

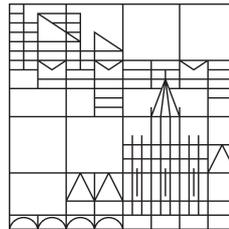
Projektorientiertes Arbeiten im Bereich Schwingungen mit phyphox

Wissenschaftliche Arbeit für das Lehramt an Gymnasien

vorgelegt von:
Niklas Westermann

an der

Universität
Konstanz



Naturwissenschaftliche Sektion
Fachbereich Physik

Gutachter: Dr. Philipp Möhrke
Konstanz 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Physikalische Grundlagen	2
2.1.1	Der Kondensator	2
2.1.2	Die Spule	3
2.1.3	Der Widerstand	5
2.1.4	Der Schwingkreis	6
2.1.5	Hall-Sensor	8
2.1.6	phyphox und Sensoren im Smartphone	10
2.2	Physikalische Grundlagen aus der Schule	12
2.2.1	Fachwissenschaftliche Einordnung in den Lehrplan	12
2.2.2	Sachstrukturdiagramm	13
2.3	Didaktische Grundlagen	15
2.3.1	Eigenschaften und Aufbau von Projekten	15
2.3.2	Offene Experimente und Aufgaben	18
3	Versuchsaufbau und Auswertung	20
3.1	Versuchsaufbau mit dem Smartphone	20
3.2	Auswertung und Fehlerdiskussion	22
4	Projekt und Experimente	30
4.1	Eigenschaften des Teilprojektes "elektromagnetischer Schwingkreis"	31
4.2	Teil I: Kennenlernen von phyphox	33
4.3	Teil II: Aufbau über einen vorgegebenen Schaltkreis	37
4.4	Teil II: Aufbau über einen Graphen	38
4.5	Teil II: Aufbau über eine Rechercheaufgabe	39
4.6	Teil III: Erklärung mit einer Recherche	41
4.7	Teil III: Erklärung analog zur mechanischen Schwingung	43
4.8	Teil IV: Untersuchen	44
4.9	Teil IV: Optimieren	44
4.10	Teil V: Differentialgleichung	45
4.11	Teil V: Quantifizierung der Messwerte	46
5	Durchführung mit Versuchspersonen	49
5.1	Gruppe 1	49

5.2	Gruppe 2	49
5.3	Gruppe 3	50
6	Zusammenfassung und Ausblick	51
7	Literatur	53
8	Anhang	54

1 Einleitung

Schwingungen sind ein Alltagsphänomen, mit dem Schülerinnen oft in Berührung kommen. Das kann die Schaukel auf dem Spielplatz für die Jüngeren sein oder später im Sportunterricht beim Turnen an Ringen oder beim Slacklinen. Aber nicht nur mechanische Schwingungen begleiten uns ständig im Alltag, sondern auch akustische Schwingungen, die sich in Tönen bemerkbar machen.

Das letzte große Teilgebiet sind die elektromagnetischen Schwingungen, die zwar weniger "greifbar" aber trotzdem nicht weniger alltäglich sind. Mit diesen Schwingungen, genauer dem parallelen elektromagnetischen Schwingkreis, beschäftigt sich diese Arbeit.

Als Messgerät kommt der Magnetsensor eines Smartphones zum Einsatz, ein Gerät das inzwischen fast alle Schüler besitzen, und das als Messgerät im Physikunterricht an vielen Stellen eingesetzt werden kann. Die gezeigten Experimente sind darauf optimiert, mit wenigen und günstigen Materialien auch von "Zuhause" aus durchführbar zu sein. Wenn ein viel genutztes Alltagsgerät im Unterricht verwendet wird, kann dies bei Experimenten außerdem zu höherem Interesse der Schülerinnen und Schüler führen, ein weiterer Vorteil von Smartphone-gestützten Experimenten [Hochberg et al., 2018].

Zur Aufnahme der Messwerte wird die App `phyphox`¹ verwendet, die an der RWTH Aachen seit 2015 entwickelt wird. Sie bietet die Möglichkeit, so gut wie alle Sensoren eines Smartphones auszulesen und die Messwerte auf einer Zeitachse darzustellen.

Diese Arbeit befasst sich zuerst mit den physikalischen und technischen Grundlagen, die für die Experimente und deren Auswertung nötig sind (2.1). Mit den physikalischen Grundlagen aus der Schule (2.2) und den didaktischen Grundlagen (2.3) werden die nötigen Voraussetzungen erarbeitet, die für Inhalt und Struktur des Projektes nötig sind. Anschließend wird der experimentelle Aufbau vorgestellt und eine Auswertung einiger Daten vorgenommen (3). Schlussendlich wird eine Reihe vollständig ausgearbeiteter Experimente, die in einer Projektarbeit verwendet werden können, vorgestellt (4) und mit Studierenden durchgeführt (5).

¹<https://phyphox.org>

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

Der elektrische Parallelschwingkreis (im Folgenden nur Schwingkreis) besteht aus zwei Bauteilen: einem Kondensator (C-Glied, Kapazität) und einer Spule (L-Glied, Induktivität). Zusätzlich kann noch ein Widerstand (R-Glied) vorhanden sein (siehe auch Abb. 2.1). Diese drei Bauteile und ihre grundlegenden Eigenschaften sollen nun beschrieben werden.² Anschließend werden die physikalischen Abläufe im Schwingkreis erläutert und die relevanten Formeln hergeleitet. Der letzte Teil dieses Abschnittes geht auf den im Smartphone verwendeten Magnetensensor und dessen Funktionsweise ein.

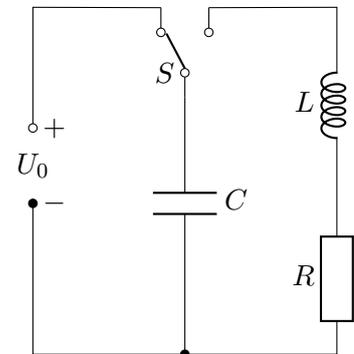


Abb. 2.1: Aufbau eines Parallelschwingkreises

2.1.1 Der Kondensator

Ein *Kondensator* besteht aus zwei elektrisch leitenden Platten, die sich parallel mit Abstand d gegenüber liegen (s. Abb. 2.2). Wird an einer der Platten eine Spannungsquelle angeschlossen, lädt sich diese Platte z.B. mit einer Ladung $+Q$ auf, was eine Ladungsverschiebung in der gegenüberliegenden zweiten Platte verursacht. Dabei sammelt sich auf der der ersten Platte zugewandten Seite die Ladung $-Q$ und auf der abgewandten Seite die Ladung $+Q$. Wird die Außenseite der zweiten Platte geerdet, kann diese Ladung abfließen und es befindet sich nur noch die Ladung $-Q$ auf der zweiten Platte.

Für die Ladung Q , die sich auf dem Kondensator befindet, ergibt sich mit der angelegten Spannung U und einer Proportionalitätskonstante C :

$$Q = C \cdot U \quad (2.1)$$

C ist die *Kapazität* des Kondensators und wird in $\text{C V}^{-1} = \text{F}$ (Farad) angegeben.

Das elektrische Feld im Kondensator hängt von der Spannung zwischen beiden Platten und deren Abstand d ab.

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.2)$$

Die Kapazität hängt ebenfalls vom Abstand der beiden Platten ab, aber auch von deren Fläche A und der *Dielektrizitätskonstante* mit $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$:

²Sofern nicht anders angegeben sind alle physikalischen Grundlagen aus [Demtröder, 2013].

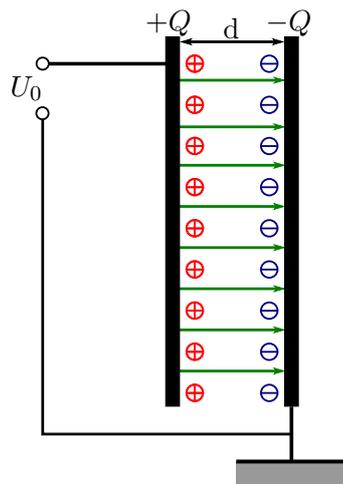


Abb. 2.2: Schema eines geladenen und geerdeten Kondensators mit angedeuteten Ladungen in rot und blau, elektrische Feldlinien in grün.

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

Die Energie, die im elektrischen Feld eines Kondensators gespeichert ist, wird berechnet mit (wobei die letzte Umformung nur für einen Plattenkondensator mit Plattenfläche A gilt):

$$W_C = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 A d \quad (2.4)$$

Wird ein *Dielektrikum* zwischen die beiden Platten gebracht, erhöht sich die Kapazität um den Materialfaktor ϵ . Das liegt daran, dass im Dielektrikum die Ladungsschwerpunkte der Atome verschoben werden, was eine Abschwächung des elektrischen Feldes verursacht.

Werden mehrere Kondensatoren parallel geschaltet, so liegt an allen Kondensatoren die gleiche Spannung an und sie werden gleich geladen. Die Gesamtkapazität ist also die Summe der Einzelkapazitäten. Bei einer Reihenschaltung liegt an jedem Kondensator nur ein Bruchteil der Spannung an, die einzelnen Kondensatoren C_i werden also weniger aufgeladen, es gilt $\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}$.

2.1.2 Die Spule

Die Spule ist neben dem Kondensator das entscheidende Bauteil um im elektrischen Schwingkreis die Schwingung zu erzeugen. Für die Beschreibung muss zwischen statischen und zeitlich veränderlichen Feldern unterschieden werden.

Nach dem AMPÈRE'schen Gesetz entsteht ein statisches Magnetfeld, wenn ein Leiter von einem konstanten Strom I durchflossen wird. Wickelt man einen solchen Leiter zu einer Spule mit N Windungen, findet man experimentell, dass innerhalb einer langen Spule, deren Durchmesser klein gegenüber der Gesamtlänge L ist, ein fast homogenes Magnetfeld herrscht. Die Stärke des Magnetfeldes wird in Tesla, T angegeben und ist (mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$, der *magnetische Induktionskonstante*):

$$B = \mu_0 I \frac{N}{L} \quad (2.5)$$

Die Stärke des Magnetfeldes einer dicken Zylinderspule mit Querschnittsfläche A ist (als z-Achse wird dabei die Symmetrieachse gewählt, $z \gg L$):

$$B(z) \approx \frac{\mu_0 N I A}{4\pi L} \cdot \left(\frac{1}{(z - L/2)^2} - \frac{1}{(z + L/2)^2} \right) \quad (2.6)$$

Wird das Feld direkt an einem der beiden Spulenden bei $\frac{L}{2}$ gemessen, ergibt sich für $L \gg A$:

$$B = \frac{N}{2L} \mu_0 I \quad (2.7)$$

Das Magnetfeld einer Spule kann mit einem Eisenkern verstärkt werden. In diesem Fall (ferromagnetisches Material) richten sich die schon vorhandenen magnetischen Dipolmomente des Eisens am äußeren Magnetfeld aus, wodurch ein zweites verstärkendes Feld entsteht. Die Größe der Verstärkung wird mit der *magnetischen Suszeptibilität* χ angegeben. Es gilt:

$$B_{\text{Materie}} = \mu B_{\text{Vakuum}} = (1 + \chi) B_{\text{Vakuum}} \quad (2.8)$$

Wobei μ die *relative Permeabilität* ist und keine Dimension hat.

Bis jetzt wurden nur statische Ströme und Felder betrachtet. Ändert sich der Strom über die Zeit, treten in einem Leiter jedoch noch weitere Effekte auf, die nun betrachtet werden sollen. Grundlegend hierfür ist das FARADAY'sche Induktionsgesetz:

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.9)$$

In Worten formuliert bedeutet dieses Gesetz, dass die zeitliche Änderung eines Magnetfeldes eine Spannung in einem Leiter induziert. Des Weiteren kann aus (2.9) die LENZ'sche Regel abgeleitet werden: die induzierte Spannung ist dem sich verändernden Magnetfeld "entgegengerichtet". Bewegt man einen Stabmagneten in einem kreisförmigen

Leiter, wird eine Spannung und damit ein Strom induziert. Dieser Strom erzeugt wiederum ein Magnetfeld, das entgegengesetzt zu dem des Stabmagneten ausgerichtet ist. "Die durch Induktion entstehenden Ströme, Felder und Kräfte behindern [also] stets den die Induktion einleitenden Vorgang" [Demtröder, 2013, S. 127].

Mit dem AMPÈRE'schen Gesetz findet man folgende Umformung:

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \quad (2.10)$$

Die Proportionalitätskonstante L ist der *Selbstinduktionskoeffizient* und wird in Henry ($\text{H} = \text{Vs A}^{-1}$) angegeben. Er gibt an, wie groß die Spannung werden kann, die in der Spule bei einer Änderung des Feldes entgegengerichtet zur angelegten Spannung entsteht.

Mit einer kurzen Herleitung findet man für eine Spule (Länge l , Fläche A):

$$L = \mu_0 \left(\frac{N}{l}\right)^2 lA \quad (2.11)$$

Die Energie des magnetischen Feldes einer Spule ist ähnlich der Energie im Kondensator:

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.12)$$

2.1.3 Der Widerstand

Die Stromstärke wird definiert als Quotient aus Ladungsänderung und Zeit, die Einheit ist Ampere (A):

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.13)$$

Das heißt, die Stromstärke ist abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit der Ladungsträger. Diese Geschwindigkeit ist wiederum abhängig von Material und den Dimensionen des Leiters und dem elektrischen Feld im Leiter (das proportional zur Spannung ist). Für die Stromstärke in einem Leiter findet man:

$$I = \frac{\sigma_{el}A}{L}U = \frac{A}{\varrho_s L}U = \frac{U}{R} \quad (2.14)$$

Mit Querschnittsfläche A , Länge L , sowie dem *elektrischen Widerstand* R in Ω , der *elektrische Leitfähigkeit* σ_{el} und dem *spezifischen Widerstand* ϱ_s .

2.1.4 Der Schwingkreis

Der elektromagnetische Parallelschwingkreis setzt sich aus allen drei oben beschriebenen Bauteilen zusammen. Zuerst wird auf die physikalischen Abläufe eingegangen und anschließend die Differentialgleichung gelöst.

