F_{el} . Nur wenn beide gleich groß und entgegen gerichtet sind, wird ein Ion nicht abgelenkt und kann so die Austrittsöffnung passieren.

$$F_L = F_{el}$$

$$q \cdot v \cdot B = q \cdot E$$

$$v = \frac{E}{B}$$

Weil die Ladung q hier nicht mehr auftritt, gilt diese Filterbedingung sowohl für positive als auch für negative Ionen.



Simulation zum Wien'schen Geschwindigkeitsfilter:



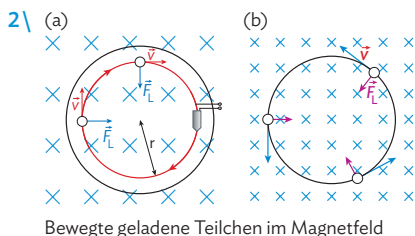
MC 67055-29



Diese Anordnung wird nach ihrem Erfinder „Geschwindigkeitsfilter von Wien“ genannt (Wilhelm Wien, 1864–1928, deutscher Physiker).

Arbeitsaufträge

- 1) Mit einer Elektronenkanone wird ein Elektronenstrahl erzeugt. Die Beschleunigungsspannung U_B beträgt 110 V. Berechnen Sie die Endgeschwindigkeit der Elektronen.



Bewegte geladene Teilchen im Magnetfeld

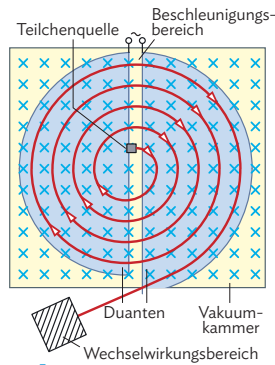
Begründen Sie für die beiden Situationen in der Abbildung, ob es sich bei den bewegten Teilchen um Protonen oder Elektronen handelt.

- 3) Einfach negativ geladene Ionen eines zu bestimmenden Isotops durchlaufen mit der Geschwindigkeit 293 m/s ein Geschwindigkeitsfilter (siehe Musteraufgabe) unabgelenkt.
- Skizzieren Sie den Aufbau des Geschwindigkeitsfilters. Gehen Sie dabei auf sämtliche Polungen und Feldrichtungen ein.
 - Berechnen Sie die magnetische Flussdichte B im Filter, wenn die elektrische Feldstärke 3,0 kV/m beträgt.
 - Nach Verlassen des Filters durchlaufen die Ionen ein senkrecht orientiertes magnetisches Feld der Flussdichte $B = 0,738$ mT auf einem Halbkreis mit dem Radius 35 cm. Berechnen Sie die Masse der Ionen und bestimmen Sie, um welche Isotope es sich handeln könnte.



Teilchenbeschleuniger in der Medizin

In der Medizin werden Elektronen- oder Ionenstrahlen für diagnostische Zwecke, aber auch zur Behandlung von Patienten verwendet. Für beide Zwecke werden energiereiche, also schnelle Teilchen benötigt. Geladene Teilchen können mithilfe eines Wechselspannungsbeschleunigers auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt werden. Es gibt zwei Arten dieser Beschleuniger: Linear- und Kreisbeschleuniger. Beide bestehen aus einer Teilchenquelle, einer Beschleunigungseinheit und einem Wechselwirkungsbereich. Die Teilchen, die aus der Teilchenquelle ausströmen, treten in die Beschleunigungseinheit ein. Dort werden sie in einem wechselnden elektrischen Feld beschleunigt. Dieser Vorgang wird nachfolgend für den Kreisbeschleuniger genauer beschrieben. Im Wechselwirkungsbereich wird der Teilchenstrahl so aufbereitet, dass er zur Therapie genutzt werden kann. Zur Bestrahlung kann die Teilchenstrahlung direkt verwendet werden oder im Wechselwirkungsbereich mit ihrer Röntgenstrahlung erzeugt werden, die dann zur Bestrahlung genutzt werden kann. Oft wendet man Mischungen aus beiden Strahlungsarten an. Bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung verwendet man meist Elektronenstrahlen. Da in der neueren Medizin zur Krebstherapie verstärkt schwere Teilchen zum Einsatz kommen, wird im Folgenden nur der Vorgang beschrieben, Ionenstrahlen zu erzeugen und diese direkt zur Behandlung zu nutzen.



B1 Aufbau eines Zyklotrons

Aufbau und Funktion eines Zyklotrons

Das Zyklotron ist ein Kreisbeschleuniger, der zwei D-förmige, hohle Metallkammern (die Duanten) enthält, die an den geraden Seiten offen sind (B1). Im Spalt zwischen den Duanten befindet sich die Teilchenquelle. Die gesamte Anordnung liegt in einem homogenen Magnetfeld, das zeitlich konstant ist, dessen Stärke aber verändert werden kann. Das Magnetfeld ist dabei so gerichtet, dass es senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ionen steht. Die Duanten sind die Elektroden eines elektrischen Feldes, das im Spalt senkrecht zum Magnetfeld verläuft. Dieses Feld zwischen den Duanten beschleunigt die Teilchen abwechselnd in einen der Duanten hinein, es muss also nach einem halben Umlauf die Richtung ändern („Wechselfeld“). Im Inneren der Duanten herrscht kein elektrisches Feld. Die Ionen werden darin also nur vom magnetischen Feld auf eine Kreisbahn abgelenkt. Dabei wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft (Kapitel 7.2). Für den Radius der Kreisbahn gilt $r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$, wobei m die Masse des Teilchens, v seine Geschwindigkeit und q seine Ladung ist. Die Flussdichte B gibt die Stärke des magnetischen Feldes an. Der Radius nimmt also proportional zur Geschwindigkeit v des Teilchens zu. Bei jedem Umlauf wird die vom Teilchen durchlaufene Strecke länger, aber die Zeit T für einen Umlauf bleibt gleich: $v = \frac{\Delta s}{T} = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \frac{2\pi \cdot m \cdot v}{T \cdot q \cdot B}$. Daraus folgt $T = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}$, unabhängig von v . Der Kehrwert $\frac{1}{T} = f$ ergibt die Frequenz, mit der das elektrische Wechselfeld betrieben werden muss.

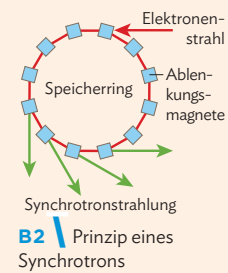
$$\text{Für die Zyklotronfrequenz gilt: } f = \frac{q \cdot B}{2\pi \cdot m}$$

Wählt man für die Frequenz der Wechselspannung diesen Wert, so erreichen die Ionen genau nach einer halben Periode des elektrischen Wechselfeldes wieder den Spalt zwischen den Duanten. Da das Feld nun umgepolt ist, werden die Ionen zum anderen Duanten hin beschleunigt. So durchlaufen die Teilchen eine Art Spiralbahn.

Am äußeren Rand eines Duanten befindet sich eine Ablenkelektrode, die die Ionen aus der spiralartigen Bewegung herauslöst und auf das Ziel hinleitet.

Exkurs: Synchrotron

Das Prinzip des Zyklotrons stößt an seine Grenzen, wenn die Teilchengeschwindigkeiten so groß werden, dass sich relativistische Effekte bemerkbar machen. Diese führen dazu, dass die auf S. 134 angegebene Formel für die Zyklotronfrequenz nicht mehr gültig ist. Insbesondere ist sie nicht mehr unabhängig von v . Die Teilchen würden nach einigen Umläufen nicht mehr rechtzeitig am Beschleunigungsspalt ankommen. Da in der Medizin Energien bis 550 MeV benötigt werden, müssen die Teilchen extrem schnell werden. Deswegen hat man weitere Formen von Kreisbeschleunigern entwickelt. Die Kreisbeschleuniger, die geladene Teilchen in hochrelativistische Bereiche bringen, heißen Synchrotron.



Protonentherapie

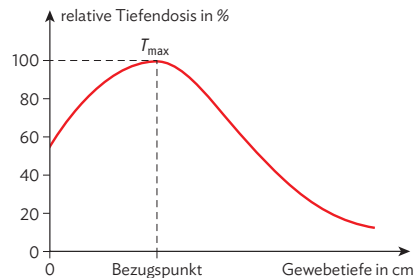
Wie auf S. 127 in M3 beschrieben, passt man die Diagnose und Behandlung individuell an den Patienten an, indem man unter anderem das Tiefendosisprofil verschiedener Teilchenarten betrachtet.

Als Tiefendosis T bezeichnet man die Energiedosis in einer bestimmten Tiefe innerhalb des Körpers. Ein Diagramm, in dem die Tiefendosis über der Gewebetiefe aufgetragen wird, heißt Tiefendosisprofil oder Tiefendosiskurve (B3). Unter der relativen Tiefendosis versteht man das Verhältnis T/T_{max} , das meist in Prozent angegeben wird. T_{max} ist dabei der Maximalwert der Tiefendosis; die Eindringtiefe an dieser Stelle wird auch Bezugspunkt genannt.

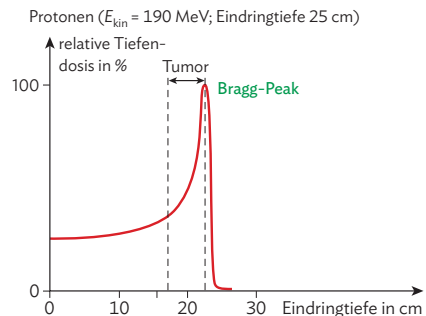
Der Maximalwert sowie der Bezugspunkt hängen sowohl von der Strahlenart als auch von der Energie der Strahlung und der Art des durchstrahlten Gewebes ab.

Die Tumorbehandlung wurde lange Zeit mit Elektronen- oder Gammastrahlung durchgeführt. In den letzten Jahrzehnten wendete sich die Forschung der Bestrahlung mit Protonen und schweren Ionen, z. B. ^{12}C -Ionen, zu. Diese schwereren Teilchen zeichnen sich durch eine besondere Art der Energieabgabe im Gewebe aus: Protonen und Schwerionen geben nahezu ihre gesamte Energie nur bei einer ganz bestimmten Eindringtiefe an das Gewebe ab. Auf diese Weise kann nahezu die vollständige Energie der Strahlung zur Tumorbekämpfung genutzt werden. Nach dem Erreichen dieses sogenannten „Bragg-Peaks“ (B4) fällt die Tiefendosiskurve sehr steil ab. Die Eindringtiefe in das Gewebe ist bei den schwereren Teilchen im Vergleich zu Photonen- oder Elektronenstrahlung deutlich höher, so dass auch tiefliegende Tumore, z. B. im Gehirn, hinter dem Auge oder in der Lunge gezielt behandelt werden können, ohne dass das umliegende Gewebe nennenswert belastet wird. Dadurch ist es auch möglich, eine höhere Strahlendosis zu verwenden, was die Wahrscheinlichkeit der Heilung deutlich erhöht. Des Weiteren haben Protonen und Schwerionen eine höhere biologische Wirkung als Photonen oder Elektronen, da sie

i Energiedosis: ans Gewebe abgegebene Energie pro Masse



B3 Typischer Verlauf eines Tiefendosisprofils eines Elektrons oder Photons



B4 Tiefendosiskurve mit Bragg-Peak



7.3 Therapie mit ionisierender Strahlung

aufgrund ihrer Größe die DNA-Stränge des Tumors leichter durchschlagen können, so dass sich der Tumor nicht mehr reproduzieren kann.

Die Therapie mit Protonen oder Schwerionen hat aber nicht nur Vorteile: Ein Problem dabei ist die Erzeugung der Strahlung. Die erforderlichen Teilchenbeschleuniger sind sehr aufwändig und teuer. Im Jahr 2009 wurde am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) auf einer Grundfläche von 60 mal 80 Metern die damals weltweit einzige Bestrahlungsanlage ihrer Art eingeweiht (B5):

Im Bereich (1) befinden sich die Ionenquellen. Es werden Kohlenstoff-, Sauerstoff- oder Heliumionen erzeugt. Die Ionen werden in einem Linearbeschleuniger (2) auf die kinetische Energie 7 MeV gebracht und durchlaufen dann eine sogenannte Stripperfolie, in der sie ihre gesamte Elektronenhülle abstreifen. Die Elektronen würden bei der Bestrahlung stören. Daraufhin treten die Ionen in einen Ringbe-

Methode

Nutzwertanalyse

Herr Maier hat einen Tumor hinter dem Auge. Sein Arzt rät ihm zu einer Strahlentherapie. Für die Heilung muss eine Gesamtstrahlendosis von 60 Gray (Gy) – nach dem Physiker L. H. Gray – aufgebracht werden. Bei einer fraktionierten Behandlung würde man pro Sitzung eine Strahlendosis von 2,0 Gy verabreichen. Im Allgemeinen gilt: Je kleiner die Einzeldosis ist, umso geringer ist das Risiko von Spätkomplikationen. Der Arzt schlägt Herrn Maier drei Behandlungsformen vor: fraktionierte Bestrahlung mit Elektronen, fraktionierte Behandlung mit Schwerionen oder Radiochirurgie, d. h. die Gesamtdosis wird an einem Tag verabreicht.

Die Behandlung mit Elektronenstrahlen kann ambulant in Herr Maiers Heimatstadt Passau erfolgen. Herr Maier wird dabei täglich von Montag bis Freitag bestrahlt. Die Bestrahlung dauert nur wenige Minuten, so dass die Strahlenbelastung gering ist. Es können sich aber Schleimhautentzündungen, Erbrechen oder Durchfall als Nebenwirkungen ein-

stellen. Da der Tumor tief am Auge sitzt, kann es sein, dass die Bestrahlung mit Elektronen allein nicht ausreicht und sich eine andere Behandlungsmethode anschließen muss.

Für die Behandlung mit Schwerionen muss Herr Maier nach Heidelberg ans HIT fahren. Die Behandlung läuft ähnlich ab wie die Behandlung mit Elektronen; die Nebenwirkungen sind ebenfalls vergleichbar. Die Schwerionentherapie ist gut geeignet, um tief liegende Tumore zu bekämpfen.

Die radiochirurgische Behandlung besteht aus einer einmaligen Bestrahlung mit Röntgenstrahlen, die ambulant an einer Klinik in München durchgeführt wird. Die Dauer der Bestrahlung beträgt je nach Lage und Größe des Tumors 30 min bis 24 Stunden. An Nebenwirkungen treten vereinzelt Kopfschmerzen, Übelkeit und Müdigkeit auf.

Herr Maier erstellt mithilfe seines Arztes eine Nutzwertanalyse, um sich für eine Behandlung zu entscheiden:

Kriterium	Gewichtung	Elektronentherapie	Schwerionentherapie	Radiochirurgie
Genesung	5	1	3	2
geringe Belastung pro Bestrahlung	4	3	2	1
Erreichbarkeit der Klinik	3	3	2	1
geringe Nebenwirkungen	2	2	1	3
kurze Dauer der Behandlung	1	2	3	1
Summe		32	34	24

Herr Maier entscheidet sich für die Schwerionentherapie, obwohl er für die gesamte Behandlungsdauer nach Heidelberg fahren muss. Der erwartete

Erfolg und die geringen Strahlenschäden überzeugen ihn.

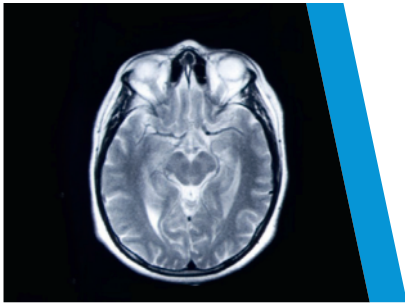
schleuniger, ein Synchrotron (3), ein. Sein Radius beträgt 10 m. Die Teilchen werden hier auf die gewünschte Endenergie beschleunigt. Es können Energiewerte zwischen 50 und 439 MeV erreicht werden, was einer Eindringtiefe zwischen 2 und 30 cm entspricht. Ein Leitungssystem (4) lenkt den Strahl in einen der drei Behandlungsräume. In zwei Räumen, den Horizontalbestrahlplätzen (5), befinden sich horizontale Strahlerköpfe, die nicht bewegt werden können. Im dritten Behandlungszimmer (8) befindet sich ein sogenanntes Gantry (7). Dieses hochkomplexe System macht einen beweglichen Therapiestrahler möglich. Das Gantry wiegt 600 t und kann hochpräzise eingestellt werden, sodass eine gut positionierte Bestrahlung möglich ist.



B5 | Schwerionentherapieanlage des Universitätsklinikums Heidelberg

Arbeitsaufträge

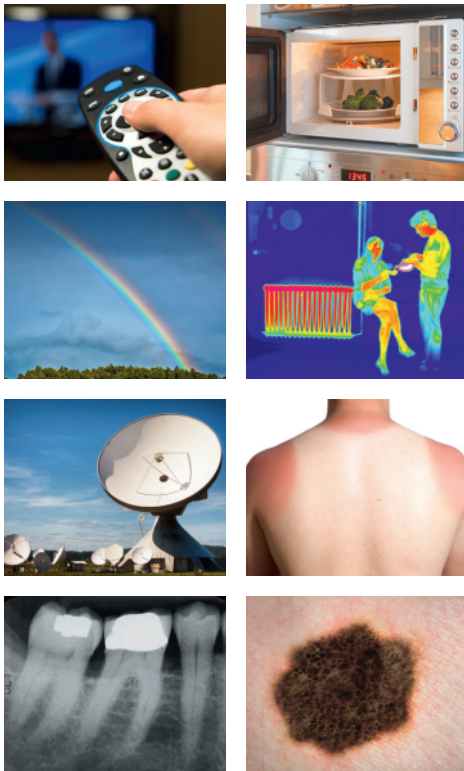
- 1) a) Reflektieren Sie die Nutzwertanalyse im Methodenkasten auf S. 136. Rufen Sie sich dazu das allgemeine Vorgehen bei einer Nutzwertanalyse in Erinnerung (vgl. Grundlagen S. 220). Gehen Sie dann die einzelnen Schritte anhand des Beispiels durch und prüfen Sie die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung.
b) Führen Sie die Nutzwertanalyse mit Ihrer eigenen Gewichtung durch. Überlegen Sie sich, ob es noch weitere Kriterien, wie z. B. Behandlungskosten, gibt, die Sie in Ihrer Entscheidung beeinflussen können.
- 2) Herr Maier ist nach seiner Nutzwertanalyse noch immer zögerlich, da er Angst vor der Behandlung hat. Er bespricht seine Ängste, sowie die Vor- und Nachteile der drei Behandlungsmethoden mit seiner Frau. Schreiben Sie einen passenden Dialog.
- 3) An einer Klinik wird die Therapie mit Schwerionen neu eingeführt. Erstellen Sie einen Flyer für künftige Patienten, der Vorteile und Risiken der Therapie darstellt.
- 4) Mit einem klassischen Zyklotron lassen sich Teilchengeschwindigkeiten von bis zu $0,1c$ erreichen.
 - a) Bestimmen Sie das Ladungsvorzeichen der Teilchen, die in B1 beschleunigt werden.
 - b) Zeigen Sie, dass die Umlaufdauer unabhängig vom jeweiligen Bahnradius ist.
 - c) Protonen sollen auf die Geschwindigkeit $0,1c$ gebracht werden. Die Flussdichte des durchdringenden Magnetfeldes beträgt $0,40\text{ T}$. Berechnen Sie die Zyklotronfrequenz, den notwendigen Durchmesser des Zyklotrons sowie die erreichte kinetische Energie in MeV.
 - d) Bestimmen Sie die Anzahl der Umläufe, die dazu nötig sind. Die wirksame Beschleunigungsspannung beträgt 10 kV .
- 5) Für eine medizinische Anwendung werden Protonen mit einem Zyklotron beschleunigt.
 - a) Berechnen Sie die Zyklotronfrequenz für Protonen ($m = 1,67 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$; $q = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$) in einem Magnetfeld der Flussdichte $1,0\text{ T}$.
 - b) Der maximale Radius des Zyklotrons beträgt 30 cm . Berechnen Sie die maximale Geschwindigkeit, die die Protonen in diesem Zyklotron erreichen können.



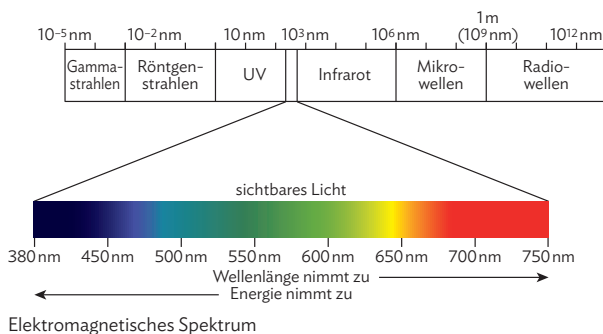
8 Röntgenstrahlung

Materialien zu Kapitel 8.1

► M1 Einstieg: Elektromagnetische Wellen



Situationen im Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen



Arbeitsauftrag

- Ordnen Sie den abgebildeten Anwendungen den richtigen Wellenlängenbereich zu und begründen Sie Ihre Auswahl kurz.
- Benennen Sie die für den Menschen gefährlichen bzw. ungefährlichen Bereiche und begründen Sie Ihre Entscheidung.
- Ordnen Sie die vom Handy ausgehende elektromagnetische Strahlung in das Spektrum ein. Recherchieren Sie dazu den genutzten Wellenlängenbereich.
- Strahlentherapie kann zum einen bedeuten, dass mit einem Teilchenstrahl der Tumor beschossen wird (Kapitel 7). Zum anderen kann bei einer Strahlentherapie auch elektromagnetische Strahlung verwendet werden. Recherchieren Sie den Wellenlängenbereich, der in der Strahlentherapie eingesetzt wird.
- Infrarotstrahlung wird ebenfalls in der Medizin eingesetzt. Beschreiben Sie zwei Einsatzgebiete.
- Bestimmen Sie mithilfe der Abbildung B2 auf S. 140 die Wellenlänge elektromagnetischer Strahlung, die von der Erdatmosphäre stark bzw. nur wenig absorbiert wird.

Materialien zu Kapitel 8.2

► M2 Lernaufgabe: Einsatz von Röntgenstrahlung

In der Medizin gibt es zwei grundlegende Anwendungen von Röntgenstrahlen:

Strahlentherapie, zur Behandlung von Krankheiten (hauptsächlich Krebs) und


Diagnose von Krankheiten wie z. B. Röntgenaufnahmen und Computertomographie.

Strahlentherapie: Röntgenstrahlen können Krebs verursachen, sie können aber auch zu dessen Behandlung eingesetzt werden. Schnell wachsende Krebszellen sind besonders strahlungsempfindlich. Dennoch werden große Dosen zum Abtöten der Krebszellen benötigt und einige der umgebenden Gewebezellen werden unvermeidlich mit zerstört. Das ist der Grund dafür, weshalb Krebspatienten, die mit Röntgenstrahlen bestrahlt werden, häufig unter den für die Strahlenkrankheit charakteristischen Nebenwirkungen leiden. Um die Zerstörung der normalen Zellen zu minimieren, wird häufig ein schmaler Röntgenstrahl eingesetzt, wenn das Krebsgeschwür gut lokalisiert ist. Der Strahl wird direkt auf das Geschwür gerichtet, und die Quelle oder der Körper rotiert, so dass der Strahl durch verschiedene Körperregionen läuft. So erreicht man, dass die Dosis an jedem Ort so gering wie möglich ist – abgesehen von dem Tumor und dem diesen unmittelbar umgebenden Gewebe, das der Strahl die ganze Zeit trifft.