Als Erstes wird der Kondensator über eine Spannungsquelle geladen, der Schalter S befindet sich in "Ladestellung" (Abb. 2.4). Ist der Kondensator geladen, wird der Schalter umgelegt und damit der rechte Stromkreis geschlossen. Zum Zeitpunkt des Schließens fließt noch kein Strom (Abb. 2.5). Nun wird der Kondensator über die Spule entladen, in der Spule baut sich ein Magnetfeld auf (Abb. 2.6 und Abb. 2.7). Durch die Entladung des Kondensators sinkt der Stromfluss und damit die Stärke des Magnetfeldes, was dazu führt, dass eine Induktionsspannung entsteht, die diese Abnahme hemmt. Diese ist so gepolt, dass der Kondensator nun anders herum geladen wird (Abb. 2.8 und 2.9). Ist das Magnetfeld komplett zusammengebrochen, beginnt der Vorgang von neuem. Wie beim mechanischen Federpendel werden zwei Energieformen periodisch ineinander umgewandelt: die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie und die Energie des von der Spule erzeugten Magnetfeldes.

Für die Differentialgleichung werden nach den KIRCHHOFF'schen Regeln die Spannungen an allen Bauteilen addiert, die Gesamtspannung ist Null. Die Spannung an der Spule ist die durch die Änderung des Magnetfeldes induzierte Spannung U_L . Der Kondensator wurde zu Beginn mit der Spannung U_C geladen und am Widerstand fällt die Spannung U_R nach 2.14 ab.

Diese Spannungen werden dann in Ströme und schlussendlich in Ladungen umgeformt um eine lösbare Differentialgleichung zu formulieren:

$$0 = U_L(t) + U_R(t) + U_C(t) \quad (2.15)$$

$$= L \cdot \frac{dI(t)}{dt} + R \cdot I(t) + \frac{1}{C} \cdot Q(t) \quad (2.16)$$

$$= L \cdot \ddot{Q}(t) + R \cdot \dot{Q}(t) + \frac{1}{C} \cdot Q(t) \quad (2.17)$$

$$= \ddot{Q}(t) + \frac{R}{L} \dot{Q}(t) + \frac{1}{LC} Q(t) \quad (2.18)$$

$$= \ddot{Q}(t) + 2\beta \dot{Q}(t) + \omega_0^2 Q(t) \quad (2.19)$$

Dabei ist der *Dämpfungsfaktor*

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (2.20)$$

und die *Resonanzfrequenz*

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.21)$$

Mit dem Ansatz $Q(t) = Ae^{\alpha t}$ ergibt sich nun

$$\alpha_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} = -\beta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = -\beta \pm i\omega_g \quad (2.22)$$

mit der *Eigenkreisfrequenz* $\omega_g = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$. Diese beschreibt die Frequenz der Schwingung mit Dämpfung.

Die Lösung der Differentialgleichung lautet dann:

$$Q(t) = A_1 e^{(-\beta + i\omega_g)t} + A_2 e^{(-\beta - i\omega_g)t} = e^{-\beta t} (A_1 e^{i\omega_g t} + A_2 e^{-i\omega_g t}) \quad (2.23)$$

Um die Vorfaktoren zu berechnen, müssen Randbedingungen festgelegt werden. Beim Umlegen des Schalters S bei $t = 0$ befindet sich die Ladung $Q_0 = C \cdot U$ auf dem Kondensator, und es fließt ein Strom I_0 . Da im Moment des Umlegens im verwendeten Versuchsaufbau aber noch kein Strom fließt, wird in der Auswertung $I_0 = 0$ gesetzt.

$$Q(t=0) = Q(0) = Q_0 \quad (2.24)$$

$$\dot{Q}(t=0) = \dot{Q}(0) = \dot{Q}_0 = I_0 (= 0) \quad (2.25)$$

Mit den aus den Randbedingungen errechneten Vorfaktoren ist die allgemeine **Lösung** der Differentialgleichung (aus [Borchardt, 2020] und [Demtröder, 2013]):

$$Q(t) = e^{-\beta t} \left(\left(\frac{Q_0(\beta + i\omega_g) + I_0}{2i\omega_g} \right) e^{i\omega_g t} + \left(\frac{-Q_0(\beta - i\omega_g) - I_0}{2i\omega_g} \right) e^{-i\omega_g t} \right) \quad (2.26)$$

Mit den EULERSchen Formeln und einer Ableitung ergeben sich die Formen:

$$Q(t) = e^{-\beta t} \left(\frac{Q_0\beta + I_0}{\omega_g} \sin(\omega_g t) + Q_0 \cos(\omega_g t) \right) \quad (2.27)$$

$$I(t) = e^{-\beta t} \left(\left(-\frac{Q_0\beta^2 + I_0\beta}{\omega_g} + Q_0\omega_g \right) \sin(\omega_g t) - I_0 \cos(\omega_g t) \right) \quad (2.28)$$

β kann analog zum radioaktiven Zerfall wie eine Zerfallskonstante ($\tau = \frac{1}{\beta}$) behandelt werden. Dann kann die Halbwertszeit berechnet werden, die den Zeitpunkt angibt, bei der die Einhüllende halb so groß ist wie zum Startzeitpunkt.

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\beta} \approx \frac{0,7}{\beta} \approx \frac{L}{R} \quad (2.29)$$

Es werden für das Schwingungsverhalten drei Fälle unterschieden, die von der Eigenkreisfrequenz ω_g abhängen. Eine *gedämpfte Schwingung* ergibt sich, wenn ω_g reell ist, also $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$. Die Schwingungsgleichungen (2.28) können direkt übernommen werden (siehe dazu auch Abb. 2.3). Beim *Kriechfall* fällt die Ladung monoton und nähert sich $Q = 0$ asymptotisch, ω_g ist imaginär, also $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$. Wenn $\omega_g = 0$, also $\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2}$, tritt der *aperiodische Grenzfall* ein.

Beispiel einer Schwingung

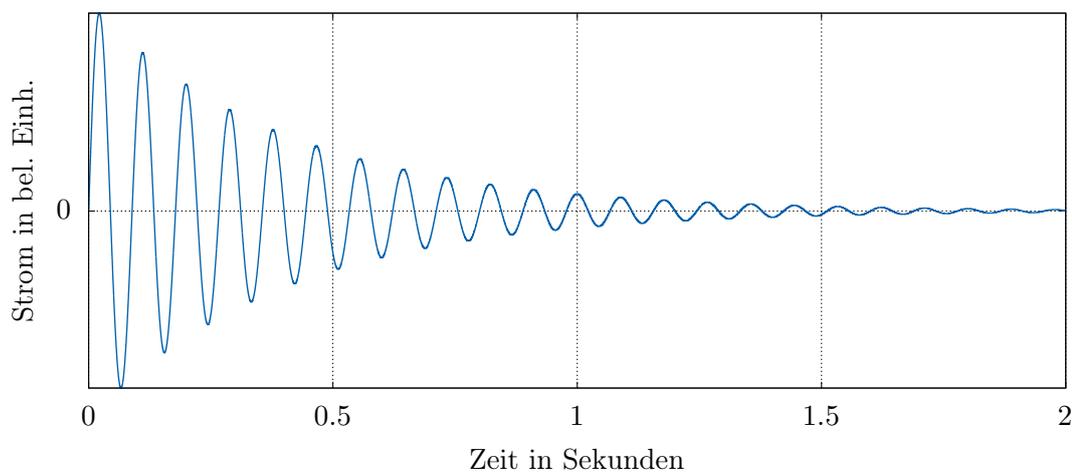


Abb. 2.3: Graphische Darstellung der Lösung der Schwingungsgleichung mit $C = 10.000 \mu\text{F}$, $L = 20 \text{ mH}$ und $R = 0,1 \Omega$

2.1.5 Hall-Sensor

Der in Smartphones verwendete Magnetsensor ist ein Hall-Sensor, auf den hier kurz eingegangen werden soll.

Bewegen sich Ladungsträger durch ein Magnetfeld, werden diese durch die Lorentzkraft abgelenkt. Die Richtung der Ablenkung kann mithilfe der "Linken-Hand-Regel" bestimmt werden. Durch die Ablenkung werden positive von negativen Ladungsträgern getrennt, wodurch ein elektrisches Feld entsteht. Dieses Feld führt zu einer *Hall-Spannung*, die gemessen und in die Stärke des Feldes umgerechnet wird (siehe auch Abb. 2.10).

Im Smartphone ist für jede Raumrichtung ein Hall-Sensor vorhanden.

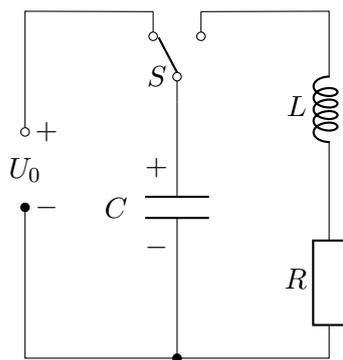


Abb. 2.4: Laden des Kondensators über die Spannungsquelle.

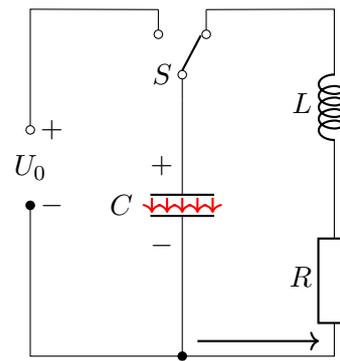


Abb. 2.5: Der Schalter wird umgelegt, zum Zeitpunkt $t = 0$ fließt noch kein Strom.

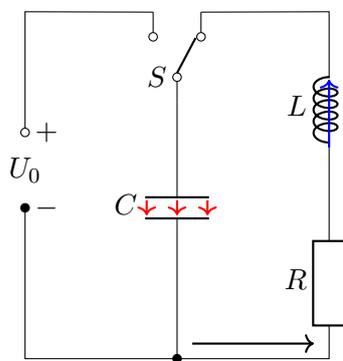


Abb. 2.6: In der Spule entsteht ein Magnetfeld, der Kondensator entlädt sich.

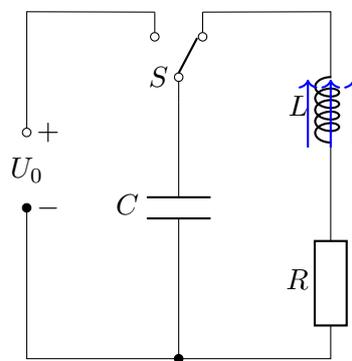


Abb. 2.7: Der Kondensator ist vollständig entladen, die Stärke des Magnetfeldes ist maximal.

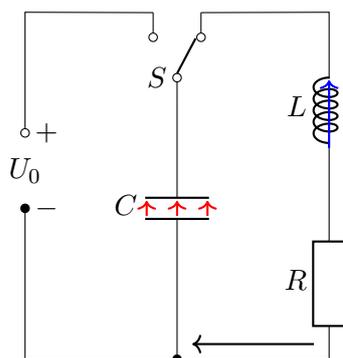


Abb. 2.8: Das Magnetfeld wird schwächer, die Induktionsspannung lädt den Kondensator.

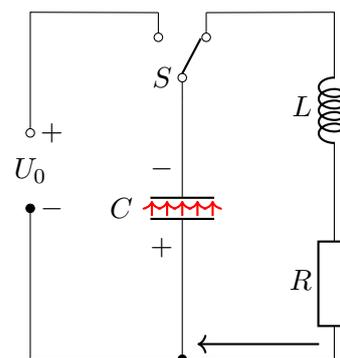


Abb. 2.9: Der Kondensator ist gegenpolig geladen, der Vorgang beginnt von vorne.

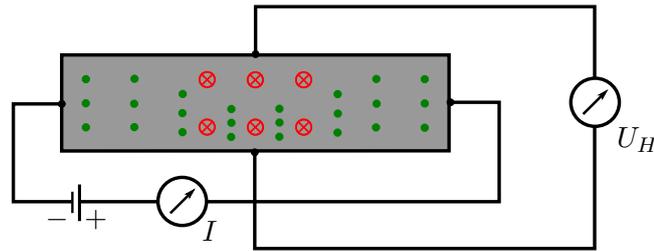


Abb. 2.10: Schema eines Hall-Sensors. Durch den grauen Leiter läuft von links nach rechts ein Strom I , die in grün visualisierten Elektronen werden durch das Magnetfeld (rot) abgelenkt. Diese Ladungsverschiebung wird als Spannung U_H gemessen.

2.1.6 phyphox und Sensoren im Smartphone

Für die Aufnahme und Darstellung der Werte des Hall-Sensors im Smartphone wird die App **phyphox**³ verwendet. Sie wird seit 2015 ursprünglich von SEBASTIAN STACKS an der RWTH Aachen erstellt und seitdem von einem größeren Team weiterentwickelt. Mit **phyphox** können die meisten Sensoren eines Smartphones (beispielsweise der Beschleunigungssensor, der Lagesensor oder der Lichtsensor) direkt ausgelesen und die Messwerte graphisch dargestellt werden. Des Weiteren gibt es einige zusätzliche Experimente, die die Messwerte weiter verarbeiten (zum Beispiel ein magnetisches Lineal oder ein Sonar). Es können weitere Experimente im App-eigenen XML-Format erstellt werden. [Stacks, 2019]

Im verwendeten Smartphone (OnePlus 6) hat der Hall-Sensor die Bezeichnung **ak0991x4**. Die maximale Feldstärke, bevor der Sensor sättigt, liegt bei ca. $5000 \mu\text{T}$, die Auflösung bei ca. $1 \mu\text{T}$ und die Messfrequenz bei 100 Hz. Zur Ausrichtung der Achsen und der Lage des Sensors siehe Abb. 2.11.

Die meisten Magnetsensoren in Smartphones haben eine Messfrequenz von 50 Hz oder 100 Hz. Da die Sensoren im Smartphone als Kompass dienen und damit das Magnetfeld der Erde messen müssen (bis zu $60 \mu\text{T}$), sind sie sehr empfindlich, was das Messen an Spulen deutlich vereinfacht (wenn der Sensor sättigt, reicht es, den Abstand zu erhöhen).

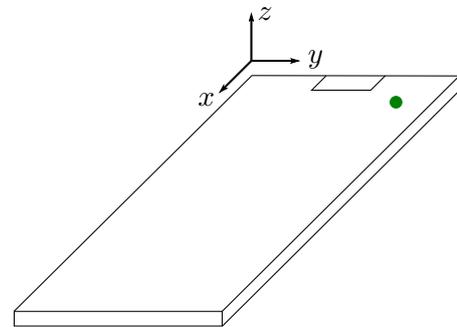


Abb. 2.11: Achsen des verwendeten Smartphones mit ungefährem Ort des Sensors (grüner Punkt).

³In den Versionen 1.1.7 und 1.1.8.