Röntgenaufnahmen: Bei einer konventionellen medizinischen Röntgenaufnahme werden die Röntgenstrahlen in einer speziellen Röhre erzeugt, durchdringen dann den Körper und werden auf einem Filmmaterial festgehalten. Die Strahlen verlaufen nahezu parallel, da es bei Röntgenstrahlung kaum Beugung oder Brechung gibt. Es gibt jedoch Absorption und Streuung; die unterschiedliche Absorption durch verschiedene Strukturen im Körper führt zu dem Bild, das durch die hindurchgelassenen Strahlen erzeugt wird. Je geringer die Absorption ist, umso mehr Strahlung gelangt durch den Körper und umso stärker wird der Film geschwärzt.

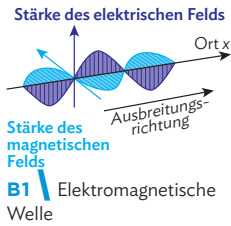
Der Arzt oder die Ärztin entscheidet nach Abwägung zwischen Nutzen und Risiko über die Anwendung von Röntgenstrahlung. Die Anwendung ist nur dann gerechtfertigt, wenn das Strahlenrisiko gegenüber dem diagnostischen oder therapeutischen Nutzen gering ist (rechtfertigende Indikation).

Arbeitsauftrag

- Lesen Sie den Text durch, schreiben Sie Fachbegriffe heraus, die Ihnen unbekannt sind, und recherchieren Sie deren Bedeutung im Internet.
- Im Text ist von charakteristischen Nebenwirkungen der Strahlenkrankheit die Rede. Recherchieren Sie im Internet die Nebenwirkungen und wie Patienten geholfen werden kann.
- Benennen Sie Situationen in Ihrem Leben, in denen von einem Körperteil eine Röntgenaufnahme gemacht werden musste. Benennen Sie Vorsichtsmaßnahmen, die dabei getroffen wurden.
- Formulieren Sie einen Kriterienkatalog für den Einsatz unterschiedlicher Untersuchungsmethoden und nehmen Sie für einen selbstgewählten Fall eine entsprechende Bewertung vor.
- Recherchieren und erläutern Sie die Bedeutung der rechtfertigenden Indikation unter dem Mediacode.  MC 67055-30
- Beschreiben Sie die Fehlvorstellung, die der abgebildeten historischen Karikatur zugrunde liegt.



8.1 Aufbau der Röntgenröhre, Röntgenspektrum



i Lichtgeschwindigkeit
 $c = 299792458 \text{ m/s}$



B3 Zweite Röntgenaufnahme überhaupt, aufgenommen am Physikalischen Institut der Universität Würzburg im Jahr 1896

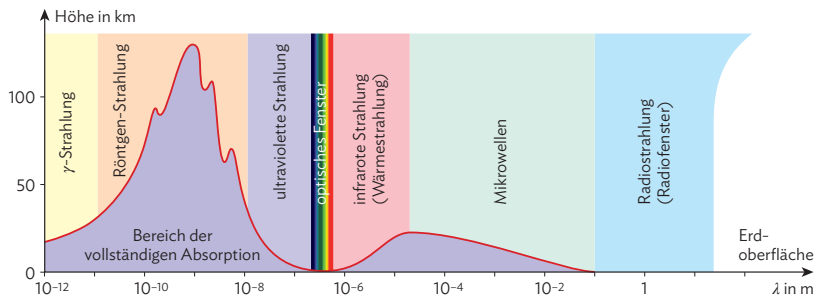
i In anderen Sprachräumen wird die Röntgenstrahlung häufig mit dem von Röntgen selbst verwendeten Ausdruck „X-Strahlen“ bezeichnet.

i Der Proportionalitätsfaktor heißt Planck'sches Wirkungsquantum:
 $h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
 $= 4,1357 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$
 $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
 Damit wird die Photonenergie
 $E_{\text{Photon}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

Elektromagnetische Wellen – Röntgenstrahlung

Eine elektromagnetische Welle besteht aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientiert sind und sich periodisch ändern (B1). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit c . Wellenlänge λ und Frequenz f einer elektromagnetischen Welle hängen mit der Lichtgeschwindigkeit c auf die gleiche Weise zusammen wie bei allen Wellenphänomenen: $c = \lambda \cdot f$.

In der Natur treten elektromagnetische Wellen mit einer großen Spannweite der Wellenlängen auf und treffen aus dem Weltall kommend die Erde. Jedoch werden in der Erdatmosphäre weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrums absorbiert und erreichen die Erdoberfläche nur teilweise (B2).



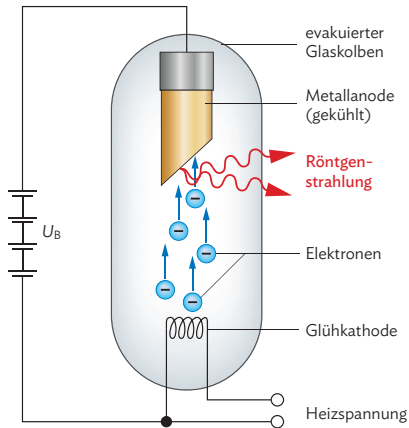
B2 Eindringtiefe des elektromagnetischen Spektrums in die Erdatmosphäre

Die Röntgenstrahlung ist nach ihrem Entdecker Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) benannt. Sie ist eine elektromagnetische Strahlung (B2), die viele Stoffe durchdringt und von verschiedenen Materialien unterschiedlich absorbiert wird. Röntgenstrahlung aus dem Weltall wird auf der Erde von der Atmosphäre absorbiert und das Leben somit geschützt. In der Medizin machte man sich zunutze, dass Materialien verschieden stark absorbieren; so können Röntgenaufnahmen z. B. von Knochen oder Zahnplomben gemacht werden. Im Jahr 1896 präsentierte Röntgen erstmals seine Entdeckungen in der Universität Würzburg während eines Vortrags. Dabei fertigte Röntgen eine Aufnahme der Hand eines Freiwilligen vor den Augen des Publikums an (B3).

Für die Beurteilung der biologischen Wirksamkeit ist wichtig, dass jeder Wellenlänge λ des elektromagnetischen Spektrums eine Photonenenergie zugeordnet werden kann. Die Photonenenergie ist direkt proportional zur Frequenz f . Wegen $f = \frac{c}{\lambda}$ bedeutet das: Je kleiner die Wellenlänge ist, umso größer ist die Photonenenergie. So z. B. hat ultraviolette Strahlung eine kleinere Wellenlänge als das farbige Licht und ist deswegen energiereicher. Röntgenstrahlung hat eine noch kleinere Wellenlänge als ultraviolette Strahlung und ist somit noch energiereicher als das sichtbare Licht.

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen. Ihre Wellenlänge λ liegt zwischen 10 nm und 10 pm.

Künstliche Erzeugung von Röntgenstrahlung



B4 Aufbau einer Röntgenröhre

Röntgenstrahlen werden mit einer Vakuumröhre erzeugt (B4), in der sich eine Glühkathode und eine Anode befinden. Durch Anlegen einer Heizspannung U_H treten Elektronen aus der Glühkathode aus. Die Hochspannung U_B (Größenordnung von 5 bis 150 kV) beschleunigt sie. Die Elektronen erhalten dabei eine kinetische Energie, die der verringerten potentiellen Energie entspricht: $E_{\text{Elektron}} = U_B \cdot e$. Treffen die Elektronen mit hoher Geschwindigkeit auf die Metallanode, wird ihre kinetische Energie in Röntgenstrahlung und thermische Energie umgesetzt. Die

Metallanode wird deshalb z. B. durch einen Wasserkreislauf gekühlt.

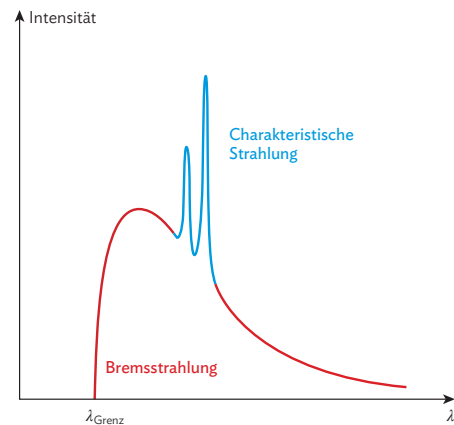
Spektrum der Röntgenstrahlung

Trägt man die Intensität der Röntgenstrahlung über den erzeugten Wellenlängen auf, so erhält man das Spektrum der Röntgenstrahlung (B5). Es besteht aus Bremsstrahlung (rot) und charakteristischer Strahlung (blau).

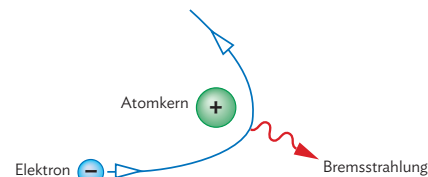
Bremsstrahlung entsteht durch das Abbremsen der beschleunigten Elektronen in der Metallanode. Ändert sich nämlich der Geschwindigkeitsbetrag bzw. die Bewegungsrichtung eines elektrischen Ladungsträgers, wird er also beschleunigt, so entsteht elektromagnetische Strahlung. Die Energie der dabei auftretenden Photonen ist umso höher, je stärker die Beschleunigung ist.

Je nach Abstand zu einem Atomkern werden die Elektronen unterschiedlich abgebremst, abgelenkt und an weiteren Atomkernen abgebremst (B6). Weil die abgegebene Energiemenge beliebig sein kann, ist das Bremsspektrum kontinuierlich. Das heißt, die entstehende Röntgenstrahlung hat unterschiedliche Wellenlängen.

Im Extremfall kann ein Elektron durch einen zentralen Stoß mit einem Atomkern komplett abgebremst werden. Dabei wird seine gesamte kinetische Energie auf einmal als Strahlung frei. Diese Strahlung hat dann die maximale Energie bzw. die kleinstmögliche Wellenlänge λ_{Grenz} . Die kinetische Energie des Elektrons $E_{\text{Elektron}} = U_B \cdot e$ wird komplett in Form eines Photons abgegeben.



B5 Röntgenspektrum



B6 Entstehung von Bremsstrahlung

i Durch Gleichsetzen von $E_{\text{Elektron}} = E_{\text{Photon}}$ lässt sich damit die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} berechnen:
 $U_B \cdot e = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{Grenz}}}$ bzw. $\lambda_{\text{Grenz}} = \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e}$.



8.1 Aufbau der Röntgenröhre, Röntgenspektrum

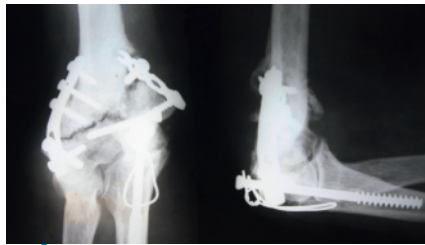
Exkurs: Charakteristische Strahlung

Charakteristische Strahlung entsteht, wenn ein Elektron auf ein Elektron in den unteren Energiestufen eines Anodenatoms trifft und dieses herausschlägt. Auf den freien Platz fällt ein Elektron aus einer höheren Energiestufe des Atoms und gibt dabei elektromagnetische Strahlung ab. Da die Energieunterschiede zwischen den Stufen bei allen Elementen unterschiedlich sind, ist die abgegebene Röntgenstrahlung für das Anodenmaterial charakteristisch.

Das Spektrum einer Röntgenröhre besteht aus einem kontinuierlichen Spektrum, der Bremsstrahlung, und aus charakteristischen Spitzen.

Bei der Bremsstrahlung werden die Elektronen durch die Atomkerne in der Anode abgebremst. Wird ein Elektron mit maximaler kinetischer Energie auf einmal abgebremst, entsteht ein Photon mit $\lambda_{\text{Grenz}} = \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e}$.