⁴Siehe <https://phyphox.org/sensordb/>, Suchbegriff für "Model": "A6003", Datenblatt im Anhang

Problematisch ist die softwareseitige Umsetzung in den Smartphones: damit statische Felder, die vom Smartphone erzeugt werden, nicht in die Berechnung des Erdmagnetfeldes einfließen, wird der Sensor kalibriert. Durch die Software wird das statische Magnetfeld einfach abgezogen. Möchte man also ein statisches Magnetfeld messen, muss man aufpassen, dass die Software dies nicht herausrechnet. Zusätzlich hat der Sensor des verwendeten Smartphones (siehe Datenblatt im Anhang) einen Prozessor, der Rauschen unterdrücken soll, und damit das Signal weiter verfälschen könnte. [Staacks, 2019, ab Min. 22]

Ebenfalls problematisch für die Messung eines elektrischen Schwingkreises ist die geringe Messfrequenz. Geht man von 50 Hz aus, können nur Frequenzen gemessen werden, die geringer als 25 Hz sind. Dann werden im Idealfall nur die Maxima und Minima der Schwingung gemessen. Wird jedoch zufällig immer zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs gemessen, ist keine Schwingung sichtbar. Sinnvoll wird es ab 4 Messpunkten pro Periode, das bedeutet, dass die Frequenz der Schwingung nicht größer als 12,5 Hz sein sollte (beim verwendeten Smartphone 25 Hz). [Staacks, 2019, ab Min. 22]

2.2 Physikalische Grundlagen aus der Schule

Die für eine Auswertung und vor allem Validierung der Messwerte benötigten Zusammenhänge sind nun bekannt. Für die Durchführung eines Projektes und eine dem Niveau der Schüler angemessene Formulierung der Aufgaben ist es wichtig, die Voraussetzungen der Schülerinnen zu kennen. Anhand des gymnasialen Bildungsplanes Baden-Württemberg sollen hier die fachwissenschaftlichen Inhalte bezüglich des Elektromagnetismus erläutert werden. Anschließend werden die Zusammenhänge für eine schnelle Übersicht als Sachstrukturdiagramm zusammengefasst.

2.2.1 Fachwissenschaftliche Einordnung in den Lehrplan

Die Konzepte von "Strom", "Spannung" und "Stromkreis" werden im Gymnasium über mehrere Jahre hinweg eingeführt. Dabei soll an dieser Stelle auf die Fachwissenschaft und weniger die im Lehrplan auch sehr präsenten "prozessbezogenen Kompetenzen" eingegangen werden. Diese werden in Teil 4 bei der konkreten Umsetzung von Aufgaben für das Projekt ausführlich diskutiert. Die im Bildungsplan genannten, und für den Schwingkreis relevanten Formeln, sind zur Orientierung auch angegeben. [KM, 2016]

Der Begriff "elektrisch" fällt zum ersten Mal in **Klasse 7/8** beim Thema "Energie". Hier liegt der Hauptaugenmerk auf der richtigen Einführung des Energiebegriffs, der stark von Präkonzepten der Schülerinnen und Schüler geprägt wird.

In der gleichen Klassenstufe wird Magnetismus phänomenologisch untersucht: die Feldlinien eines Stabmagneten werden zum Beispiel sichtbar gemacht und auch das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters sowie einer Spule werden untersucht. Auch der Elektromotor ist Thema des Unterrichts, wofür auch die Behandlung der Spule zur Erzeugung von Magnetfeldern unerlässlich ist.

Ebenfalls behandelt wird der grundlegende Aufbau eines Stromkreises und dessen relevante Größen. Das sind unter anderem Spannung, Strom und Widerstand sowie die KIRCHHOFF'schen Gesetze in der Maschen- und Knotenregel. Ziel ist der Aufbau von einfachen Schaltungen und die Messung der Grundgrößen.

In **Klasse 9/10** wird die phänomenologische Betrachtung dann deutlich vertieft und genauer erklärt. Reihen- und Parallelschaltungen werden betrachtet und das Verhalten von Spannung und Stromstärke erklärt. Die Funktionsweise eines Generators und Transformators soll beschrieben werden, dafür sind vorher erworbene Kenntnisse über die elektromagnetische Induktion nötig.

$$U = R \cdot I \quad (2.30)$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.32)$$

Für die Beschreibung des Schwingkreises sind aber Zusammenhänge nötig, die erst in **Klasse 11/12** erworben werden. Der Kondensator ist erst jetzt Thema und wird zusammen mit dem elektrische Feld eingeführt. Anschließend werden alle vorher betrachteten Zusammenhänge mithilfe von Formeln beschrieben (Spule, Kondensator, MAXWELL'sche Gleichungen). Mit dem FARADAY'schen Induktionsgesetz sind nun alle nötigen Formeln für den Schwingkreis vorhanden.

$$Q = C \cdot U \quad (2.33)$$

$$E_{\text{Kondensator}} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (2.34)$$

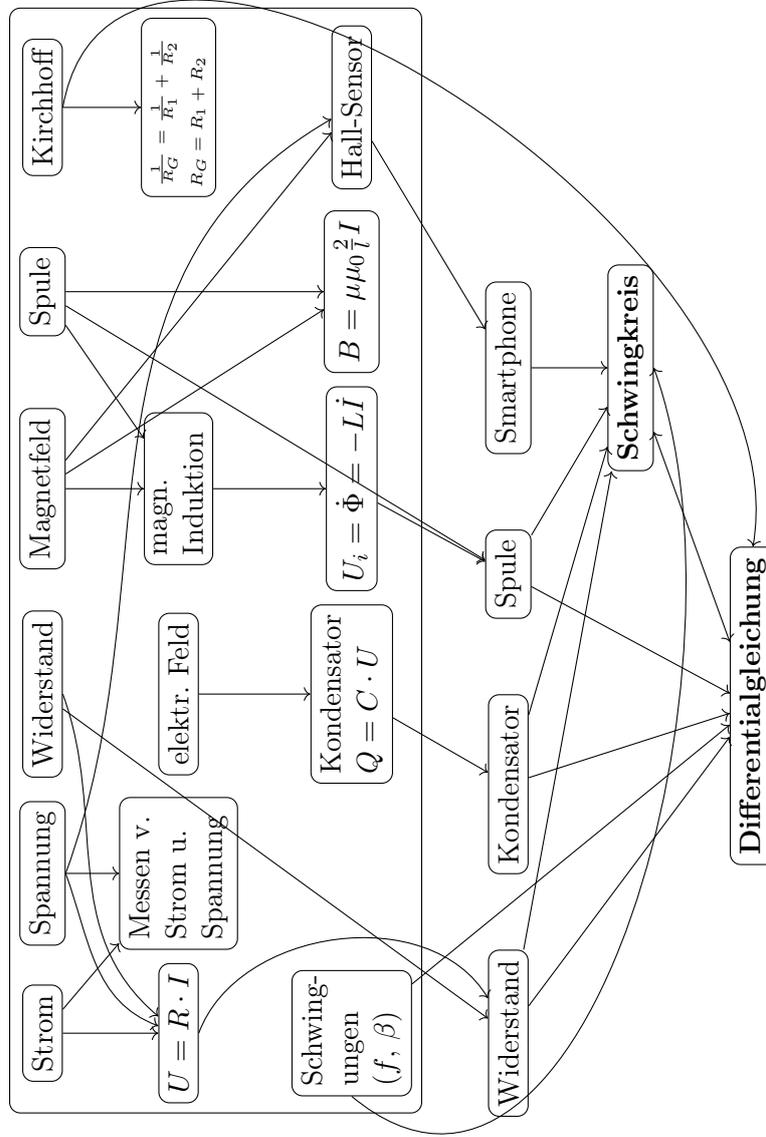
$$B = \mu_0 \mu \frac{n}{l} I \quad (2.35)$$

$$E_{\text{Spule}} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (2.36)$$

$$U_{\text{ind}} = -n \dot{\Phi} = -L \dot{I} \quad (2.37)$$

2.2.2 Sachstrukturdiagramm

Sachstrukturdiagramme [Kircher et al., 2015, S. 101ff] dienen dazu, die Inhalte einer didaktischen Analyse in Beziehung zueinander zu setzen. Dabei geht es vor allem um die fachwissenschaftlichen Themen, die in der Schule behandelt werden. Die Lernvoraussetzungen sind von den Lernzielen optisch getrennt. Zusammenhänge jedweder Art sind durch Pfeile gekennzeichnet. KIRCHER weist darauf hin, dass für Projekte nicht nur die fachlichen, sondern auch die technischen Begriffe in einem Sachstrukturdiagramm aufgeführt werden können. Für den elektromagnetischen Schwingkreis (mit dem experimentellen Aufbau aus Spule, Kondensator und Widerstand) ist ein solches Diagramm in Abb. 2.12 zu sehen.



Klasse 7 / 8

Klasse 9 / 10

Klasse 11 / 12

Abb. 2.12: Sachstrukturdiagramm zum elektromagnetischen Schwingkreis. Der obere eingerahmte Teil beinhaltet die Voraussetzungen, vertikal sortiert nach Klassenstufe

2.3 Didaktische Grundlagen

Aus dem vorherigen Abschnitt sind die inhaltlichen Voraussetzungen für die Schülerinnen bekannt. Für die erfolgreiche Umsetzung eines Projektes fehlen noch Informationen über dessen Inhalt, Struktur und Aufbau. Im folgenden Kapitel wird zuerst beantwortet, wie ein Projekt im schulischen Umfeld definiert ist. Anschließend geht es um die verschiedenen Abschnitte eines Projektes. Zuletzt werden verschiedene Aspekte von offenen Experimenten betrachtet, denn auf Offenheit soll ein besonderes Augenmerk in der Ausarbeitung der Experimente gelegt werden.

2.3.1 Eigenschaften und Aufbau von Projekten

Für KARL FREY ist für die Projektarbeit

Entscheidend [...], dass sich die Lernenden ein Betätigungsgebiet vornehmen, sich darin über die geplanten Betätigungen verständigen, das Betätigungsgebiet entwickeln und die dann folgenden verstärkten Aktivitäten im Betätigungsgebiet zu einem sinnvollen Ende führen. [Frey, 2007, S. 14]

Dieses Zitat definiert die Projektarbeit (von FREY als "Projektmethode" bezeichnet) auch schon sehr gut. Die Rolle des Lehrenden wird in [Kircher et al., 2015, S. 152] treffend zusammen gefasst:

Dem Motto "learning by doing" folgend tritt der Lehrer bei Projekten in den Hintergrund; er wirkt vor allem organisierend und beratend.

Dabei entstand die Idee der Projektarbeit unter anderem aus dem Gedanken heraus, dass viele der Unterrichtsinhalte an der Lebensrealität der Schüler vorbei gehen und keine große Relevanz im Alltag haben. Projekte sollen sich also gerade an dieser Lebensrealität und dem Alltag der Lernenden orientieren [Kircher et al., 2015].

FREY teilt ein Projekt in der Schule in mehrere Teilschritte ein, auf die hier genauer eingegangen werden soll:

Die **Projektinitiative** [Frey, 2007, S. 64ff] legt in zweierlei Hinsicht die Grundsteine für das Projekt. Zum einen wird das Thema ausgewählt und grob umrissen, zum anderen sollen auch die Schülerinnen aktiviert und für das Thema begeistert werden.

Dafür ist es wichtig, dass die Ausgangssituation eine offene ist. Deshalb muss die Lehrkraft zuerst eine solche herstellen. Das kann dadurch umgesetzt werden, dass die Schüler mithilfe von Oberbegriffen oder einem Brainstorming auf das Thema gebracht werden, oder aber beispielsweise durch eine Liste von Themen, aus denen sich die Lernenden

dann ein Thema aussuchen können. Durch die Offenheit des Themas sollen die Schülerinnen selber zum Nachdenken angeregt werden und ein für sie wirklich passendes Projekt aussuchen (im Gegensatz zum Auswahlkriterium "Dann nehme ich halt das, wo sich die Überschrift am interessantesten anhört." oder "Dann nehme ich halt das, was so aussieht, als ob es am wenigsten Arbeit macht.").

Die in [Kircher et al., 2015, S. 324] angeführten Beispiele vereint dagegen, dass die Lehrkräfte relativ viele Vorentscheidungen für die Schüler treffen. Gerade in den unteren Stufen werden die Lernenden stark "an die Hand genommen". Zusätzlich wird bemerkt, dass für die Vorbereitung sowohl eine didaktische, fachliche und "pragmatische" Analyse (die der Randbedingungen) unerlässlich ist.

Für die **Projektskizze** [Frey, 2007, S. 74ff] erweitern die Schülerinnen die Ergebnisse aus der Projektinitiative. Das Thema, das festgelegt wurde, wird nun konkretisiert und die Herangehensweise grob ausgearbeitet. War das herausgearbeitete Thema im vorherigen Schritt "elektrischer Strom", könnte das Ergebnis der Projektskizze sein, dass "wir die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes untersuchen möchten".

FREY führt an dieser Stelle noch einen weiteren Teil zu Metainteraktionen (siehe unten) recht ausführlich aus. Die Projektskizze ist ein passender Zeitpunkt, um Umgangsformen und Arbeitsweisen zu diskutieren und geregelt einzuführen. Das geht von Diskussionsregeln ("Alle sagen ein mal ihre Meinung.", "Wir wollen Entscheidungen immer mit einer qualifizierten Mehrheit von $\pi^{3/2}$ treffen.") über die Einführung der oben genannten Fixpunkte bis hin zu Zeitlimits, wie lange pro Arbeitsschritt gebraucht werden darf.

Für den **Projektplan** sollte immer das angestrebte und während der Projektskizze festgelegte Ergebnis des Projektes im Auge behalten werden. Es wird festgelegt, welche Arbeitsschritte für die Fertigstellung des Projektes nötig sind. Anhand von diesen Schritten werden Gruppen für die einzelnen Tätigkeiten zusammengestellt. Außerdem überlegt sich die Gruppe, zu welchem Zeitpunkt welcher Arbeitsschritt nötig ist, wer ihn durchführt und wie der Arbeitsschritt mit welchen Mitteln durchgeführt werden soll. Diese Punkte sollten so detailliert wie möglich notiert werden.

Der größte Teil der Zeit fürs das Projekt muss für die eigentliche **Durchführung** eingeplant werden. Dabei wird nun der Projektplan Schritt für Schritt abgearbeitet, wobei auch gemäß den vorherigen Abmachungen immer wieder Fixpunkte eingelegt werden und die Fortschritte auf der Arbeits- sowie der Metaebene evaluiert werden.

Die Durchführung des Projektes wird dabei aber auf den Projektplan rückgekoppelt. Braucht ein Arbeitsschritt zu Beispiel mehr Zeit als vorher vermutet, wird dies im Projektplan entsprechend angepasst. Auch die Arbeitsteilung kann angepasst werden: Wenn

ein bestimmter Arbeitsschritt einem Gruppenmitglied nicht liegt, kann er diesen Schritt abgeben.

FREY unterscheidet drei Arten das **Projekt zu beenden**: den bewussten Abschluss, die Rückkopplung auf die Projektinitiative und das Auslaufenlassen [Frey, 2007, S. 119ff]. Die ersten beiden sind für diese Arbeit die interessanteren Abschlussarten.

Beim bewussten Abschluss wurde schon relativ früh in der Projektentwicklung (spätestens im Projektplan) das angestrebte Ziel des Projektes festgelegt. Das Ziel kann aber im Laufe des Projektes immer wieder angepasst werden, es ist nicht unveränderbar. Meistens beinhaltet der bewusste Abschluss eine "vorzeigbare Sache". Das kann zum Beispiel ein Plakat oder ein fertiges Werkstück sein.

Bei der Rückkopplung auf die Projektinitiative wird mehr Wert auf die Evaluation des Projektes gelegt. Die Schüler stellen sich Fragen zum Ablauf und dem Gelingen des Projektes. Dabei wird auch immer wieder auf den Projektplan und die Projektskizze geblickt und geprüft, ob das vorher Festgelegte so wie geplant durchgeführt wurde. Insbesondere der Rückblick auf das (nicht) Gelernte macht einen großen Teil dieses Abschlusses aus.

Zusätzlich gibt es noch zwei Komponenten, die während des Projektes eingeschoben werden: Fixpunkte und Metainteraktionen.

Fixpunkte [Frey, 2007, S. 125ff] kommen im Projektverlauf immer wieder vor, dabei kann der Zeitpunkt vorher festgelegt sein oder von den Mitgliedern der Gruppe bei Bedarf "ausgerufen" werden (zum Beispiel, wenn Unklarheiten bestehen). Während eines Fixpunktes findet eine Art Evaluation statt: Die Mitglieder bringen sich gegenseitig auf den neuesten Stand ("Wer hat was gemacht?") und bereiten die nächsten Arbeitsschritte vor ("Wer wird was als nächstes machen?"). Zusätzlich kann die Gruppe auch den aktuellen Stand im Zeitplan bestimmen ("Wo sind wir?") und Maßnahmen ergreifen, wenn zum Beispiel zu langsam gearbeitet wird. Der Fixpunkt kann auch als Pause genutzt werden, in dem jedes Gruppenmitglied eine Auszeit bekommt und sich erholen kann.

Metainteraktionen [Frey, 2007, S. 131ff] beschreiben die Kommunikationsebene über den Themen der Fixpunkte. Es geht also nicht um die direkten Handlungen, die das Projekt voranbringen, sondern wie diese Handlungen ausgeführt werden. Beispielsweise ist das der Umgang innerhalb der Gruppe (z.B. mit einem vorher festgelegten Regelwerk) oder die Beziehungen zwischen den Gruppenmitgliedern. Auch die Reflexion über das bereits Gelernte und das Formulieren von Lernzielen gehören zur Metainteraktion. Im Idealfall kann ein Teil der Fixpunkte genutzt werden, um Fragen zur Metainteraktion anzugehen.

2.3.2 Offene Experimente und Aufgaben

Wie oben bei der Projektinitiative erwähnt spielt "Offenheit" in mehreren Teilen eines Projekts eine Rolle. Dazu können auch die Experimente und Aufgaben, die vom Lehrenden gestellt werden gehören. Darauf wird in diesem Abschnitt eingegangen.

FISCHER und DRAXLER besprechen in Kapitel 20 aus [Kircher et al., 2006, S. 639ff] allgemein die "Konstruktion und Bewertung von Physikaufgaben". Dabei berichten sie von Untersuchungen die zeigen, dass die Schülerinnen nach Abschluss einer Unterrichtseinheit weiter an (falschen) Alltagskonzepten festhalten und auch naturwissenschaftliche Konzepte und Arbeitsweisen nicht stärker verinnerlicht werden. Die Autoren machen als Ursache aus, dass "der Unterricht detailliert festgelegt ist" und "Experimente [...] entgegen der Erwartung, wegen akribischer Anleitungen sehr undifferenziert und nur mit geringem Wissenszuwachs begleitet [werden]". Der Gegensatz zu den sehr engen Anleitungen ist für die Autoren eine "offene, nicht strukturierte Aufgabenstellung". Aber auch hier gäbe es Studien die zeigten, dass offene Aufgaben nicht die ganze Lösung seien, und Schüler Probleme damit haben, eine offene Aufgabe in strukturiertes Handeln umzusetzen. Die Autoren machen dazu keinen konkreten Lösungsvorschlag, sondern geben verschiedene charakteristische Aspekte von Aufgaben an, wobei sie vor allem bei den Lösungswegen einer Aufgabe auf Offenheit eingehen. Dabei kann eine Aufgabe explizit einen Lösungsweg vorschreiben oder, wenn sie mit maximaler Offenheit gestellt wird, mehrere Lösungswege haben, die alle zum richtigen Ergebnis führen. Bei Experimenten ist die größte Offenheit gegeben, wenn die Schülerinnen selbst Hypothesen aufstellen und einen passenden Experimentieraufbau dazu entwerfen.

Offene Experimente betrachtet auch PRIEMER in [Priemer, 2011]. Problematisch sieht er hier, dass es verschiedene Vorstellungen von offenem Unterricht und offenen Aufgaben gibt, was dazu führt, dass Experimente in mehreren Dimensionen geöffnet werden und nicht klar ist, welche davon genau zur "Verbesserung" des Unterrichts geführt hat.

PRIEMER führt insgesamt sechs "Dimensionen der Offenheit" an, die in Abb. 2.13 zu sehen sind. Diese sollen nun kurz erläutert werden:

- Die Offenheit des *Fachinhaltes* kann stark variiert werden. Ist ein festes Experimentierthema vorgegeben, oder kann die Fragestellung mit verschiedenen Experimenten gelöst werden (z.B. die Messung der Höhe eines Hauses)? Hier ist das Hauptproblem, dass der aktuelle Unterricht und Lehrplan eigentlich nicht die Freiheiten geben, ein Experiment offen zu gestalten.
- Die *Strategie* bestimmt den Lösungsweg der gestellten Experimentieraufgabe. Hier kann mithilfe der Aufgabenstellung eine sehr fein gestufte Offenheit vorgegeben

werden. Das kann die Vorgabe von bestimmten Messmethoden, die genaue Festlegung der einzelnen Schritte oder die Vorgabe von Diagrammen und Tabellen zum Ausfüllen sein, oder das gezielte Weglassen derselben.

- Die *Methode* betrifft vor allem die Offenheit des Versuchsaufbaus. Sind die (Mess-) Geräte und Bauteile schon vorgegeben oder können sich die Schüler den Aufbau selber überlegen?
- *Lösung* und *Lösungsweg* sind gut in ihrer Anzahl quantifizierbar. Der Autor spricht von "Scheinoffenheit" des ganzen Experimentes, also keiner richtigen Offenheit, wenn nur ein Lösungsweg existiert.
- Die *Phase* ist recht ähnlich zur *Strategie*. Der Autor meint hier jedoch die konkrete Offenheit der Aufgabenstellungen der Teilschritte eines Experimentes. Dazu gehören die Fragestellungen, aber auch die Auswertung und Interpretation nach dem Experiment.

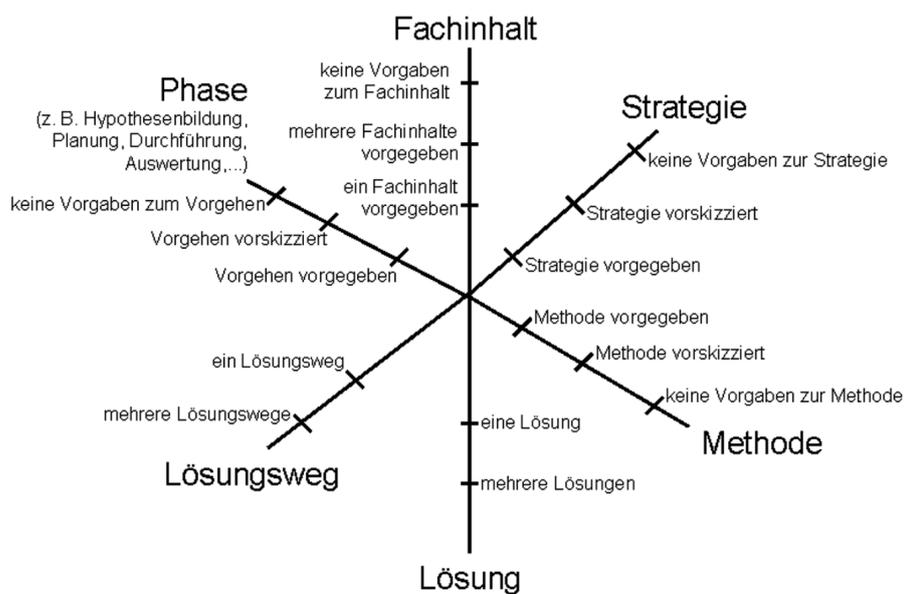


Abb. 2.13: Dimensionen der Offenheit beim Experimentieren aus [Priemer, 2011].

3 Versuchsaufbau und Auswertung

Versuche mit einem elektromagnetischen Schwingkreis und **phyphox** als Messgerät des Magnetfeldes werden in dieser Arbeit zum ersten Mal ausführlich beschrieben. Bevor konkrete Experimente für die Schule vorgestellt werden, soll der experimentelle Aufbau gezeigt und die aufgenommenen Daten auf ihre Qualität und Korrektheit überprüft werden. Des Weiteren werden in diesem Kapitel die Grenzen des Magnetsensors und die Grenzwerte der Bauteile erläutert.

3.1 Versuchsaufbau mit dem Smartphone

Der Aufbau eines elektromagnetischen Schwingkreises kann auch in der Schule sehr simpel erfolgen, denn schon eine Spule und ein Kondensator ohne Verkabelung reichen völlig. Ein paar Dinge sind dabei jedoch zu beachten.

Hauptproblem ist die **Dämpfung durch die Spule**, denn Spulen sind mit hohen Induktivitäten zwar gut zu bekommen, dann sind jedoch fast immer die Eigenwiderstände und damit die Dämpfung (2.20) sehr hoch. Mit der vereinfachten Formel zur Halbwertszeit (2.29) lassen sich die benötigten Parameter der Spule abschätzen.

Dieser Wert muss groß genug sein, um eine Schwingung erkennen zu können, die vom Smartphone mit 50 Hz oder 100 Hz messbar ist. Erfahrungsgemäß sollte $T_{\frac{1}{2}} \geq 0,01$ s sein, um überhaupt eine Schwingung zu messen und $T_{\frac{1}{2}} \geq 0,07$ s, um eine gute Schwingung aufzunehmen. Die Werte reichen, um 3 bis 5 Perioden erkennen zu können. Spulen mit diesen Parametern zu finden, die bezahlbar sind, ist nicht einfach. Es gibt im Schulbedarf zum Beispiel von LEYBOLD Spulen mit sehr hohen Induktivitäten und hohem Widerstand, diese sind aber nicht nur sehr schwer, sondern auch sehr teuer. Fündig wird man im Audio-Bereich. Dort werden Spulen verwendet, die zwar keine besonders großen Induktivitäten und einen Eisenkern haben (eine Messung ist dank des empfindlichen Sensors trotzdem gut möglich), aber dafür einen besonders niedrigen Widerstand, der durch dicke Kabel erreicht wird. Verwendet wurden für diesen Versuchsaufbau vor allem die Spulen aus Tab. 3.1. Bis auf die LEYBOLD-Spule haben alle Spulen einen fest verbauten Eisenkern, bei der LEYBOLD-Spule ist nur eine Schwingung erkennbar, wenn ein Eisenkern eingesetzt wird (die Dämpfung ist sonst zu stark). Drosseln aus dem Elektronikbedarf funktionieren für diesen Versuchsaufbau nicht. Sie sind zwar sehr billig, allerdings werden die Induktivitäten bei Wechselstrom mit Frequenzen im kHz-Bereich gemessen und sind im Hz-Bereich deutlich niedriger.

Durch den starken Einfluss der Widerstände auf die Dämpfung wird schnell der **Widerstand der Kabel** problematisch. Die dünnen Kabel von Krokodilklemmen haben

Bezeichnung	Induktivität	Widerstand	Preis	Hersteller	Bezug
56 214	11 mH	2,5 Ω	-	LEYBOLD	FD-Vorbereitung
195P10	30 mH	0,17 Ω	150 €	hmf*	mouser
LSI-100T	10 mH	0,19 Ω	30 €	monacor	conrad

*Tab. 3.1: Die im Versuch eingesetzten Spulen und ihre Werte laut Datenblatt. Sofern vorhanden sind die Datenblätter im Anhang zu finden. (*hmf = hammond manufacturing)*

teilweise schon einen zu hohen Widerstand, die Experimentierkabel aus dem Schulbereich haben durch ihre Dicke einen geringeren Einfluss, hier wurde aber weniger getestet. Um dieses Problem zu lösen, kann die Länge der Kabel auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Dafür wird der Kondensator zuerst an einer Spannungsquelle geladen und dann direkt mit der Spule "per Hand" kurzgeschlossen. Diese Methode erzeugt manchmal einen Funken und man braucht für eine dauerhafte Verbindung eine ruhige Hand, mit ein wenig Übung ist eine Messung aber gut machbar. Das Smartphone kann dabei für die Messung direkt auf die Spule gelegt werden, dann sind beide Hände frei.

Aufgrund der **Empfindlichkeit des Smartphone-Sensors** können sehr kleine Felder gemessen werden. Der Sensor sättigt allerdings dementsprechend auch schon bei "mittelgroßen" Feldern. Das im Versuch hauptsächlich verwendete Smartphone sperrt außerdem über einen zweiten Magnetsensor (eventuell ein Reedschalter) ab einer etwas höheren Feldstärke den Bildschirm, was die Messung in **phyphox** stoppt. Beide Probleme können umgangen werden, indem das Smartphone in einem definierten Abstand auf die Spule gelegt wird. Das kann zum Beispiel durch ein Stück Plastik oder eine Schachtel aus Pappkarton mit einer Höhe von ca. 2 cm erreicht werden. Wichtig ist natürlich, dass der Abstand bei jeder Messung derselbe ist.