Röntgenaufnahmen in der Medizin



B7 Röntgenbilder eines Ellenbogens von der Seite und von hinten

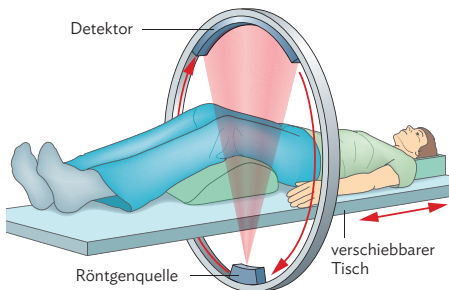
Röntgenstrahlung durchdringt Materie und wird beim Durchgang durch verschiedene Materialien unterschiedlich stark abgeschwächt. Diese Schwächung ist der wichtigste Faktor bei der Erzeugung von Röntgenbildern. Um die Abschwächung vergleichen zu können, verwendet man die Halbwertsdicke $D_{1/2}$. Diese beschreibt die Schichtdicke, nach

der die Intensität der Röntgenstrahlung nur noch die Hälfte der eingestrahnten Intensität beträgt. Bereits eine dünne Bleischicht halbiert die Intensität; das bedeutet, dass Blei sehr gut zur Abschirmung von Röntgenstrahlung verwendet werden kann. Dichte Strukturen wie Knochen schwächen Röntgenstrahlung stärker ab und erscheinen im Röntgenbild hell. Weniger dichte Strukturen wie Gewebe schwächen die Strahlen – bei gleicher Schichtdicke – weniger ab und erscheinen somit im Bild dunkel (B7). Weichteilgewebe wie Knorpel haben eine mittlere Dichte und werden im Bild in verschiedenen Graustufen dargestellt.

In den 1970er Jahren wurde eine neue, auf Röntgenstrahlen basierende Technik entwickelt, die Computertomographie (CT). Sie erzeugt das Bild eines Schnitts durch den Körper (tomos: Schnitt). Bei der Computertomographie sind Röntgenquelle und Detektor auf gegenüberliegenden Seiten des Patienten und rotieren um diesen. Durch die Messungen von eingestrahelter Intensität und transmittierter Intensität modelliert der Computer den Körper des Patienten in kleinen Würfeln mit jeweils einem eigenen Absorptionskoeffizienten. Computergestützt werden die verschiedenen Projektionen überlagert; daraus wird ein CT-Bild errechnet und dargestellt.



$D_{1/2} \text{ Blei} < D_{1/2} \text{ Knochen} < D_{1/2} \text{ Gewebe} < D_{1/2} \text{ Luft}$
Die genauen Zahlenwerte hängen von der Energie der Röntgenstrahlen ab. Durch geeignete Wahl können so im Bild Kontraste verstärkt werden.



B8 Aufnahme verschiedener Projektionen von Röntgenbildern

Musteraufgabe

In einer Röntgenröhre beträgt die Beschleunigungsspannung $U_B = 2,0$ kV.

- a) Berechnen Sie die potentielle Energie der Elektronen. Geben Sie das Ergebnis in Elektronvolt (eV) und in Joule (J) an.
 b) Berechnen Sie die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen auf die Anode treffen.

Lösung

a) Die potentielle Energie ist E_{pot}
 $= e \cdot U_B = e \cdot 2000 \text{ V} = 2000 \text{ eV}$
 $= 2,0 \text{ keV}$
 $= 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2000 \text{ V}$
 $= 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ J}$

- b) Die in a) berechnete potentielle Energie wird in kinetische Energie überführt: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = e \cdot U$.
 Deshalb ist

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-16} \text{ J}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$= 2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

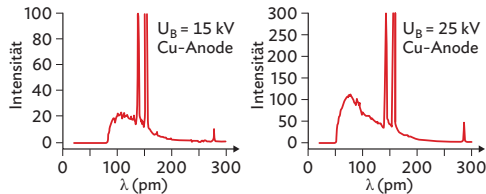


B9 \ Schulröntgenerät

Arbeitsaufträge

- 1) a) Berechnen Sie die Wellenlänge von grünem Licht (Frequenz im Vakuum $f = 5,5 \cdot 10^{14}$ Hz) und vergleichen Sie mit dem Diagramm in M1.
 b) Vergleichen Sie Wellenlänge und Frequenz von Röntgenstrahlung mit denen des grünen Lichts.

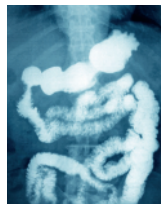
- 2) Mit einem Schulröntgenerät (B9) wurden die folgenden Röntgenspektren erzeugt:



Röntgenspektren

- a) Vergleichen Sie die beiden Spektren und erklären Sie die erkennbaren Unterschiede.
 b)* Geben Sie jeweils einen Näherungswert für die Grenzwellenlängen λ_{Grenz} an und überprüfen Sie durch Rechnung die Richtigkeit der angegebenen Beschleunigungsspannung U_B .

- 3) a) Begründen Sie, dass manche Untersuchungsobjekte, wie z. B. der Darm eines Menschen, auf einer Röntgenaufnahme kaum zu erkennen sind.



- b) Recherchieren Sie im Internet, wie auch solche Organe und Gewebe durch Röntgenaufnahmen sichtbar gemacht werden können.



Röntgenexperiment 1896

Das Bild zeigt ungeschützte Experimente mit einer frühen Röntgenröhre in den USA 1896. Damals waren die Gefahren der Strahlung noch weitgehend unbekannt. Recherchieren Sie Schutzmaßnahmen, die im Vergleich zu damals heute beim Röntgen eingehalten werden müssen.

- 5) Recherchieren Sie im Internet nach herkömmlichen Röntgenaufnahmen und Aufnahmen mit einem Computertomographen. Vergleichen Sie die Aufnahmen und bestimmen Sie einen Unterschied. Formulieren Sie aufgrund Ihres Vergleichs einen Vor- bzw. Nachteil der beiden Aufnahmeverfahren.

Röntgenbild eines Magen-Darm-Trakts



8.2 Biologische Wirkung von Röntgenstrahlung

Ionisierende Wirkung und Messgrößen

In Kapitel 8.1. wurden Vorteile und Nutzen der Röntgenstrahlung dargestellt. Doch ihre Verwendung hat auch Nachteile: Röntgenstrahlung hat die Eigenschaft, dass sie Materie ionisieren, also Elektronen aus den Atomen oder Molekülen herauslösen kann, so dass Atom- bzw. Molekülrümpfe übrigbleiben.

Die ionisierende Wirkung kann mit einem Experiment demonstriert werden: In den Strahlengang der Röntgenröhre wird ein offener Plattenkondensator eingebaut, an den eine Spannung (ca. 500 V) angelegt wird. In den Kondensatorstromkreis werden ein Messverstärker und ein Strommessgerät eingebaut, sodass registriert werden kann, ob ein Ionenstrom zwischen den Platten fließt. Bei ausgeschalteter Röntgenröhre fließt kein Strom. Sobald man die Röntgenröhre einschaltet, registriert man jedoch einen Ionenstrom, weil die Röntgenstrahlung die Luftmoleküle im Kondensator ionisiert. Die herausgeschlagenen Elektronen werden zur positiv geladenen Kondensatorplatte und die positiv geladenen Luftmoleküle zur negativ geladenen Platte hin beschleunigt.



B1 Röntgenstrahlung ionisiert Luftmoleküle

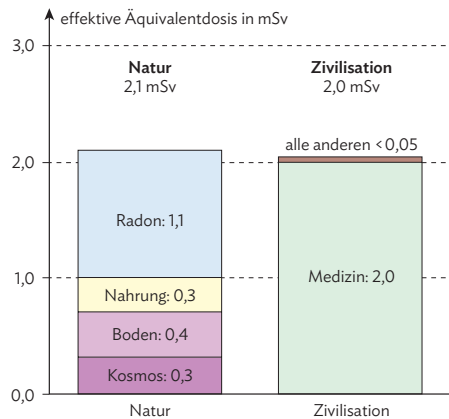
i Qualitätsfaktor für verschiedene Strahlungsarten:
 $q_{\beta/\gamma\text{-Strahlung}} = 1$
 $q_{\text{Protonen-Strahlung}} = 5$
 $q_{\alpha\text{-Strahlung}} = 20$

Die ionisierende Eigenschaft der Röntgenstrahlung kann zu Schäden im Gewebe führen. Um abschätzen zu können, wie eine bestimmte „Menge“ Strahlung auf den Körper wirkt, muss zuerst ein Maß für diese Strahlungsmenge definiert werden. Da eine biologische Wirkung erst nach Absorption von Energie eintritt, definiert man zunächst die Energiedosis als aufgenommene Energie pro Masse. Um die unterschiedlichen Schädlichkeiten verschiedener Strahlungsarten zu quantifizieren, ordnet man ihnen einen dimensionslosen Qualitätsfaktor q zu und gelangt so zur Äquivalentdosis H . Es gilt: $H = q \cdot \frac{\Delta E_{\text{abs.}}}{\Delta m}$.

Die Einheit von H ist ein Sievert (Sv) mit $1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Der Qualitätsfaktor ist eine Zahl, die experimentell für verschiedene Strahlungsarten bestimmt wurde. Für Röntgenstrahlung gilt $q = 1$.

Die Äquivalentdosis ist eine im Strahlenschutz wichtige Größe, mit der man das Risiko, durch Strahleneinwirkung einen bösartigen Tumor oder Leukämie zu entwickeln, angeben kann. Für die Abschätzung des tatsächlichen Strahlenrisikos muss vor allem bei medizinischen Anwendungen berücksichtigt werden, dass verschiedene Organe unterschiedlich strahlungsempfindlich sind. Dies wird in der effektiven Äquivalentdosis berücksichtigt.

Für die biologische Wirkung spielt die Dauer der Einwirkung eine sehr große Rolle, weswegen in der Medizin meist die Energiedosisleistung, also die Dosis pro Zeiteinheit, betrachtet wird. Die jährliche Strahlenbelastung in Deutschland hat im Schnitt eine effektive Dosis von etwa 4 mSv für Normalbürger. Fast die Hälfte davon entfällt auf medizinische Anwendungen (B2 und T1).



B2 Durchschnittliche Strahlenbelastung pro Jahr in Deutschland

Dabei muss beachtet werden, dass die Abgabe von Energie in den Zellen und das Eintreten von Schädigungen ein zufälliger Prozess ist. Wenn einzelne Zellen absterben, hat das für den Körper keine Bedeutung. Es kann sich aber auch ein bösartiger Tumor entwickeln oder Keimzellen können sich so verändern, dass Erbschäden eintreten. Man geht davon aus, dass das schon bei niedrigster Strahlendosis der Fall sein kann. Mit steigender Dosis steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden, nicht aber die Schwere der schädlichen Veränderung selbst.

Kommt es jedoch zum Absterben von Zellen, so wird dies kritisch, sobald zu viele absterben und eine wahrnehmbare Veränderung im Gewebe eintritt. Da die Anzahl der abgestorbenen Zellen mit steigender Dosis zunimmt, gibt es für jede Veränderung in einem bestimmten Gewebe eine Schwellendosis, ab der die Schäden erst sichtbar werden. Darüber ist die Schwere der Schäden abhängig von der Dosis. Man spricht von deterministischen Schäden. Dazu gehören z. B. akute Strahlenreaktionen, chronische Strahlenfolgen sowie die akute Strahlenkrankheit. Bei deterministischen Schäden nimmt mit der Strahlendosis auch die Schwere des Schadens zu. T2 gibt Aufschluss über die Stufen der Strahlenkrankheit bei kurzfristiger Ganzkörperbestrahlung.