Die Auswahl an **Kondensatoren** ist groß, die Preise liegen im Euro-Bereich. Verwendet wurden im Aufbau Kapazitäten von 22.000 μF bis 470 μF . Die untere Schranke ist dabei durch die Aufnahmefrequenz des Smartphones gegeben, die obere Grenze eher durch die Verfügbarkeit von hohen Kapazitäten (wählt man zu Hohe, gerät man außerdem in den Kriechfall). Unterschiede zwischen normalen Elektrolytkondensatoren und bipolaren Kondensatoren konnten nicht beobachtet werden (siehe dazu auch 3.2). Die Kondensatoren gibt es üblicherweise mit Maximalspannungen mit 5 V bis 35 V. Geladen werden sie mit einem Netzgerät oder mit einer Batterie, auch hier waren keine auffälligen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ladespannungen zu beobachten. Für Heimexperimente bietet sich also das Laden mit einer 9 V-Batterie an.

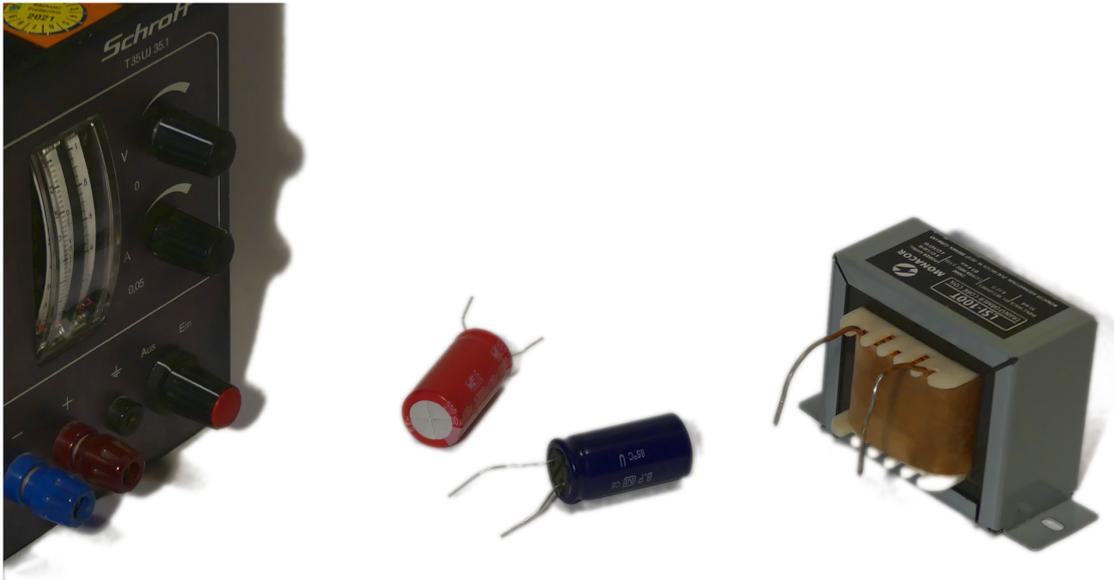


Abb. 3.1: "Versuchsaufbau" mit dem alle Messungen aufgenommen wurden. Links das Netzteil, zwei Kondensatoren in der Mitte und rechts die Spule mit 30 mH

Der **Versuchsaufbau** (siehe auch Abb. 3.1) besteht aus einem Netzgerät, an dem die gewünschte Spannung eingestellt wird, einer Spule und einem Kondensator. Mit einem zusätzlichen Widerstand wurden keine Messungen durchgeführt. Der Kondensator wird aufgeladen und anschließend per Hand mit der Spule kurzgeschlossen. Dabei wird das Magnetfeld der Spule mit einem Smartphone und **phyphox** aufgenommen.

3.2 Auswertung und Fehlerdiskussion

Der exakte Ort des Sensors im Smartphone kann mit einem magnetisierten Nagel bestimmt werden. Wenn man diesen einmal aus jeder Raumrichtung dem Smartphone nähert und die jeweiligen Graphen in **phyphox** beobachtet, findet man den genauen Ort des Sensors. Ein Magnet funktioniert hier nicht gut, denn zum einen sind meistens die Feldstärken so hoch, dass der Sensor sättigt, und zum anderen ist das Feld räumlich nicht so stark begrenzt wie bei einem Nagel. Wird das Smartphone flach auf die Spule gelegt, wobei der Sensor möglichst mittig platziert wird, können mit dem Graphen in z-Richtung die besten Ergebnisse erzielt werden (das ist auch die Richtung des stärksten Feldes).

Verwendet werden deshalb nur die Daten der z-Achse. Nach dem Speichern mittels Fernzugriff in der **phyphox**-App, wurde zuerst der Zeitpunkt des letzten Punktes, der noch im Rauschen ist, bevor ein sichtbarer Anstieg zu sehen ist, als $t = 0$ gesetzt. Nach dem Abklingen der Schwingung ist ein Rauschen um einen konstanten Wert zu

beobachten, dieser Wert wurde aus dem Mittel der letzten 200 Messwerte gewonnen (es wird in allen Fällen lange genug gemessen, damit genug Messwerte des Rauschens aufgenommen wurden). Gibt es im Rauschen Ausreißer, die z.B. durch die Bewegung des Smartphones entstanden sind, wurden alle Werte ab diesem Ausreißer gelöscht.

Anschließend wurden die Maxima und Minima ("Extrema") durch die `find_peaks`-Funktion aus dem `scipy`-Paket für Python ermittelt. Dabei wurden nur Extrema ausgewählt, die mindestens $14 \mu\text{T}$ über dem Mittelwert liegen. Für die weitere Auswertung wurden die um den Mittelwert verschobenen Absolutwerte der Minima und Maxima verwendet.

Für die folgende exponentielle Regression der Extrema mit `curve_fit` aus dem `scipy`-Paket (mithilfe des des LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus) wurde ein Fehler von $\frac{1}{10}$ des jeweiligen Messwertes angenommen, da die Abweichung bei großen Werten höher sein kann als bei Kleinen (die Datenpunkte können um das Extremum "herum" aufgenommen sein, der Wert wird unterschätzt). Dieser Fehler wurde eingeführt, da sonst durch die Regression die zeitlich späteren Extrem immer unterschätzt werden (sichtbar in einer logarithmischen Darstellung). Genau genommen dürfen diese Fehler nur positiv sein, da der Wert nur unterschätzt werden kann. Leider ist eine solche Möglichkeit jedoch nicht in dem verwendeten Paket implementiert. Folgende Funktion wurde an die einzelnen Extrema angepasst:

$$f(t) = a \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (3.1)$$

Zuletzt werden die Parameter der Funktion einer Schwingung mit exponentieller Dämpfung an die Messwerte angepasst (auch mit `curve_fit`):

$$g(t) = a \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot (t + d)) \quad (3.2)$$

Dabei werden für a und β die vorher aus (3.1) ermittelten Werte verwendet. Zusätzlich wird ein Startwert für ω übergeben, der aus den Abständen der Hochpunkte ermittelt wurde. Für den Fall, dass der zu Beginn ausgewählte Startpunkt bei $t = 0$ nicht exakt stimmt, wird eine x-Achsenverschiebung d eingeführt.

Alle durchgeführten Messungen und ihre Parameter sind in Tab. 3.2 zu finden. Variiert wurden Induktivität, Kapazität und die angelegte Spannung. Zusätzlich wurden noch Messungen mit bipolaren Kondensatoren durchgeführt. Die Werte für β und ω_0 , die sich aus den Werten der Bauteile mit (2.20) und (2.21) ergeben, sind links in Tabellen 3.3 und 3.4 zu finden (ω_g unterscheidet sich immer erst in der ersten Nachkommastelle von ω_0 und ist deshalb nicht aufgeführt). Die Werte für β und ω , die mithilfe der Regressionen von

$f(t)$ und $g(t)$ bei allen Messungen ermittelt wurden, sind in diesen beiden Tabellen auf der rechten Seite eingetragen. Die Fehler der Regressionen werden von der `curve_fit`-Funktion direkt angegeben.

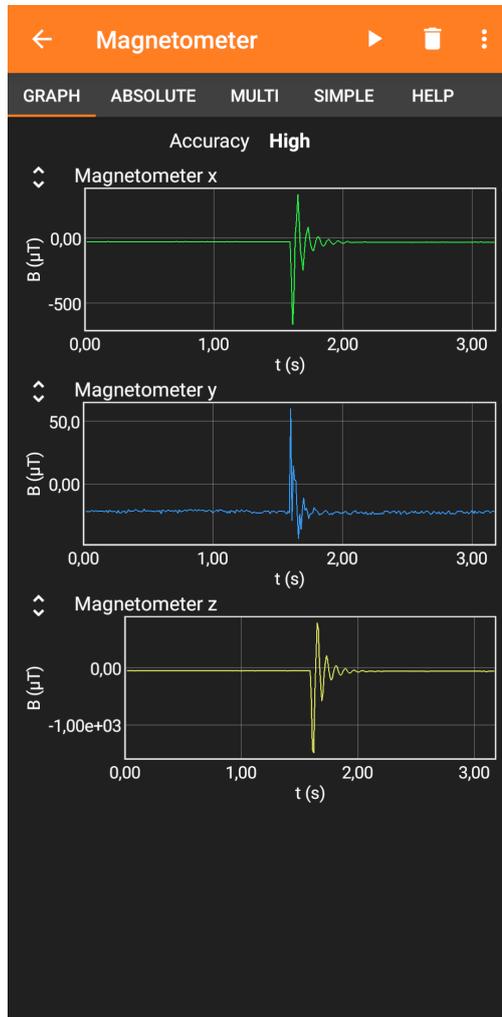


Abb. 3.2: Bildschirmaufnahme einer Messung in *phyphox*.

dass die Dämpfung mit sinkender Kapazität (und damit steigender Frequenz) steigt, was vermutlich an Energieverlusten im Kondensator liegt. Deshalb lassen sich auch keine generellen Aussagen darüber treffen, ob die Induktivität zu hoch oder der Widerstand der Spule zu niedrig angegeben ist, denn bei jeder gemessenen Schwingung gibt es Verluste über den Kondensator. Bei der Spule mit 10 mH stimmen die Werte für die Dämpfung bei niedrigen Frequenzen recht gut überein, bei höheren Frequenzen steigen sie jedoch auch deutlich.

In Abb. 3.2 ist exemplarisch eine Bildschirmaufnahme einer Schwingung zu sehen. Wenn die Schüler die richtigen Parameter gewählt haben, ist eine solche Abbildung zu erkennen. In Abbildungen 3.3 bis 3.6 sind verschiedene aufgenommene und ausgewertete Schwingungen dargestellt. Abb. 3.3 zeigt dabei beispielhaft die Auswertung einer Schwingung, deren Regression eine hohe Übereinstimmung zeigt. Die theoretischen Graphen in Abb. 3.3 und 3.5 sind 500-fach, bzw. 100-fach überhöht dargestellt, da hier Gleichung (2.28) verwendet wurde, die die Stromstärke angibt. Die Stärke des Magnetfeldes in Abhängigkeit der Stromstärke kann aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften und unbekanntem Spulenparametern nicht berechnet werden (siehe auch (2.7)).

Die Werte der Messungen für die Dämpfung β aus Tab. 3.3 sind für die Spule mit 30 mH immer höher als die aus den Bauteilwerten berechneten, maximal um den Faktor 4 (deutlich zu sehen auch in Abb. 3.3, die gemessenen Werte fallen deutlich schneller ab als erwartet). Sie liegen immer außerhalb der Messunsicherheit der Bauteilwerte. Bemerkenswert ist,

Betrachtet man die Werte für ω aus den Messungen sind diese immer niedriger als die aus den Bauteilparametern berechneten, jedoch im Gegensatz zur Dämpfung in der gleichen Größenordnung. Daraus lässt sich schließen, dass entweder die Kapazität oder die Induktivität größer ist als angegeben. Theoretisch spielt an dieser Stelle die Eigenkreisfrequenz ω_g eine Rolle, die Differenz zu ω_0 ist aber wie oben schon erwähnt so gering, dass sie innerhalb der Messunsicherheit von ω_0 ist.

Aus den erhobenen Daten sind keine signifikanten Unterschiede zwischen normalen und bipolaren Kondensatoren ersichtlich. Auch die unterschiedlichen Bauteil-Spannungen U_C und die an den Kondensator angelegte Spannung U führte zu keinen signifikanten Unterschieden für β und ω bei den Messungen.

Abb. 3.4 verdeutlicht was passiert, wenn der Kontakt zwischen den Bauteilen kurz abbricht, es ist eine "Stufe" in den Messwerten zu erkennen. In Abbildungen 3.5 und 3.6 ist zu sehen was passiert, wenn die Frequenz der Schwingung im Vergleich zur Messfrequenz des Smartphones zu groß wird. Dabei wurden in Abb. 3.5, wie bei allen anderen Messungen auch, ein Smartphone verwendet, das mit 100 Hz misst. In Abb. 3.6 wurde explizit ein Smartphone verwendet, dessen Sensor mit 50 Hz misst, die Parameter der Schwingung sind jedoch gleich geblieben. Gut zu erkennen ist, dass nur zufällig die Extrema gemessen werden, was bei anderen Messzeitpunkten dazu führen kann, dass gar keine Schwingung mehr sichtbar ist (siehe auch 2.1.6).

Insgesamt sind die Werte für ω und β in der einzelnen Messreihen gut reproduzierbar. Innerhalb der Messunsicherheiten stimmen die meisten Messwerte der Dämpfung in einer Messreihe überein, es gibt nur wenige Ausreißer. Die Übereinstimmung der Frequenzen ist geringer, hier könnte es sein, dass die Regressionsfunktion die Unsicherheiten zu gering berechnet hat. Es lässt sich also sagen, dass die Messung der Schwingung über das Magnetfeld der Spule mithilfe des Smartphones zu guten und reproduzierbaren Ergebnissen führt. Die Messungen können ohne Probleme dazu genutzt werden, die Frequenz und Dämpfung zum Beispiel mit Hilfe einer Regression zu ermitteln. Zu beachten ist allerdings, dass die Berechnung der theoretischen Werte häufig deutlich von den gemessenen Werten abweicht.

Leider konnten die Werte aufgrund fehlender Messgeräte nicht mit "professionell" aufgenommenen Werten verglichen werden (zum Beispiel die Messung der Stromstärke mit einem Oszilloskop). Es ist jedoch aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit davon auszugehen, dass die Qualität der Messung bis auf die Messfrequenz ähnlich hoch ist.

Die in 2.1.6 erwähnten Probleme bei der Sensorkalibrierung und Rauschunterdrückung konnten nicht nachvollzogen werden. Das Smartphone kalibrierte den Sensor in keiner Messung auf das von außen erzeugte Magnetfeld oder veränderte die Werte anderweitig.

Messfehler können sich unter anderem durch die Positionierung des Smartphones ergeben, wird es bei einer Messung bewegt, ändert sich die Stärke des gemessenen Magnetfeldes abrupt. Außerdem sieht man in den aufgenommenen Messwerten deutlich, wenn es zu einem Kontaktfehler zwischen Spule und Kondensator kommt, dies tritt beim Verbinden "per Hand" häufig auf. Zusätzlich stammen alle bestellten Spulen aus dem Audio-Bereich, hier kommen teilweise andere Messverfahren für die Induktivität einer Spule zum Einsatz als bei den Versuchsspulen für die Schule.

Getestet wurde auch ein Versuchsaufbau, bei dem ein Audio-Verstärker und der Frequenzgenerator von phyphox verwendet wurden um eine von außen erzwungene Schwingung zu erzeugen. Damit hätte eine Dämpfungskurve aufgenommen werden können. Es waren jedoch keine signifikanten Unterschiede der Amplitude bei verschiedenen Frequenzen zu beobachten. Das könnte daran liegen, dass solche Verstärker bestimmte Frequenzen nur selektiv verstärken. Hier sind jedoch weitere Experimente nötig.

Tab. 3.2: Sämtliche Spulen(L)-Kondensator(C)-Kombinationen, für die Messwerte aufgenommen wurden. $u(x)$ gibt die Unsicherheit des Wertes an, bei der LSI-100T-Spule mit 10 mH wurde diese geschätzt. Bipolare Kondensatoren sind entsprechend gekennzeichnet. U in V gibt die an den Kondensator angelegte Spannung zu Beginn an, d in cm den Abstand des Smartphones zur Spule, R_L in Ω den Innenwiderstand der Spule, U_C in V die auf der Spule angegebene Maximalspannung (Bauteileigenschaft). # ist die Anzahl der Messungen. L in mH, C in μF .

L	$u(L)$	C	$u(C)$	bip.	U_C	R_L	$u(R_L)$	U	d	#
30	15,00 %	22000	20,00 %		10	0,17	15,00 %	8	2	3
30	15,00 %	10000	20,00 %		16	0,17	15,00 %	14	2	3
30	15,00 %	3900	20,00 %		10	0,17	15,00 %	8	2	1
30	15,00 %	3300	20,00 %	Ja	16	0,17	15,00 %	14	2	2
30	15,00 %	2200	20,00 %	Ja	16	0,17	15,00 %	14	2	3
30	15,00 %	2200	20,00 %		35	0,17	15,00 %	14	2	2
30	15,00 %	1000	20,00 %		25	0,17	15,00 %	14/20	2	2
30	15,00 %	470	20,00 %			0,17	15,00 %	-	-	0
10	20,00 %	22000	20,00 %		10	0,19	20,00 %	8	0	2+3
10	20,00 %	10000	20,00 %		16	0,19	20,00 %	8	0	3+2
10	20,00 %	3300	20,00 %	Ja	16	0,19	20,00 %	14	0	2
10	20,00 %	2200	20,00 %		16	0,19	20,00 %	8	0	2
10	20,00 %	2200	20,00 %		35	0,19	20,00 %	8	0	2

Tab. 3.3: Aus den Regressionen ermittelte Daten für β . Die Werte links sind die übernommenen Werte der Bauteile und die daraus berechneten Werte für ω_0 , f_0 und β . Rechts sind die Daten der einzelnen Messungen eingetragen, diese wurden mit einer Regression berechnet. L in mH, C in μF , f_0 in Hz. Bei den mit * gekennzeichneten Werten ist die Regression fehlgeschlagen.

L	C	ω_0	f_0	β	β aus Regression $f(t)$				
					Mess. 1	Mess. 2	Mess. 3	Mess. 4	Mess. 5
30	22000	39(5)	6	2,8(6)	4,3(2)	4,6(2)	4,4(1)		
30	10000	58(7)	9	2,8(6)	5,2(2)	5,2(2)	5,2(2)		
30	3900	92(12)	15	2,8(6)	7,8(3)				
30	3300	101(13)	16	2,8(6)	7,1(2)	6,8(1)			
30	2200	123(15)	20	2,8(6)	8,2(1)	8,0(2)	7,9(1)		
30	2200	123(15)	20	2,8(6)	*8,5(2)	*8,5(2)			
30	1000	183(23)	29	2,8(6)	12,2(2)	12,0(2)			
30	470	266(33)	42	2,8(6)					
10	22000	67(10)	11	10(2)	11(1)	9,5(7)	13,3(7)	9,1(4)	*0,05(5)
10	10000	100(14)	16	10(2)	*11,0(7)	*11,1(8)	*5(2)	10,0(2)	10,7(4)
10	3300	174(25)	28	10(2)	13,3(6)	17,3(8)			
10	2200	213(30)	34	10(2)	*12,7(5)	16,0(4)			
10	2200	213(30)	34	10(2)	*17,5(7)	20(2)			

Tab. 3.4: Aus den Regressionen ermittelte Daten für ω . Die Werte links sind die übernommenen Werte der Bauteile und die daraus berechneten Werte für ω_0 , f_0 und β . Rechts sind die Daten der einzelnen Messungen eingetragen, diese wurden mit einer Regression berechnet. L in mH, C in μF , f_0 in Hz. Bei den mit * gekennzeichneten Werten ist die Regression fehlgeschlagen.

L	C	ω_0	f_0	β	ω aus Regression $g(t)$				
					Mess. 1	Mess. 2	Mess. 3	Mess. 4	Mess. 5
30	22000	39(5)	6	2,8(6)	33,4(4)	34,2(3)	32,5(3)		
30	10000	58(7)	9	2,8(6)	50,3(6)	50,0(6)	50,0(5)		
30	3900	92(12)	15	2,8(6)	74,1(7)				
30	3300	101(13)	16	2,8(6)	84,6(3)	84,6(3)			
30	2200	123(15)	20	2,8(6)	95,7(8)	102,5(8)	103,0(6)		
30	2200	123(15)	20	2,8(6)	*104(2)	*100,6(9)			
30	1000	183(23)	29	2,8(6)	148(2)	141(2)			
30	470	266(33)	42	2,8(6)					
10	22000	67(10)	11	10(2)	52(2)	52,4(9)	55,5(9)	53,4(6)	*166(4)
10	10000	100(14)	16	10(2)	*74(2)	*78(2)	*79(8)	73,7(8)	81(7)
10	3300	174(25)	28	10(2)	124(2)	124(2)			
10	2200	213(30)	34	10(2)	*153(2)	156,4(5)			
10	2200	213(30)	34	10(2)	*142(3)	156,6(5)			

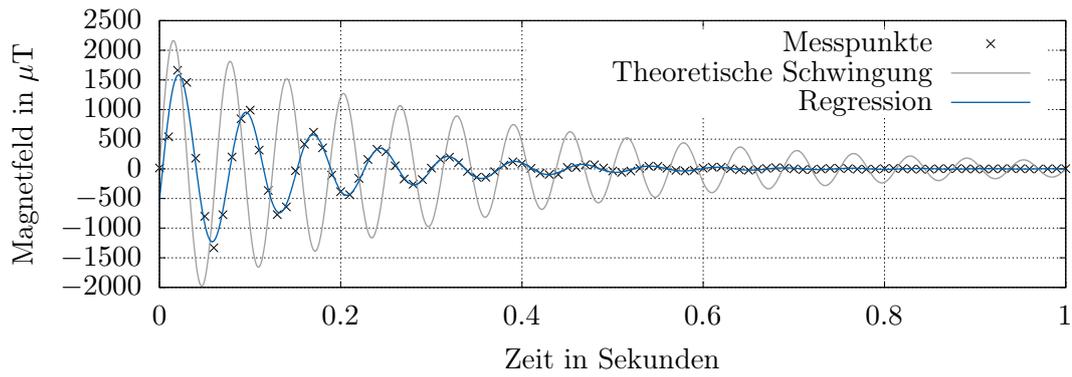


Abb. 3.3: Aufgenommene Schwingung mit $C = 3300 \mu\text{F}$, $L = 30 \text{ mH}$ und $R = 0,17 \Omega$, 2. Messung, Regression mit $\omega = 84,6(3)$ und $\beta = 6,8(1)$. Informationen zur theoret. Schwingung im Fließtext.

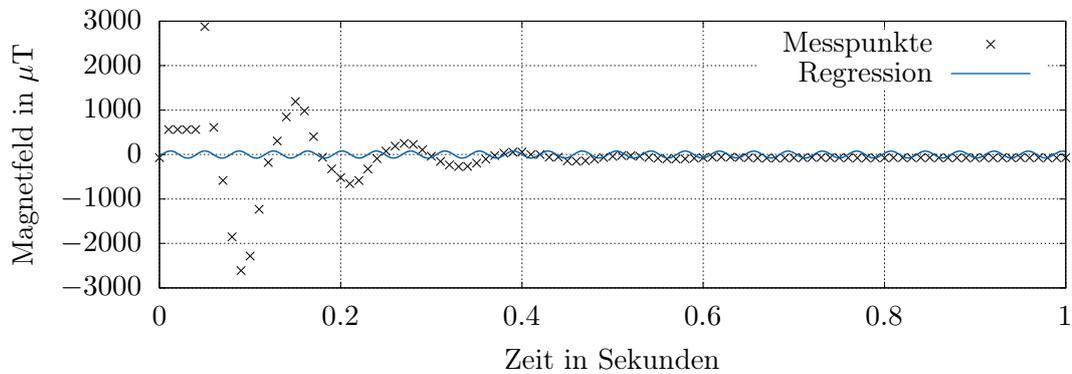


Abb. 3.4: Aufgenommene Schwingung mit $C = 22.000 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ und $R = 0,19 \Omega$, 5. Messung, Regression fehlgeschlagen. Der Grund dafür ist unter anderem die sichtbare Stufe in den Messwerten bei $t = 0.02$ und $t = 0.42$, die durch einen fehlerhaften Kontakt zustande kam.

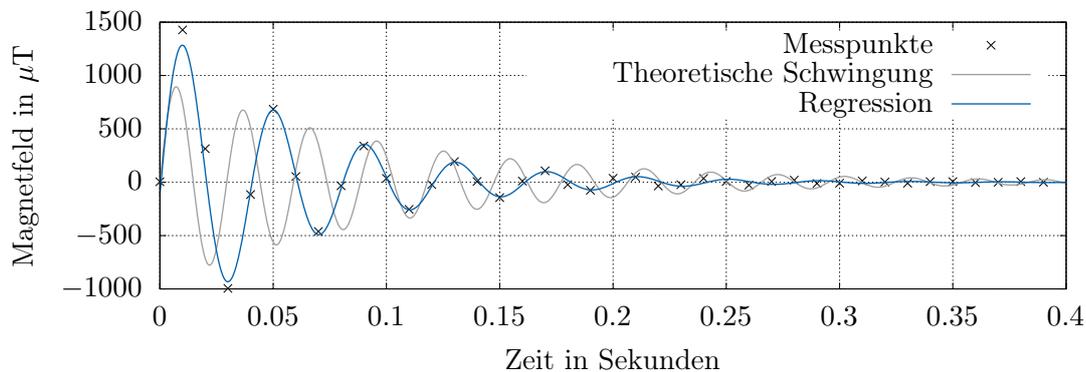


Abb. 3.5: Aufgenommene Schwingung mit $C = 2200 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ und $R = 0,19 \Omega$, 2. Messung, Regression mit $\omega = 156,4(5)$ und $\beta = 16,0(4)$. Bei einer Messfrequenz von 100 Hz ist ungefähr hier die maximal Frequenz der Schwingung erreicht, da sonst die Maxima nicht mehr erkennbar sind. Informationen zur theoret. Schwingung im Fließtext.

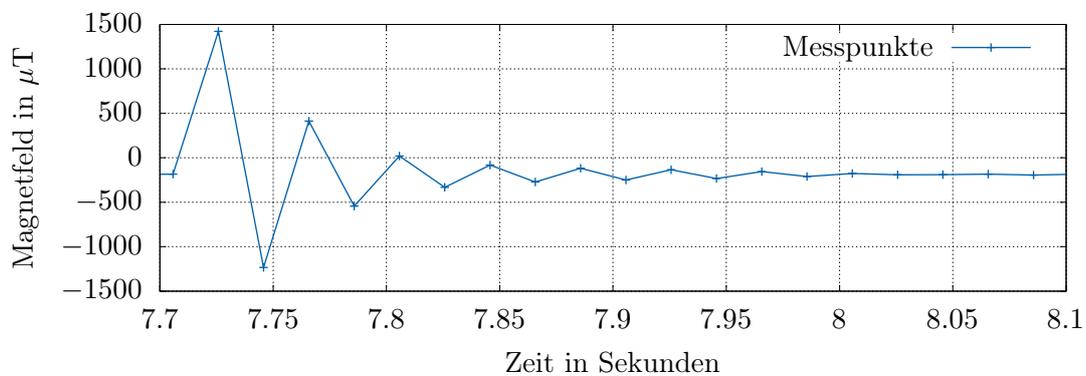


Abb. 3.6: Aufgenommene Schwingung mit $C = 2200 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ und $R = 0,19 \Omega$, (gleiche Werte wie in Abb. 3.5). Aufgenommen mit einer Messfrequenz von 50 Hz. Zu erkennen ist, dass beim Abtasten der Schwingung zufällig gerade die Extrema aufgenommen werden. Wäre der Aufnahmezeitpunkt etwas verschoben, wäre keine Schwingung sichtbar.