Es gibt keine untere Grenze für eine Strahlendosis, die ungefährlich wäre. Aber um die Gefährdung möglichst gering zu halten, gibt es in den Bestimmungen für Strahlenschutz Grenzwerte für die Strahlenbelastung, die zu den natürlichen und medizinischen Quellen aus B2 hinzukommt. Dies sind z. B. Belastungen durch radioaktive Stoffe, die in Kernkraftwerken gelagert werden oder durch Experimente in der Schule. Die effektive Äquivalentdosis daraus darf für den ganzen Körper pro Jahr 1 mSv nicht überschreiten. Für Personen, die beruflich Strahlung ausgesetzt sind, gilt, dass 20 mSv bis 50 mSv pro Jahr und während der gesamten Lebenszeit 400 mSv nicht überschritten werden dürfen.

Biologische Wirkung

Die Vorgänge in der Zelle nach einer Strahlenexposition teilen sich in verschiedene Phasen auf, die nacheinander ablaufen, wenn sie nicht unterbrochen werden. Sie stellen eine Kette äußerst komplizierter chemischer und biochemischer Prozesse dar, an denen immer noch geforscht wird.

Physikalische Phase

Wenn ionisierende Strahlung auf den menschlichen Körper trifft, tritt sie mit dem Gewebe in Wechselwirkung. Dieser physikalische Primärvorgang läuft sehr schnell ab. Seine Dauer entspricht der Zeit, die die Strahlung zum Durchqueren der Materie braucht, und liegt im Bereich von 10^{-16} bis 10^{-13} s. Die Strahlung kann ein Biomolekül, z. B. die DNA, direkt oder über verschiedene Zwischenwege schädigen.

Zahnuntersuchungen		0,02 mSv
Röntgenaufnahme	Schädel	0,2 mSv
	Rippen	3,0 mSv
	Thorax (Lunge)	0,2 mSv
	Bauchraum	0,3 mSv
	Wirbelsäule	bis 2,0 mSv
Mammographie	(Film-Folien-System)	0,5 mSv
Computertomographie	Schädel	2 mSv
	Thorax (Lunge)	3 mSv
	Bauchraum	7 mSv
Angiographie	Herz (Herzkatheter)	5 mSv
	Extremitäten	5–10 mSv

T1 Strahlenbelastung für medizinische Untersuchungen mit Röntgenstrahlen

Dosis ab ...	Folge
100 mSv	erhöhtes Krebsrisiko
500 mSv	weiter erhöhtes Krebsrisiko, Unwohlsein, beginnende Strahlenkrankheit
1000 mSv	akute Strahlenkrankheit: Übelkeit, Erbrechen, Sterilität
4000 mSv	schwere Strahlenkrankheit: starke Durchfälle, Erbrechen, Haarausfall, Blutungen; Todesrate 50 % innerhalb einer Woche
7000 mSv	Todesrate 100 % (bei fehlenden Maßnahmen)

T2 Die Stufen der Strahlenkrankheit



Die mit dem Mediacode verlinkte Abbildung zeigt den Weg vom physikalischen Strahlenschaden zum biologischen Effekt.



MC 67055-31

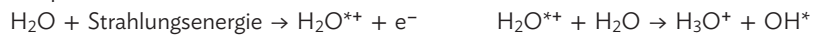
8.2 Biologische Wirkung von Röntgenstrahlung

Bei der Röntgenstrahlung dominiert die indirekte Strahlenwirkung, bei der zunächst größere Nachbarmoleküle geschädigt werden, die dann weiter reagieren.

Radio- und biochemische Phase

Da unser Körper zu 80% aus Wasser besteht, tritt die ionisierende Strahlung in erster Linie damit in Wechselwirkung und ionisiert Wassermoleküle oder regt sie an. Dadurch entstehen Bruchstücke von Wassermolekülen (freie Wasserradikale): Elektronen, Protonen, Wasserstoff und OH-Gruppen. Freie Radikale sind hochreaktiv und können mit Molekülen in der Zelle, unter anderem auch mit der DNA, reagieren und diese schädigen.

Beispiel für eine Reaktion:

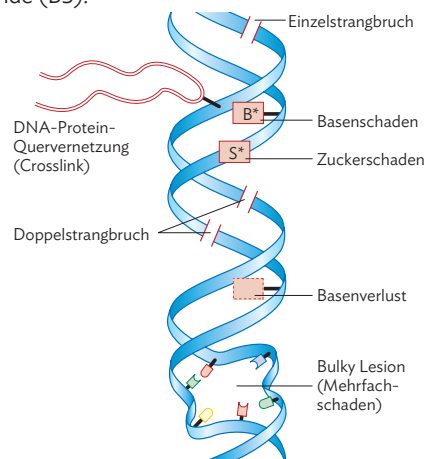


H_2O^{*+} ist ein Wasserradikalkation, OH^* ein Hydroxylradikal. OH^* ist chemisch stark reaktiv und kann z. B. mit der DNA reagieren, indem es ihr ein Wasserstoffatom aus einer Wasserstoffbrücke entzieht. Man nimmt an, dass etwa zwei Drittel der indirekten DNA-Schäden, die durch Photonen erzeugt werden, auf das Konto der OH^* -Radikale gehen. Daneben gibt es noch weitere Radikale, die ebenfalls DNA-Schäden verursachen können.

Mögliche Schäden der DNA sind folgende (B3):

- Basenschaden oder -verlust
- Veränderung der Zuckermoleküle
- Einzelstrang- oder Doppelstrangbruch
- Crosslinks (DNA-Quervernetzungen)
- Bulky Lesions (Mehrfachschäden)

Wenn man Gewebe mit einer Äquivalentdosis von 1 Sv Röntgenstrahlung bestrahlt, treten durchschnittlich 1000 bis 2000 Basenveränderungen, 500 bis 1000 Einzelstrangbrüche, 150 Crosslinks, 50 Doppelstrangbrüche und Bulky Lesions auf.



B3 Mögliche Schäden an der DNA

In der Zelle gibt es sehr leistungsfähige Reparaturmechanismen. So z. B. können Radikale mithilfe spezieller Stoffe neutralisiert und somit unschädlich gemacht werden. Auch bereits mutierte Krebszellen können erkannt und vernichtet werden. In jeder Phase ist es also möglich, dass der eingetretene Schaden behoben wird.

Biologische Phase

Allerdings kann es auch passieren, dass etwas falsch oder gar nicht repariert wird. Wenn das bei einem Einzelstrangbruch oder einem Basenschaden der Fall ist, können dadurch Mutationen erzeugt werden. Wird ein Doppelbruch nicht oder falsch repariert, entsteht eine Chromosomenmutation. Eine Mutation kann zum Zelltod oder zur Entwicklung von Krebs führen. Außerdem können durch Veränderungen an Enzymen und Membranproteinen Stoffwechselveränderungen eintreten, und es

i


Der Stern (*) symbolisiert ein ungepaartes Valenzelektron, dem, anders als in stabilen Molekülen, der Partner für eine Valenzbindung fehlt.

kann so zu Organschäden kommen. Wenn Keimzellen verändert werden, kann es zu genetischen Schäden kommen, die weitervererbt werden (z. B. Erbkrankheiten oder Missbildungen). Trifft die Strahlung auf einen Embryo, so ist die zu erwartende Schädigung vor der Ausbildung der Organe, d. h. vor dem Fötus-Stadium, am größten, da zu diesem Zeitpunkt viele Stammzellteilungen erfolgen. Je nach Stadium reichen die Gefahren vom Absterben über mögliche Missbildungen bis zu einem erhöhten kindlichen Krebsrisiko.

Die biologische Phase kann Minuten bis Jahrzehnte dauern. Manche Schäden werden erst in der nächsten Generation erkennbar. Deswegen ist es auch sehr schwierig, ionisierende Strahlung als Ursache bestimmter Krankheiten auszumachen.

Röntgenstrahlung ist eine ionisierende Strahlung, die das Gewebe schädigen kann. Ihre Energie liegt im Bereich von 100 eV bis 250 keV, je nach der Wellenlänge. Die energiereiche Strahlung kann aufgrund ihrer ionisierenden Wirkung gewünschte, aber auch ungewünschte Effekte auf das Gewebe haben: Sie kann Tumorgewebe zerstören, aber auch die DNA schädigen.

Arbeitsaufträge

- 1) Stellen Sie die Vor- und Nachteile einer diagnostischen Röntgenaufnahme gegenüber. Gewichten Sie die einzelnen Argumente für sich nach ihrer subjektiven Relevanz.
- 2) Die Tabelle T1 ist einer Patienteninformation entnommen, die sich auf den Internetseiten eines Klinikums findet. Sie erreichen den Abschnitt „Patientensicherheit durch Qualitätsstandards und Strahlenschutz“ über den Mediencode.  MC 67055-32
 - a) Lesen Sie den Abschnitt durch und vergleichen Sie die darin vorkommenden Zahlenangaben mit Angaben in diesem Buch.
 - b) Untersuchen Sie die Aussagen und die Formulierungsweise des Textes und begründen Sie damit, an welche Personengruppe sich der Text hauptsächlich richtet.
- 3) Auf S. 142 wurde das Verfahren der Computertomographie (CT) vorgestellt.
 - a) T1 auf S. 145 zeigt, dass eine CT-Untersuchung mit höheren Strahlenbelastungen verbunden ist. Begründen Sie die Unterschiede zu herkömmlichen Röntgenuntersuchungen.
 - b) Erstellen Sie, ähnlich wie auf S. 136, eine Liste verschiedener Kriterien und vergleichen Sie mit ihnen eine CT-Aufnahme mit einer herkömmlichen Röntgenuntersuchung. Berücksichtigen Sie dabei auch nichtphysikalische Kriterien.
- 4) Die Daten in der folgenden Tabelle wurden nach dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 veröffentlicht. Sie wurden mit Daten nach dem Unfall in Tschernobyl 1986 verglichen:


Ort der Messung	Dosisleistung
Fukushima/Haupttor	12 mSv/h
Fukushima/Reaktorinneres	1000 mSv/h
Tschernobyl/Reaktorinneres	2000 mSv/h

Äquivalentdosisleistungen

 - a) Bestimmen Sie den Faktor, um den die drei oben angegebenen Äquivalentdosisleistungen größer sind als die durchschnittliche natürliche Strahlenbelastung von 2,1 mSv/Jahr.
 - b) Die Betreibergesellschaft des Reaktors in Fukushima teilte mit, dass die Gesamtdosis ihrer Arbeiter im Reaktorinneren 700 mSv nicht überstiegen hat. Bestimmen Sie die maximale Zeitdauer, die die Arbeiter im Reaktorinnern tätig waren, und geben Sie die Modellannahmen an, die Sie dabei verwendet haben.

Basisaufgaben

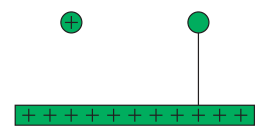
- 1) a) Formulieren Sie die Definition der elektrischen Feldstärke in einem vollständigen Satz.
 b) Begründen Sie, dass die so definierte Größe sinnvoller für die Charakterisierung eines elektrischen Feldes ist als die vom Feld hervorgerufene Kraft.

- 2) Eine winzige Watteflocke (Masse: 0,10 g) trägt die Ladung $q = -4,0 \text{ nC}$ und soll zwischen zwei horizontal angeordneten Kondensatorplatten mit Abstand von 6,0 cm zum Schweben gebracht werden.
 
 - a) Zeichnen Sie für den Schwebезustand die auf die Watteflocke wirkenden Kräfte ein.
 - b) Berechnen Sie die erforderliche Spannung an den Platten, damit die Watteflocke auf einer Stelle schwebt.

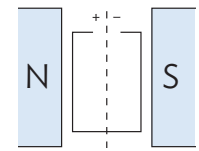
- 3) Zwei Ladungen befinden sich in einem x-y-Koordinatensystem. Die positive Ladung Q_1 befindet sich bei (2 | 1) und die negative Ladung Q_2 bei (4 | 4). Nun wird eine Probeladung $q = +2 \text{ nC}$ bei (6 | 2) in das System gebracht. An der Stelle der Probeladung ist die von Q_1 hervorgerufene Feldstärke $|\vec{E}_1| = 26 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$, die von Q_2 hervorgerufene Feldstärke $|\vec{E}_2| = 34 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.
 - a) Zeichnen Sie den Sachverhalt in ein Koordinatensystem (Einheitslänge 1 cm) ein. Bestimmen Sie die auf q wirkenden Kräfte und zeichnen Sie sie maßstabsgetreu ein.
 - b) Ermitteln Sie zeichnerisch die auf q wirkende Gesamtkraft \vec{F}_{ges} . Geben Sie ihren Betrag an.