4 Projekt und Experimente

Nachdem auf die physikalischen und didaktischen Grundlagen eingegangen, und der experimentelle Aufbau sowie seine Grenzen erläutert wurden, soll nun ein Projekt zum Thema "Schwingungen" und Materialien mit Experimentiervorschlägen für den Bereich des elektromagnetischen Parallelschwingkreises vorgestellt werden. Das Projekt (zum Beispiel im Rahmen einer Projektwoche an einer Schule) kann wie folgt aussehen:

Das übergeordnete und nach außen kommunizierte Thema ist "Schwingungen". Mithilfe einer Mindmap werden dann mit den Schülern zusammen die Teilgebiete und vor allem auch Alltagsthemen zu Schwingungen gesammelt (*Projektinitiative*, siehe auch 2.3.1). Das können zum Beispiel mechanische Schwingungen einer Schaukel oder Brücke sein, die Schwingungen die von einem Stein, der ins Wasser geworfen wird, verursacht werden; aber auch elektromagnetische Schwingungen, von denen die im Alltag bekannteste das Licht ist. Der elektromagnetische Schwingkreis ist leider kein Gegenstand, mit dem man im Alltag in Berührung kommt, mit dessen Bauteilen allerdings schon eher.

Wenn die Lehrkraft zu all den gesammelten Themen Material bereitstellt und die einzelnen Teilprojekte vorstellt, ist es gut vorstellbar, dass auch das Interesse einiger Schülerinnen am Schwingkreis geweckt wird (gerade wenn der Satz "gemessen wird mit dem Smartphone" fällt). Mit der Bereitstellung der Materialien hat die Lehrkraft schon selber eine *Projektskizze* erstellt, die viel vorgibt.

Im Teilprojekt zum elektromagnetischen Schwingkreis soll im Folgenden das fachliche Ziel durch den Lehrplan vorgegeben sein: Die Schüler können "die Schwingung in einem elektromagnetischen Schwingkreis erklären und die auftretenden Energieumwandlungen beschreiben" [KM, 2016]. Das ist auch die einzige Stelle im Bildungsplan, in der der Schwingkreis als selbstständiges Thema konkret benannt wird. An dieser Stelle sollen Materialien in Form von Experimenten und Versuchsanleitungen vorgestellt werden, die das Teilprojekt möglichst vollständig abdecken. Die Aufgaben in den Materialien sind in möglichst allen Bereichen (siehe auch Abb. 2.13 und Abschnitt 2.3.2) offen gestellt und auf die geförderten prozessbezogenen Kompetenzen wird jeweils eingegangen.

Den *Projektplan* können sich die Schülerinnen selbst zusammenstellen. Durch die verschiedenen Arbeitsmaterialien ist es möglich, auf unterschiedlichen Wegen und mit mehr oder weniger Zeitaufwand zu einem gleichen Ergebnis zu kommen. Ist das Arbeitsmaterial ausgegeben, kann die Lehrkraft in den Hintergrund treten und nur noch bei Fragen beratend weiterhelfen.

Das Projekt wird durch mehrere Vorträge *beendet*. Die Schüler stellen dabei jeweils die Ergebnisse eines Experimentes aus einem Versuchsteil vor. Die Ergebnisse werden

dabei bei den meisten Experimenten von Gruppe zu Gruppe unterschiedlich sein. Beim Nachbau des Schwingkreises mithilfe eines vorgegebenen Graphen sind zum Beispiel verschiedene L-C-Kombinationen für eine "richtige" Lösung möglich (für weitere Einzelheiten siehe auch Tab. 4.1). Bei der Optimierung des Schwingkreises können beispielsweise auch mehrere Gruppen ihre Ergebnisse vorstellen, wenn nach unterschiedlichen Parametern optimiert wurde.

4.1 Eigenschaften des Teilprojektes "elektromagnetischer Schwingkreis"

Voraussetzung für dieses Teilprojekt sind umfangreiche Vorkenntnisse zu den einzelnen Bauteilen des Schwingkreises. Das beinhaltet alle genannten Gebiete und Formeln aus Abschnitt 2.2.1, die auch in gekürzter Form im Sachstrukturdiagramm in Abb. 2.12 genannt sind. Die Voraussetzungen sind im Sachstrukturdiagramm durch den äußeren Rahmen sichtbar gemacht.

Das **übergeordnete Ziel** ist oben schon genannt und durch den Lehrplan vorgegeben: Die Schülerinnen und Schüler können "die Schwingung in einem elektromagnetischen Schwingkreis erklären und die auftretenden Energieumwandlungen beschreiben". Dieses Hauptziel kann in weitere **Teilziele** zerlegt werden, die jeweils mithilfe verschiedener Arbeitsmaterialien und Experimente, die die Schüler selbst auswählen können, behandelt werden. Sowohl Experimente als auch Lernziele sind in Tab. 4.1 zusammengefasst, die Lernziele werden nun genauer erläutert und die ausgearbeiteten Versuche ab dem folgenden Kapitel vorgestellt. Die Formulierung der Teilziele orientiert sich an der Operatorenliste aus [KM, 2016], um eine Einordnung in einen Anforderungsbereich möglich zu machen.

Im **ersten Teil** geht es um das Kennenlernen der App **phyphox** und deren Bedienung. Lernziele dabei sind:

- Die SuS⁵ können die App **phyphox** bedienen und Messwerte experimentell aufzeichnen und abspeichern.
- Die SuS können Ort und Ausrichtung des Magnetsensors im Smartphone nennen.
- Die SuS können das Messverhalten des Sensors beschreiben (Nord-/Südausrichtung, Sättigungsverhalten des Sensors, Messfrequenz und $1/r$ -Abhängigkeit des Magnetfeldes).

⁵Schülerinnen und Schüler

Teil	Lernziele	Experimente
I	phyphox bedienen Ort des Magnetsensors Messverhalten Sensor	phyphox Kennenlernen
II	Aufbau Schwingkreis Messung Schwingung LC-Kombinationen	Aufbau über Graphen Aufbau über Schaltkreis Aufbau über Recherche
III	Funktionsweise erklären	Erklärung mit Recherche Erklärung analog zur mech. Schw.
IV	Proportionalität von LC und ω Proportionalität von RL und β Bewertung der Grenzen des Sensors	Untersuchen des Schwingkreises Optimieren des Schwingkreises
V	Schwingung math. beschreiben β und ω bestimmen	Aufstellen und Lösen der DGL Quantifizierung der Messerwerte

Tab. 4.1: Stichpunktartige Auflistung der Lernziele und Experimente der einzelnen Versuchsteile.

Der **zweite Teil** besteht aus dem Aufbauen des Schwingkreises und ersten einfachen Untersuchungen. Die Ziele sind dabei Handlungsziele und keine Lernziele, da das tiefere Verständnis erst in den nachfolgenden Teilen erfolgt.

- Die SuS bauen einen funktionsfähigen elektromagnetischen Schwingkreis auf.
- Die SuS messen die Schwingung eines Schwingkreises in Form des Magnetfeldes der Spule (oder alternativ der Spannung oder des Stromes).
- Die SuS messen die Schwingung mit verschiedenen Kombinationen von Induktivität und Kapazität.

Im **dritten Teil** geht es um das Verstehen der Abläufe im Schwingkreis, das Lernziel ist durch den Bildungsplan vorgegeben:

- Die SuS können die Funktionsweise des Schwingkreises und die auftretenden Energieumwandlungen erläutern. [KM, 2016, S. 28]

Im **vierten Teil** geht es um das Untersuchen und Optimieren des Schwingkreises. Lernziele sind:

- Die SuS können die Proportionalität von Induktivität, Kapazität und Frequenz beschreiben.
- Die SuS können die Proportionalität von Induktivität, Widerstand und Dämpfung beschreiben.

- Die SuS können die (physikalischen) Grenzen des Sensors bewerten (z.B die Grenzen durch Sättigung und Messfrequenz).

Im optionalen **fünften Teil** kann die Differentialgleichung des Schwingkreises aufgestellt oder deren Ergebnis untersucht werden:

- Die SuS können die Spannungsgleichung 2.15 nach KIRCHHOFF für den Schwingkreis wiedergeben.
- Die SuS können β und ω berechnen und mit den realen Werten abgleichen.
- Die SuS können die (ungedämpfte) harmonische Schwingung mathematisch beschreiben. [KM, 2016, S. 28]

Folgende **Materialien** sind bereitzustellen: mehrere *Spulen* mit unterschiedlichen Induktivitäten (deren Eigenschaften aus 3 zu entnehmen sind), mehrere *Kondensatoren* und einige niederohmige *Widerstände*. Zur Verbindung der Bauteile eignen sich nur Krokodilklemmen mit hohem Kabeldurchmesser, ansonsten können normale *Verbindungskabel* aus der Schule (mit Krokodilklemmenadaptern) verwendet werden. Es ist möglich alle Bauteile bis auf die Spule als Bausteine zum Zusammenstecken zu verwenden. Des Weiteren nötig sind *Magnete*, *Nägel* und ein Smartphone pro Gruppe.

Die **Dauer** der Bearbeitung des Teilprojektes beträgt ungefähr einen Vormittag oder 4 Schulstunden. Müssen die Schüler abschließend einen Vortrag erstellen, ist noch mehr Zeit einzuplanen. Zwischen den einzelnen Teile ist es möglich noch verschiedene Inhalte und Diskussionsthemen aus dem Bereich der *Metainteraktionen* einzufügen.

Die erstellten **Arbeitsblätter** sind in Aufgaben und Hinweise unterteilt. Die Aufgaben müssen der Reihe nach abgearbeitet werden, die Hinweise können je nach Bedarf zum Beispiel bei der Lehrkraft abgeholt oder per QR-Code selbstständig abgerufen werden. Sämtliche ausgearbeiteten Arbeitsblätter sowie eine Anleitung für die Lehrenden sind im Anhang zu finden.

4.2 Teil I: Kennenlernen von phyphox

Vor den eigentlichen Versuchen ist es wichtig, dass die Schülerinnen die App richtig kennenlernen und verwenden können. Dafür sollte bekannt sein, wie der Sensor ausgerichtet ist und die Achsen angeordnet sind. Wenn der Sensor genau über der Spule liegt, ist das Messergebnis am besten. Außerdem sollte bekannt sein, dass der Sensor ab einer gewissen Feldstärke sättigt.

Aufgabe 4.2.1

Installiere die App *phyphox* auf deinem Smartphone.

Aufgabe 4.2.2

Öffne die App und öffne anschließend den Versuch *Magnetfeld* in der App.

Aufgabe 4.2.3

Starte eine Messung und schreibe auf, was die einzelnen Symbole zur Steuerung der Messung bedeuten. Mache dich außerdem mit der Darstellung der Graphen vertraut.

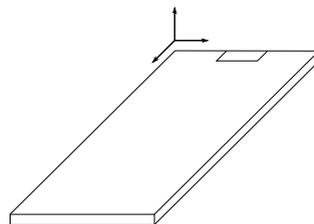
Zusatz-Hinweis

Starte eine Messung, indem du auf das Play-Symbol drückst. Mit dem Pause-Symbol kannst du die Messung anhalten, mit dem Mülleimer-Symbol die Messung löschen. Mit zwei Fingern kannst du die Anzeige der Messwerte vergrößern.

Der Versuch beginnt mit der Installation der App und dem Öffnen des Experimentes. Danach sollen sich die Schüler mit den Bedienelementen in der App vertraut machen, diese Aufgaben adressieren Punkt eins der Lernziele. Geöffnet ist in dieser Aufgabenstellung der Lösungsweg und die Strategie, die Lösung ist durch die definierten Funktionsweisen der App vorgegeben (die PRIMER-Spinne ist an dieser Stelle aufgrund der größeren Anzahl an Aufgaben nicht dargestellt).

Aufgabe 4.2.4

Finde nun möglichst viele Eigenschaften des Magnetsensors mit eigenen Experimenten heraus und ergänze dessen Ort und Achsenbeschriftung in der Skizze. Notiere die Eigenschaften unten.



Zusatz-Hinweis

Das kannst du zum Beispiel mit einem Magneten machen und die maximale Stärke des Magneten messen. Was passiert wenn du den Magneten umdrehst? Welche räumliche Ausrichtung hat der Sensor im Smartphone? Wo genau ist der Sensor im Smartphone? Den Ort kannst du mithilfe eines magnetisierten Nagels bestimmen. Trage die Achsen und den Ort in die Skizze ein. Wie groß ist das Erdmagnetfeld? Gibt der Sensor die richtige Größe an? Wie oft misst der Sensor pro Sekunde?

Anschließend wird die Ausrichtung des Magnetsensors und sein Verhalten untersucht (zweites und drittes Lernziel). Im Idealfall setzen sich die Schülerinnen mit der y-Achsenbeschriftung (μT) auseinander. Auch die Sättigung des Sensors kann hier beobachtet werden. Wenn der Magnet umgedreht wird, sollte sich das Vorzeichen des gemessenen Feldes ändern. Mit einem Nagel (dessen Feldstärke an der Spitze groß ist, aber eine geringe räumliche Ausbreitung hat) kann der Sensor geortet werden; Nähert man den Nagel dem Smartphone in einer Raumrichtung, während man versucht die Feldstärke der anderen beiden Raumrichtungen gleich zu halten (über die Graphen gut ablesbar), kann der Ort des Sensors "trianguliert" werden.

Mit dieser Aufgabenstellung werden vor allem Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung gefördert. Die Schüler sollen zielgerichtet mit dem Sensor experimentieren und die Ergebnisse auswerten. Dazu müssen die Messwerte digital in der App erfasst werden.

Lösung und Lösungswege sind in dieser Aufgabe nicht festgelegt. Der Sensor hat viele verschiedene Eigenschaften, die experimentell entdeckt werden können. Auch Strategie und Methode sind nicht vorgegeben, die Arbeitsweise kann von den Schülerinnen selbst festgelegt werden. Der Hinweis schränkt die Offenheit insofern ein, dass er sowohl Lösungen als auch Lösungswege festlegt.

Aufgabe 4.2.5

Überlege dir selbst Experimente, bei denen du mit dem Sensor ein Magnetfeld misst und führe sie durch. Beschreibe im Textfeld den Versuchsaufbau und die Ergebnisse.

Zusatz-Hinweis

Du kannst zum Beispiel einen Magneten, eine Spule oder das Erdmagnetfeld für die Experimente verwenden.

Messen kannst du zum Beispiel das Magnetfeld einer Spule bei verschiedenen starken Stromstärken oder die Stärke des Magnetfeldes in Abhängigkeit vom Abstand des Sensors.

Abschließend können die Schülerinnen noch einfache eigene Versuche mit dem Sensor durchführen. Das kann zum Beispiel die Validierung der Messwerte über das Erdmagnetfeld (ca. $50 \mu\text{T}$) sein, Untersuchung der Abstandsabhängigkeit der Stärke des Magnetfeldes oder die B-I-Abhängigkeit einer Spule. Hierbei geht es vor allem darum, zielgerichtet zu experimentieren, die Ergebnisse zu dokumentieren und die Arbeitsweisen zu reflektieren, kompetenztechnisch also ein Rundumschlag.