- 4) Ein Plattenkondensator hat quadratische Platten mit Seitenlänge $a = 20 \text{ cm}$, die $d = 2,0 \text{ cm}$ voneinander entfernt sind (Zwischenraum Luft). Es liegt eine Spannung von $U = 1,6 \text{ kV}$ an.
 - a) Berechnen Sie die Kapazität dieses Kondensators und die Ladungsmenge auf einer der Platten.
 - b) Bei angeschlossener Spannungsquelle wird der Plattenabstand auf ein Viertel verringert. Begründen Sie ohne Rechnung, um welchen Faktor sich die Ladungsmenge verändert. Beschreiben Sie weitere Möglichkeiten, um die gleiche Ladungsänderung zu erreichen.

- 5) Ein Plattenkondensator hat eine Kapazität von $2,0 \mu\text{F}$ und einen Plattenabstand von 1,6 mm.
 - a) Bei einer Feldstärke von $E = 3,0 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ kann es zu Überschlügen durch die Luft kommen. Berechnen Sie die anliegende Spannung, die zum Funkenüberschlag führen würde.
 - b) Berechnen Sie die Ladung, die sich bei dieser Spannung auf einer der Platten befinden würde.

- 6) In die abgebildete Ladungsanordnung ist bereits eine Feldlinie eingezeichnet.
 
 - a) Geben Sie das Vorzeichen an, das die rechte Ladung trägt, und begründen Sie Ihre Entscheidung.
 - b) Übertragen Sie die Skizze und ergänzen Sie darin Feldlinien mit ihrer Richtung sowie Äquipotentiallinien.
 - c) Überprüfen Sie Ihre Lösung von Teilaufgabe b) mit einem geeigneten Simulationsprogramm.

- 7) Die hohle Metallkugel eines Bandgenerators hat auf ihrer Oberfläche ein Potential von 600 V.
 - a) Begründen Sie, dass die Metalloberfläche eine Äquipotentialfläche darstellt.
 - b) Beschreiben Sie den Verlauf der elektrischen Feldstärke und des elektrischen Potentials jeweils im Inneren und im Äußeren der Hohlkugel. Stellen Sie beide Größen qualitativ als Funktion der Entfernung vom Kugelmittelpunkt dar.

- 8) Das nebenstehende Drahträhmchen befindet sich in einem homogenen Magnetfeld der Stärke 50 mT. Es wird von einem Strom der Stärke 2,0 A durchflossen.
 
 - a) Geben Sie Betrag und Richtung aller auf das Rähmchen wirkenden Kräfte an. Eventuell benötigte weitere Größen können der Zeichnung entnommen werden.
 - b) Beschreiben Sie qualitativ die Änderung dieser Kräfte, wenn das Rähmchen um die eingezeichnete Achse aus der Zeichenebene herausgedreht wird.

- 9) Begründen Sie, ob mithilfe der Lorentzkraft das Vorzeichen der Ladungsträger in einem Stromkreis ermittelt werden kann. Stellen Sie dazu zwei geeignete Hypothesen auf und untersuchen Sie, ob sich in den beiden Fällen unterschiedliche beobachtbare Auswirkungen ergeben.
- 10) Bestimmen Sie den Bahnradius beim Fadenstrahlrohr-Experiment aus Kapitel 7.2, wenn die Beschleunigungsspannung auf 150 V geregelt wird und das von den beiden flachen Spulen erzeugte homogene Magnetfeld die Flussdichte 0,92 mT besitzt.
- 11) Lesen Sie aus der Abbildung auf S. 138 unten den Wellenlängenbereich von Röntgenstrahlung ab, berechnen Sie die zugehörigen Frequenzen und vergleichen Sie diese mit grünem Licht.
- 12) Die Abbildung zeigt ein Experiment zur Ionisation von Luftmolekülen durch Röntgenstrahlung. Ein Röntgenquant kann seine Energie dabei auch schrittweise an mehrere Luftmoleküle abgeben.



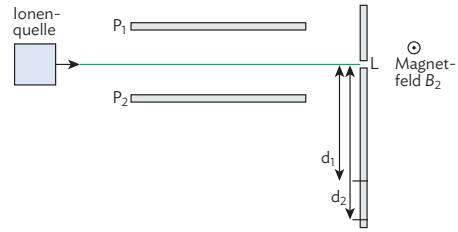
Zusammenfassende Aufgaben

- 13) Eine positiv geladene Wolke in 400 m Höhe bildet zusammen mit dem Erdboden einen Plattenkondensator (Fläche einer „Platte“: 8,0 km²). Zwischen Wolke und Erde herrscht eine Feldstärke von $E = 1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$, die so hoch ist, dass eine Entladung durch die Luft (Blitz) unmittelbar bevorsteht.
- Bestimmen Sie die Ladungsmenge der Wolke sowie die Spannung zwischen ihr und dem Boden. [Kontrollergebnis: $Q = 11 \text{ C}$]
 - In der Wolke kann (vor Entladung der Wolke zwischen und bei Windstille) ein kugelförmiges Wassertröpfchen mit 2,0 mm Durchmesser schweben, wenn es die „richtige“ Ladungsmenge trägt. Berechnen Sie diese Ladungsmenge. Die Dichte von Wasser beträgt $\rho_{\text{Wasser}} = 1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.
 - Die mittlere Stromstärke eines Blitzes beträgt 4,0 kA. Schätzen Sie mit dieser Information die Entladungszeit der Wolke ab. Beschreiben Sie die gemachten Annahmen und Näherungen.
 - Noch bevor es zu einer Entladung kommt, drückt ein Fallwind die Wolke auf eine niedrigere Höhe herab. Die Ladung der Wolke bleibt dabei konstant. Beschreiben Sie qualitativ die Änderung der elektrischen Feldstärke zwischen Wolke und Erde. Beurteilen Sie, ob eine Entladung der Wolke dadurch wahrscheinlicher wird.



Vermischte Aufgaben

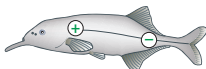
14) Mit einem Massenspektrometer lassen sich im Labor Massen von geladenen Teilchen bestimmen. Einen möglichen Aufbau zeigt die Abbildung: Eine Ionenquelle erzeugt einfach positiv geladene Ionen unterschiedlicher Masse und Geschwindigkeit. Der Ionenstrahl läuft nach rechts, zwischen zwei Metallplatten P_1 und P_2 hindurch, bis er auf die Lochblende L trifft. Von da an bewegt er sich in einem homogenen Magnetfeld mit der Flussdichte B_2 bis zu einer Detektorfläche.



- a) Fügen Sie in die Zeichnung die kompletten Bahnen von zwei Ionensorten ein, die durch das Magnetfeld rechts von der Lochblende fliegen und die an den beiden eingezeichneten Stellen registriert werden. Begründen Sie, dass es sich dabei um Halbkreisbahnen handeln muss.

Die Ionenstrahlen sollen bei L die einheitliche Geschwindigkeit $v = 90,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ besitzen. Dies kann durch eine geeignete Kombination von elektrischen und magnetischen Feldern im Raum zwischen Ionenquelle und Lochblende geschehen. Dazu wird an die Platten P_1 und P_2 – ähnlich wie an einen Kondensator – eine elektrische Spannung gelegt.

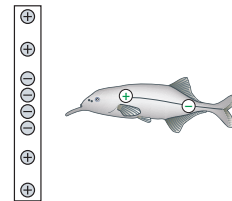
- b) Wählen Sie eine beliebige Polung der Platten. Beschreiben Sie die Orientierung eines homogenen Magnetfelds zwischen den Platten, mit denen sich ein geradliniger Ionenstrahl erreichen lässt. Übertragen Sie die Zeichnung oben in Ihr Heft und zeichnen Sie dieses Magnetfeld ein.
- c) Berechnen Sie mit einem geeigneten Ansatz die Feldstärke E_1 des elektrischen Feldes. Die Flussdichte in diesem Bereich soll $B_1 = 1,00 \text{ T}$ betragen.
- d) Die beiden markierten Stellen geben die Auftreffpunkte auf den Detektor für die Ionen NH_4^+ ($m = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$) und CH_4^+ ($m = 2,66 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$) an. Die Abstände von L betragen $d_1 = 59,7 \text{ mm}$ und $d_2 = 67,2 \text{ mm}$. Bei der Bewegung im Magnetfeld wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft. Zeigen Sie, ausgehend von einem entsprechenden Kräfteansatz, dass sich d allgemein bestimmen lässt als $d = \frac{2 \cdot E_1}{B_1 \cdot B_2} \cdot \frac{m}{q}$, wobei q die Ladung der Ionen bezeichnet.
- e) Ordnen Sie die Ionen richtig zu und berechnen Sie die Flussdichte B_2 .
- f) Zeichnen Sie die Bahnen ein ...
- eines Ions, das eine kleinere Geschwindigkeit als $90,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ besitzt.
 - eines Ions NH_4^{2+} (doppelte Ladung), das die Geschwindigkeit $90,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ besitzt.
- Begründen Sie jeweils die Bahnform.



15) Nilhechte sind „schwachelektrische Fische“, die ein selbst erzeugtes elektrisches Feld dazu benutzen, um sich in schlammigem Wasser zu orientieren. In einer vereinfachten Betrachtung werden die elektrischen Organe des Nilhechts durch eine positive und eine negative Ladung (Betrag jeweils $Q = 2,0 \cdot 10^{-10} \text{ C}$) dargestellt, die $d = 30 \text{ cm}$ voneinander entfernt sind.

- a) Übertragen Sie das Bild. Zeichnen Sie die Feldlinien (mit Richtung) und die Äquipotentiallinien ein.

- b) Das elektrische Feld in größerer Entfernung r vom Nilhecht kann bestimmt werden durch $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{d \cdot Q}{81r^3}$ (Nachweis nicht erforderlich). Berechnen Sie die Entfernung, in der das elektrische Feld den Wert $10^{-2} \frac{V}{m}$ hat.
- c) Der Nilhecht baut eine Spannung von etwa 3,0V auf. Schätzen Sie die Kapazität des Nilhechts und die in ihm gespeicherte elektrische Energie ab.
- d) Zur Simulation eines Hindernisses wird die Ladungsanordnung links des Fisches betrachtet. Zeichnen Sie auch hier (nur) die Feldlinien ein. Beschreiben Sie dann eine Hypothese, auf welche Art und Weise der Nilhecht die Veränderung in seiner Umgebung bemerken könnte.

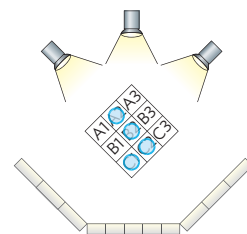


16) Die Röntgen-Tomographie kann mithilfe eines Schattenspiels erklärt werden: Die drei Lampen stellen drei Richtungen der Durchleuchtung mit Röntgenstrahlung dar, die Trinkgläser markieren die in einem Raumbereich absorbierende Materie. Die Abschwächung der Röntgenstrahlung wird an jeder Mattscheibe als Schwärzung dargestellt. Nur Letzteres ist bei Röntgenaufnahmen umgekehrt, denn durch die Absorption der Röntgenstrahlung fehlt an dieser Stelle eine Schwärzung des Röntgenbildes.

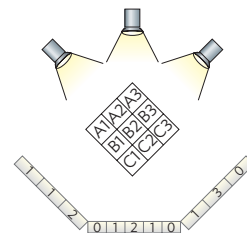


Prinzip der Projektionsröntgentechnik

- a) Aus den Positionen der durchstrahlten Gläser soll auf die Schwärzungen der Mattscheiben geschlossen werden. Übertragen Sie die Abbildung (1) in Ihr Heft und tragen Sie auf die Mattscheiben für die Anzahl der durchstrahlten Gläser z. B. „0“ für keines, „1“ für eines, „2“ für zwei oder „3“ für drei Schatten von durchstrahlten Gläsern ein.
- b) Umgekehrt sollen aus der Dunkelheit der Schatten auf den Mattscheiben die Positionen der lichtabschwächenden Gläser rekonstruiert werden. Übertragen Sie die Abbildung (2) in Ihr Heft und schreiben Sie die Ziffern auf den Mattscheiben in die zuvor durchstrahlten Felder. Addieren Sie diese Zahlen für jedes Feld und identifizieren Sie die Felder mit den größten Summen als die Positionen der Gläser.



(1) Dunkelheit der Schatten auf den Mattscheiben hinter 0, 1, 2 oder 3 lichtabschwächenden Gläsern



(2) Rekonstruktion der Positionen der lichtabschwächenden Gläser aus der Dunkelheit der Schatten auf den Mattscheiben

17) Im November 2006 kam in London der russische Ex-KGB-Agent Alexander Litvinenko durch einen spektakulären Giftmord ums Leben. In seinen Five o’Clock Tea wurde von unbekannter Hand eine gewisse Menge einer radioaktiven Substanz gegeben, was innerhalb von drei Wochen zum Tod führte. Bei dem Gift, das dem Opfer (Körpermasse 75 kg) verabreicht wurde, handelte es sich um etwa ein Millionstel Gramm des α -Strahlers Po-210. Selbst bei dieser winzigen Menge werden pro Sekunde im Körperinneren $2,2 \cdot 10^7$ α -Teilchen mit jeweils einer Energie von 5,3MeV frei und vom Gewebe absorbiert. Berechnen Sie die Ganzkörperäquivalentdosis für drei Wochen in Sv und mSv. Begründen Sie, dass Alexander Litvinenko daran starb.

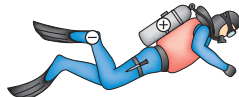


Selbsttest: Überprüfen Sie Ihre Kenntnisse und Kompetenzen



Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen unter [MC 67055-33](#)
- ✓ Bewerten Sie Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen 😊, 😐 oder 😞.



1 Haie besitzen Sinnesorgane, mit denen sie extrem schwache elektrische Felder wahrnehmen können.

a) Ein Text behauptet, Haie würden es bemerken, „ob eine 1,5-Volt-Batterie an- oder abgeschaltet ist, deren einer Pol im Atlantik vor New York und deren anderer Pol vor Florida eingetaucht wäre“. Die Entfernung zwischen New York und Florida ist etwa 1500 km. Berechnen Sie die Feldstärke, welche die Haie demnach noch wahrnehmen könnten, und nennen Sie die Vereinfachungen, die in dieser Berechnung enthalten sind.

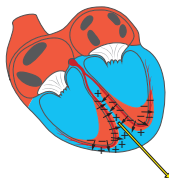
b) Starke elektrische Felder sind für Haie jedoch schmerzhaft. Die abgebildete Schutz-einheit für Taucher besteht aus zwei unterschiedlich geladenen Elektroden am Fußgelenk und am Sauerstofftank (Betrag der Ladung jeweils $Q = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$), die $d = 50 \text{ cm}$ voneinander entfernt sind. Übertragen Sie die Skizze in Ihr Heft und zeichnen Sie in das Bild die Feldlinien (mit Richtung) und die Äquipotentiallinien ein. Erklären Sie, dass der Schutz nicht in alle Richtungen gleich gut ist.

c) Das betrachtete Feld kann in der Entfernung r vom Taucher berechnet werden:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{d \cdot Q}{81 \cdot r^3} \text{ (Nachweis nicht erforderlich).}$$

Berechnen Sie die Entfernung, in der das Feld den für Haie schmerzhaften Wert $10^{-2} \frac{\text{V}}{\text{m}}$ hat.

d) Berechnen Sie die Spannung, die an den Elektroden anliegen muss, wenn ihre Kapazität $C = 8 \text{ nF}$ beträgt.

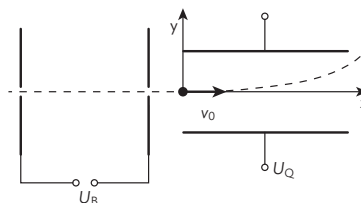


2 Bei dem in der Abbildung gezeigten Erregungszustand des Herzens erreicht der elektrische Dipolvektor seine maximale Stärke.

a) Definieren Sie den Begriff „elektrischer Dipolvektor“.

b) Übertragen Sie die Zeichnung schematisch und ergänzen Sie sie mit den Positionen von zwei Elektroden zwischen denen eine möglichst große Spannung bzw. gar keine Spannung gemessen werden kann.

3 In einer Elektronenablenkröhre werden Elektronen in einem elektrischen Längsfeld gleichmäßig beschleunigt. Anschließend treten sie in das homogene elektrische Querfeld eines Plattenkondensators ein. Die gesamte Anordnung befindet sich im Vakuum; die Gravitation kann vernachlässigt werden.



a) Die beschleunigten Elektronen sollen nach oben abgelenkt werden. Übertragen Sie die Skizze in Ihr Heft und zeichnen Sie die Polung aller Spannungen, die elektrischen Feldlinien sowie die elektrische Kraft am eingezeichneten Ort des Elektrons ein.

- b) Beschreiben Sie den Einfluss der Beschleunigungsspannung U_B und der Spannung am Plattenkondensator U_Q auf die Flugbahn der Elektronen im Experiment. Unterscheiden Sie verschiedene Fälle, also z. B. auch nur $U_B \neq 0$ und $U_Q = 0$.
- c) Berechnen Sie U_B , wenn durch diese Spannung die Elektronen auf die Geschwindigkeit $v_0 = 1,9 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beschleunigt werden.
- d) Die elektrische Feldstärke im rechten Kondensator beträgt $12,5 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$. Ein zusätzliches magnetisches Feld soll dafür sorgen, dass die Elektronen nicht mehr abgelenkt werden. Ergänzen Sie in Ihrer Skizze die Richtung der nötigen Lorentzkraft und des verursachenden Magnetfelds. Bestimmen Sie den nötigen Wert der magnetischen Flussdichte.
- 4 a) Erstellen Sie eine Skizze mit den wichtigsten Bestandteilen eines Zyklotrons und erläutern Sie jeweils deren Funktion.
- b) Erklären Sie, dass für die Funktionsweise des Zyklotrons die konstante Umlaufzeit der Teilchen entscheidend ist.
- c) Wenn die Teilchengeschwindigkeit in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommt, muss in der Formel für den Radius r der Kreisbahn der relativistische Impuls berücksichtigt werden: $r = \gamma \cdot \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$ mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Begründen Sie, dass damit ein Zyklotron wie in Kapitel 7.3 beschrieben nicht mehr funktionieren kann.
- d) Betrachten Sie die Nutzwertanalyse auf S. 136. Anders als Herr Maier entscheidet sich Frau Müller bei gleicher Ausgangslage zu einer Behandlung mit Elektronen. Erläutern Sie eine Möglichkeit für das Zustandekommen dieser Entscheidung.
- 5 a) Erklären Sie anhand des Aufbaus einer Röntgenröhre die Entstehung von Röntgenbremsstrahlung. Gehen Sie dabei auch auf den Entstehungsort in der Röhre ein.
- a) Bis 2018 gab es einen „Röntgenpass“, in dem für einen Patienten jede Röntgenuntersuchung dokumentiert werden musste. Bewerten Sie den Sinn dieser Maßnahme und geben Sie mögliche Gründe dafür an, dass heute ein Röntgenpass nicht mehr verpflichtend ist.

Auswertungstabelle

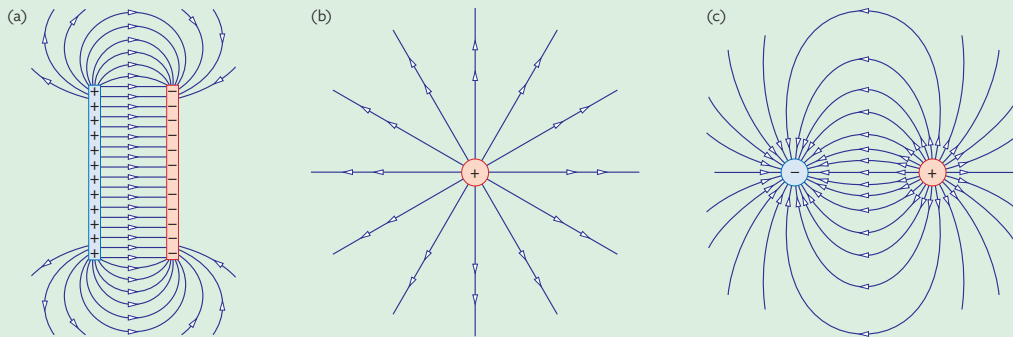
Ich kann ...	Hilfe
1 das Verhalten von geladenen und magnetischen Gegenständen in elektrischen und magnetischen Feldern beschreiben und erklären, auch mit Größengleichungen für die elektrische Feldstärke, die magnetische Flussdichte sowie die zugehörigen Kräfte.	S. 112–114, 128, 129
2 bei einer vorgegebenen Ladungsverteilung das elektrische Potential vorhersagen und messen.	S. 118–120
3 anhand von Messergebnissen an einem elektrischen Dipol die Funktionsweise eines EKGs erklären.	S. 121–124
4 die Bewegung geladener Teilchen in homogenen elektrischen Querfeldern beschreiben sowie in homogenen elektrischen Längsfeldern und homogenen magnetischen Feldern auch berechnen.	S. 128–133
5 das Funktionsprinzip des Zyklotrons erläutern und vorgegebene Bewertungen, die Nutzen und Risiken von Strahlentherapien gegenüberstellen, analysieren.	S. 134–137
6 die Entstehung von Röntgenbremsstrahlung erklären und die Folgen eines medizinischen Einsatzes von Röntgenstrahlung reflektieren.	S. 140–142, 144–147

Elektrische Felder

Beschreibung elektrischer Felder

- Elektrische Feldlinien stehen auf Leiterflächen senkrecht.
- Elektrische Feldlinien schneiden sich nicht.
- Elektrische Felder zeigen von der positiven Elektrode zur negativen.
- Elektrische Feldlinien beginnen und enden immer auf Ladungen.
- Im Inneren eines Leiters existiert kein Feld.
- Ladungen in Leitern konzentrieren sich dort, wo das Feld am stärksten ist.

Besondere elektrische Felder:



Elektrische Feldlinien für ein (a) homogenes Feld, (b) ein radialsymmetrisches Feld und (c) ein Dipolfeld

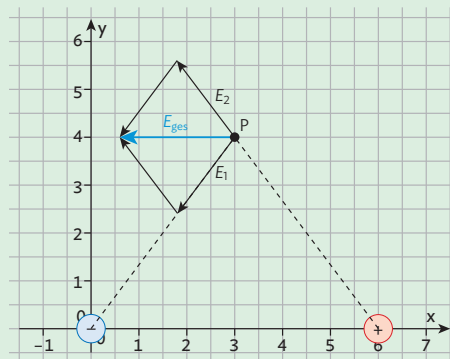
Elektrische Feldstärke \vec{E}

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} \quad [\vec{E}] = \frac{1\text{N}}{1\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad \text{Kraft } \vec{F}_{el} \text{ auf Probeladung } q$$

Feldstärke E eines radialsymmetrischen Feldes (geladene Kugel mit Ladung Q) im Abstand r :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \text{ (elektrische Feldkonstante)}$$

Die elektrische Feldstärke besitzt wie die elektrische Kraft eine Richtung, sie ist eine vektorielle Größe. Feldstärken können auf die gleiche Weise wie Kräfte vektoriell addiert werden (Superpositionsprinzip). In komplizierteren Ladungsanordnungen werden deshalb zunächst die Feldstärken bestimmt, die von den Einzelladungen erzeugt werden. Aus ihnen ergibt sich dann die Gesamtfeldstärke.



Kapazität

Die Kapazität C ist ein Maß dafür, wie viel Ladung Q bei einer Spannung U gespeichert werden kann.

$$C = \frac{Q}{U} \quad [C] = \frac{1C}{1V} = 1F \text{ (Farad)}$$

Kapazität eines Plattenkondensators

(luftgefüllt oder im Vakuum):

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \text{ (elektrische Feldkonstante)}$$

A : Flächeninhalt einer Kondensatorplatte

d : Abstand der Kondensatorplatten

Energieinhalt eines Kondensators

$$E_{\text{Kond}} = \frac{1}{2} \cdot U_0 \cdot Q_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_0^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot U_0^2 \cdot C$$

Potential und Feldstärke**Spannung und elektrische Feldstärke**

Die elektrische Feldstärke im homogenen Feld eines Plattenkondensators hängt nur von der anliegenden Spannung U und dem Plattenabstand d ab. Es gilt:

$$E = \frac{U}{d}$$

In allgemeinen elektrischen Feldern kann die Feldstärke aus der Potentialänderung $\Delta\varphi$ längs eines kurzen Wegstücks Δx bestimmt werden:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

Feldlinien und Äquipotentiallinien

Orte mit dem gleichen elektrischen Potential werden durch eine Äquipotentiallinie verbunden. Feldlinien und Äquipotentiallinien stehen überall aufeinander senkrecht.

Elektrokardiogramm (EKG)

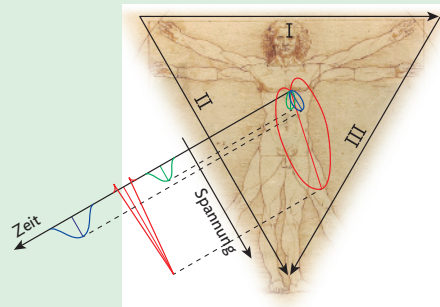
Herzmuskelzellen ziehen sich bei elektrischer Erregung zusammen und sind so für die Kontraktion des Herzmuskels und damit für seine Pumpwirkung verantwortlich („elektromechanische Kopplung“). Die elektrische Erregung des Herzmuskels geht vom Sinusknoten aus und breitet sich über die Vorhöfe und die Herzspitze bis zu den Herzkammern aus.

Das einfachste Modell für die elektrischen Vorgänge im Herzen betrachtet alle Herzmuskelzellen zusammen als einen elektrischen Dipol, der im Laufe eines Herzzyklus seinen Betrag und seine Richtung ändert. Bei festem Ursprung beschreibt der Dipolvektor eine Bahn im dreidimensionalen Raum. Bei einer EKG-Messung wird der Dipolvektor auf festgelegte Linien („Ableitungen“) projiziert und dort der zeitliche Verlauf aufgezeichnet.



Elektrischer Dipolvektor

Außerhalb der Ladungsschwerpunkte stimmt die Richtung des elektrischen Dipolvektors mit der des resultierenden elektrischen Feldes überein. Sein Betrag ist umso größer, je größer die beiden Ladungen sind und je weiter sie auseinander liegen.



Zusammenfassung

Magnetische Felder

Magnetische Flussdichte B

$$B = \frac{F_m}{I \cdot s} \quad [B] = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T (Tesla)}$$

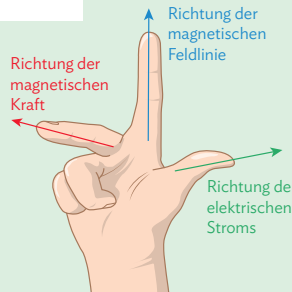
F_m : Kraft, die im Magnetfeld auf einen von einem Strom der Stromstärke I durchflossenen Leiter der Länge s wirkt

Lorentzkraft F_L

Auf eine Ladung q , die sich mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld der Flussdichte B bewegt, wirkt die Lorentzkraft F_L :

$$F_L = q \cdot v \cdot B$$

Die Richtung von F_L ergibt sich für positive Ladungen aus der Drei-Finger-Regel der rechten Hand:



Für negative Ladungen weist der Daumen entgegen der Geschwindigkeitsrichtung.

Bewegung geladener Teilchen

Bewegung im elektrischen Längsfeld

In einem elektrischen Längsfeld kann der Geschwindigkeitsbetrag v eines geladenen Teilchens verändert werden. Beim Start aus der Ruhe ist

$$v_{\text{Ende}} = \sqrt{\frac{2 \cdot |q \cdot U_B|}{m}}$$

q : Ladung des Teilchens; m : Masse des Teilchens; U_B : angelegte Spannung

Bewegung im elektrischen Quersfeld

Schießt man geladene Teilchen senkrecht zu den Feldlinien des elektrischen Feldes in einen Kondensator ein, so werden sie abgelenkt (negative Ladungen zur positiven Platte, positive Ladungen zur negativen Platte).

Bewegung im Magnetfeld

In einem homogenen Magnetfeld können bewegte geladene Teilchen durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gezwungen werden. Es ändert sich die Richtung der Geschwindigkeit, nicht aber ihr Betrag. Um den Bahnradius r zu bestimmen, betrachtet man die Lorentzkraft als Zentripetalkraft:

$$F_Z = F_L \quad \frac{m_e \cdot v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad r = \frac{m_e \cdot v}{e \cdot B}$$

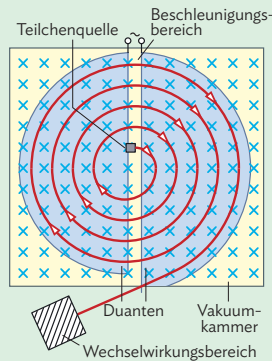
Zyklotron

In einem Zyklotron werden geladene Teilchen von einem elektrischen Wechselfeld beschleunigt und von einem Magnetfeld auf eine Kreisbahn abgelenkt. Aus dem Ansatz Zentripetalkraft = Lorentzkraft ergibt sich:

$$\text{Radius } r \text{ der Kreisbahn: } r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

m : Masse des Teilchens, v : Geschwindigkeit des Teilchens; q : Ladung des Teilchens; B : Flussdichte des Magnetfelds

Zyklotronfrequenz f des elektrischen Wechselfeldes: $f = \frac{q \cdot B}{2\pi \cdot m}$



Protonentherapie

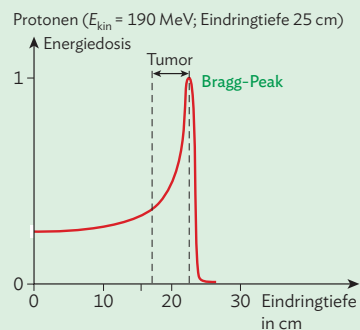
Tiefendosis und Tiefendosisprofil

Die Tiefendosis T ist die Energiedosis in einer bestimmten Tiefe des Körpers. Im Tiefendosisprofil wird die Tiefendosis über der Gewebetiefe in einem Diagramm aufgetragen.

Die relative Tiefendosis T/T_{max} ist das Verhältnis der Tiefendosis zu ihrem Maximalwert.

Bestrahlung mit Protonen und schweren Ionen

Diese Art der Bestrahlung ermöglicht die Energieabgabe der Strahlung in einer ganz bestimmten Eindringtiefe, bei der die Tiefendosis ihren Maximalwert erreicht („Bragg-Peak“) und danach steil abfällt.

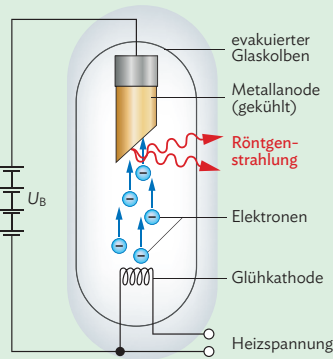


Röntgenstrahlung und ihre Wirkung

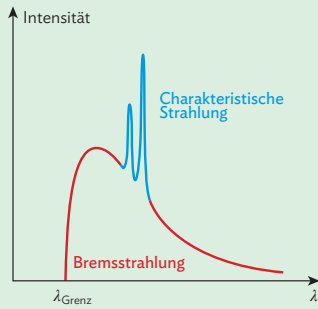
Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen. Ihre Wellenlänge λ liegt zwischen 10 nm und 10 pm.

Erzeugung und Spektrum von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlen werden in einer Röntgenröhre erzeugt. Sie entstehen, wenn aus der Glühkathode ausgetretene und von einer Hochspannung beschleunigte Elektronen auf die Metallanode treffen.



Das Röntgenspektrum besteht aus Bremsstrahlung und charakteristischer Strahlung.



Bremsstrahlung entsteht durch das Abbremsen der beschleunigten Elektronen in der Metallanode. Die charakteristische Strahlung kommt durch quantenphysikalische Vorgänge im Atom zustande; ihre konkrete Wellenlänge hängt deshalb von der Atomsorte des Anodenmaterials ab.

Röntgenbilder in der Medizin

Röntgenstrahlung durchdringt Materie und wird dabei von verschiedenen Materialien unterschiedlich stark abgeschwächt. Dies wird bei der Erzeugung von Röntgenbildern genutzt. So z. B. schwächen Knochen Röntgenstrahlung stärker ab als das sie umgebende Gewebe und erscheinen auf Röntgenbildern hell. Die Abschwächung wird durch die Halbwertsdicke $D_{1/2}$ beschrieben. Dies ist die Schichtdicke, nach der die Intensität der Strahlung auf die Hälfte gesunken ist.

Ionisierende Wirkung

Röntgenstrahlung kann Materialien ionisieren, was zu Schäden im Gewebe führen kann.

Die Wirkung einer Strahlung auf den Körper wird anhand der Äquivalentdosis H als pro Masseneinheit absorbiertes Energie abgeschätzt:

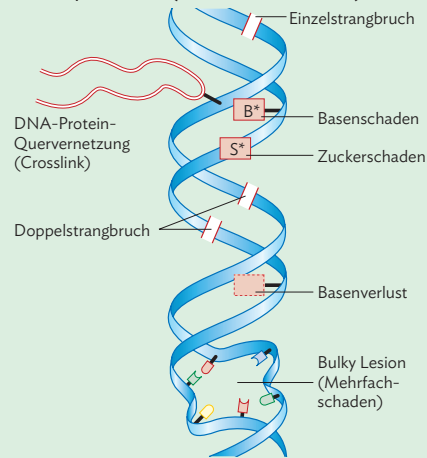
$$H = q \cdot \frac{\Delta E_{\text{abs}}}{\Delta m} \quad [H] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sv (Sievert)}$$

q : für die Strahlung charakteristischer Qualitätsfaktor (Röntgenstrahlung: $q = 1$)

Biologische Wirkung

Im menschlichen Körper kann ionisierende Strahlung Moleküle, z. B. die DNA, schädigen. An der DNA sind folgende Schäden möglich:

- Basenschaden oder -verlust
- Veränderung der Zuckermoleküle
- Einzelstrang- oder Doppelstrangbruch
- Crosslinks (DNA-Quervernetzungen)
- Bulky Lesions (Mehrfachschäden)



Die Zellen des Körpers können Schäden reparieren, dabei können aber Fehler passieren, die z. B. zu Mutationen führen können. Diese können zur Entwicklung von Krebs oder zu Organschäden führen. Diese biologische Phase der Strahlungswirkung kann wenige Minuten, aber auch Jahrzehnte dauern, was die Ermittlung von Strahlung als Ursache einer Erkrankung erheblich erschweren kann.

Strahlentherapie

Röntgenstrahlen können Krebs verursachen, sie können aber auch zu dessen Behandlung eingesetzt werden. Hierbei macht man sich zunutze, dass schnell wachsende Krebszellen besonders strahlungsempfindlich sind.



C.C.BUCHNER T67055