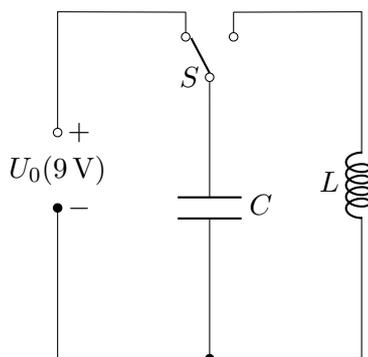
Wie oben ist diese Aufgabe offen gestellt, sogar der Fachinhalt ist hier ein Stück weit geöffnet, denn die Experimente decken verschiedene physikalische Themengebiete ab. Auch Lösungsweg, Strategie und Methode sind nicht weiter vorgegeben. Die Erstellung und Durchführung der Experimente ist den Schülern vollständig überlassen. Ist ein Experiment einmal gewählt, ist die richtige Lösung wie zum Beispiel bei der Abstandsabhängigkeit festgelegt. Diese Dimension ist also nicht offen.

4.3 Teil II: Aufbau über einen vorgegebenen Schaltkreis

In diesem Experiment soll der Schwingkreis über einen vorher vorgegebenen Schaltplan aufgebaut werden. Die eigentliche Fragestellung ist kurz, dafür die Überlegungen zur folgenden Messung umso anspruchsvoller. Das Hauptaugenmerk liegt bei der Messung der Schwingung, kann aber zusätzlich auch auf die Hypothesenbildung gelegt werden.

Aufgabe 4.3.1

Unten siehst du den Schaltplan eines elektromagnetischen Schwingkreises. Baue die Schaltung auf und führe anschließend eine Messung der Schwingung durch. Fertige eine Skizze der Schwingung an.



Zusatz-Hinweis

Suche dir passende Kondensatoren und Spulen aus, mit denen du eine gut erkennbare Schwingung aufnehmen kannst.

Zusatz-Hinweis

Du kannst das Magnetfeld der Spule mit deinem Smartphone messen.

Die Aufgabe in diesem Teil besteht aus dem Aufbau des Schaltkreises und dem Messen der Schwingung. Auswahlmöglichkeiten bestehen bei der Wahl von Kondensator und Spule (Es kann lange dauern, bis eine sinnvolle Kombination gefunden wird. Mit einer Vorauswahl können die Möglichkeiten eingeschränkt werden.) sowie bei der Messmethode.

Bei Aufbau und Messung mithilfe von **phyphox** wird die Kompetenz des "zielgerichteten Experimentierens" gefördert. Das ist im Speziellen das Durchführen von Experimenten, sowie die digitale Erfassung von Daten. Auch die Ergebnisse der einzelnen Messungen müssen diskutiert werden, um eine sinnvolle Kombination aus Kapazität und Induktivität zu finden. Für die Schüler gut sichtbar ist bei der Arbeit mit **phyphox**, dass experimentelle

Daten sehr einfach und anschaulich visualisiert aufgenommen werden können. Im Idealfall haben die Schülerinnen mit dem Alltagsgerät Smartphone in Zukunft noch weitere Ideen, was gemessen werden kann.

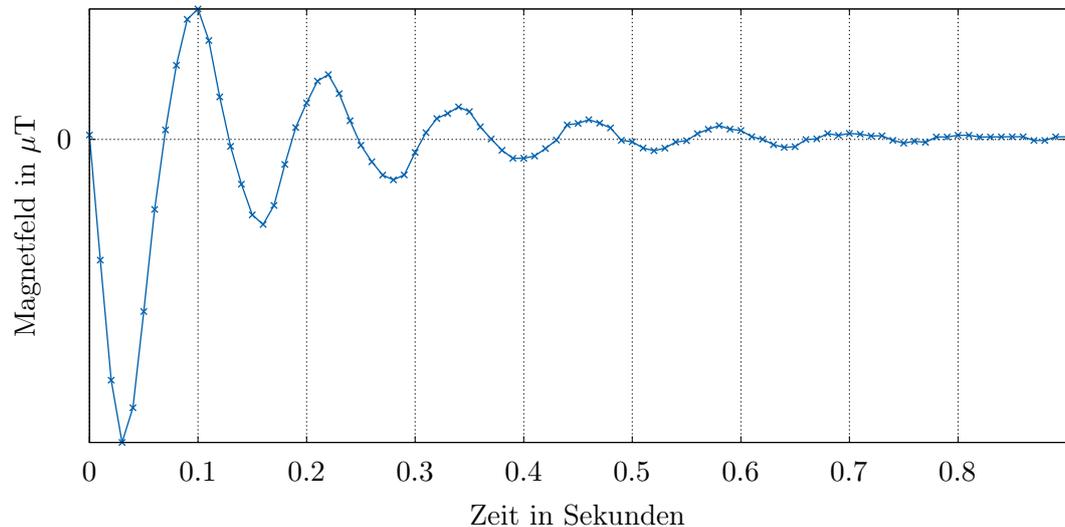
Durch die fehlenden Vorgaben zum Kondensator und zur Spule existieren mehrere Lösungen des Experimentes. Auch die Messmethode ist nicht vorgegeben, und es kann sowohl mit dem Smartphone als auch mit einem Strom-/Spannungsmessgerät gemessen werden.

4.4 Teil II: Aufbau über einen Graphen

Anhand eines vorgegebenen Graphen⁶ der Schwingung sollen die Schülerinnen eine entsprechende Schaltung aufbauen und die Daten reproduzieren. Der Aufbau des Schaltkreises kann entweder ohne weitere Hilfen erfolgen oder über Zwischenschritte und beispielweise vorgegebene Bauteile. An dieser Stellen ist das Verständnis des gegebenen Graphen sehr wichtig (z.B. das richtige Interpretieren der x- und y-Achsenbeschriftung).

Aufgabe 4.4.1

Baue eine elektrische Schaltung auf, an der du den unten gezeigten Graphen reproduzieren kannst. Notiere vorher, welche Parameter des Graphen entscheidend sind.



⁶Der unten gezeigte Graph wurde mit einer Spule mit 30 mH und $0,17\ \Omega$ und einem Kondensator mit $10.000\ \mu\text{F}$ aufgenommen.

dieses Wissen dann weitergeben. Schon der Artikel in Wikipedia⁷ reicht aus, um die Schaltung aufzubauen. Hier ist es wichtig, dass über weitere Aufgaben ein tieferes Verständnis über das einfache "Zusammenstecken" hinaus entsteht.

Aufgabe 4.5.1

Baue einen elektromagnetischen Schwingkreis auf. Du kannst die Quelle für den Bauplan selber wählen (zum Beispiel dein Physikbuch oder das Internet). Passende Materialien wurden bereit gelegt.

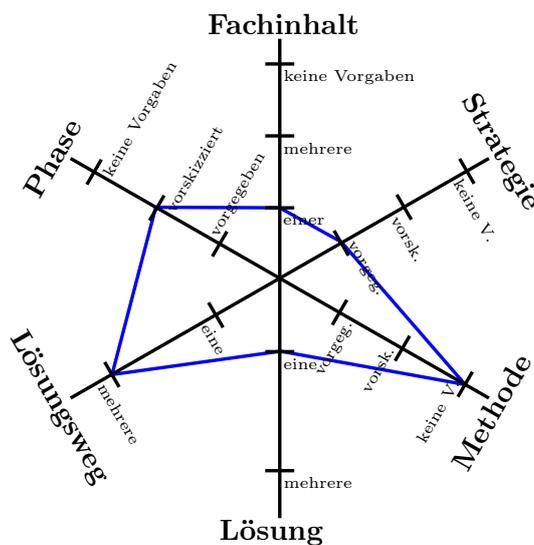


Abb. 4.2: Dimensionen der Offenheit für dieses Experiment [Priemer, 2011, eigene Bearbeitung].

Diese erste Aufgabe steigt direkt in die Materie ein und behandelt das erste gesetzte Ziel. Dabei werden vor allem die Kompetenzen im Bereich Kommunikation gefördert, im Speziellen die Recherche von Quellen und deren sinnvolle Strukturierung. Im Bereich der Bewertung ist die Prüfung auf Relevanz der Informationen eine Schlüsselkompetenz dieser Aufgabe.

Geöffnet ist hier vor allem die Methode der Recherche. Die Schülerinnen können eine beliebige Quelle ihrer Wahl verwenden und diese auswerten. Damit einher gehen verschiedene Lösungswege der Aufgabe, die Lösung ist allerdings fest vorgegeben. Auch die Strategie (Auswertung von Text- und Videoquellen) ist vorgegeben.

Zusatz-Aufgabe

Mit dem Smartphone kannst du die Schwingung messen. Stelle eine Hypothese auf, wie diese Schwingung aussieht.

Diese Aufgabe zielt in erster Linie auf die Kompetenzförderung der Hypothesenbildung ab und ist nach PRIEMER in den meisten Punkten geschlossen. Zwar ist eine Lösung nicht sofort ersichtlich und die Schüler können verschiedene Hypothesen aufstellen, allerdings gibt es nur eine richtige Lösung und auch der Lösungsweg ist festgelegt.

⁷<https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingkreis>

Aufgabe 4.5.2

Miss die Schwingung des Schwingkreises und fertige eine Skizze der Messung an.

Zusatz-Hinweis

Du kannst den Magnetsensor deines Smartphones verwenden, um das Magnetfeld der Spule zu messen.

Für die nächste Aufgabe sind Kompetenzen für die Erkenntnisgewinnung nötig. Die Schüler müssen erkennen, dass das Magnetfeld der Spule schwingt und sie dieses messen können (alternativ kann auch der Strom oder die Spannung an der Spule gemessen werden). Außerdem müssen die Messwerte digital erfasst und ausgewertet werden.

Auch hier ist die Strategie vorgegeben, allerdings nicht die Methode der Auswertung (wenn auch Strom oder Spannung gemessen werden können). Dementsprechend gibt es mehrere Lösungswege und mehrere Lösungen, die alle ein Schwingungsbild ergeben. Mit dem Hinweis werden sowohl Lösungswege als auch Methoden eingeschränkt.

Zusatz-Aufgabe

Kannst du deine Hypothese bestätigen? Warum?

Diese Zusatzaufgabe ist die Folgeaufgabe zur Aufstellung der Hypothese zu Beginn. Die Eigenschaften bezüglich der Kompetenzen und Offenheit sind die Gleichen.

4.6 Teil III: Erklärung mit einer Recherche

Nachdem der Schwingkreis erfolgreich aufgebaut und erste Messungen gemacht wurden, sollen die Schülerinnen nun dessen Funktionsweise verstehen. Die erste Möglichkeit ist wieder eine Recherche.

Aufgabe 4.6.1

Beschreibe die Funktionsweise des elektromagnetischen Schwingkreises in eigenen Worten. Um eine Erklärung zu finden, kannst du eine beliebige Quelle auswählen. Notiere das Ergebnis unten.

Wenn verschiedene Niveaus angesprochen werden sollen, kann auch mit verschiedenen Lösungsformen gearbeitet werden. Die schwierigste Form ist das Schreiben eines eigenen Fließtextes zur Erklärung. Stattdessen können Sätze in die richtige Reihenfolge gebracht werden, oder es kann ein Lückentext zum Ausfüllen vorgegeben sein.

4.7 Teil III: Erklärung analog zur mechanischen Schwingung

Bei der mechanischen Schwingung gehen die beiden Energieformen potentielle Energie und kinetische Energie periodisch ineinander über. Bei der elektromagnetischen sind dies die Energie, die im Kondensator gespeichert wird, und die Energie des Magnetfeldes in der Spule. Mit dem Vorwissen über die mechanische Schwingung können die Schüler den Schwingkreis erklären. Die Lernziele können für diesen Versuchsteil um ein Weiteres ergänzt werden: "Die Schülerinnen und Schüler können Gemeinsamkeiten und Unterschiede von mechanischen und elektromagnetischen Schwingungen erläutern." [KM, 2016]

Allerdings ist zu beachten, dass Vorwissen nötig ist, das über das in Abb. 2.12 hinausgeht. Den Schülern müssen die Konzepte der mechanischen Schwingung eines Federpendels und die Zusammenhänge von mechanischer und kinetischer Energie bekannt sein.

Aufgabe 4.7.1

Beschreibe die Funktionsweise des elektromagnetischen Schwingkreises in eigenen Worten. Vergleiche sie dazu mit der Schwingung eines Federpendels.

Zusatz-Hinweis

Die folgende Tabelle kann dir bei der Lösung helfen:

Federpendel	Schwingkreis
Die Gesamtenergie setzt sich aus Spannenergie und kinetischer Energie zusammen.	
Die Feder speichert die Spannenergie.	Der Kondensator speichert die elektrische Energie.
Durch die Bewegung besitzt der Pendelkörper kinetische Energie.	
Durch das Spannen der Feder wird die nötige Energie für die Schwingung von außen zugeführt.	
Der Pendelkörper schwingt aufgrund seiner Trägheit über die Ruhelage hinaus, die Feder wird gespannt und gestaucht.	

Diese Aufgabestellung fördert Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung, spezifisch das Nutzen von Analogien zur Lösung von Problemstellungen. Die Aufgabe ist geschlossen, sowohl Lösung als auch Lösungsweg sind festgelegt.

4.8 Teil IV: Untersuchen

Zumindest die Kapazität kann in den verwendeten Aufbauten leicht verändert werden. Damit können Proportionalitäten zwischen Kapazität und Frequenz, sowie Induktivität und Frequenz untersucht werden.

Aufgabe 4.8.1

Untersuche die Eigenschaften eines Schwingkreises und bestimme deren Parameter. Notiere welche Eigenschaften du untersuchen möchtest und notiere nach dem Untersuchen die Parameter der Eigenschaften.

Zusatz-Hinweis

Von welchen Parametern hängt die Frequenz ab?

Von welchen Parametern hängt die Stärke der Dämpfung ab?

Die Proportionalität der Frequenz (2.21) ist allerdings vergleichsweise kompliziert und kann nicht direkt aus einem Graphen abgelesen werden. Werden nur die Maxima der Schwingung untersucht, kann mithilfe von verschiedenen niederohmigen Widerständen die Dämpfungskonstante untersucht werden. Diese Aufgabe wird einfacher, wenn die Werte direkt in einem Graphen mit logarithmischer y-Achse aufgetragen werden.

Gefördert werden in diesem Aufgabenteil vor allem Kompetenzen der Erkenntnisgewinnung. Zuerst geht es um das zielgerichtete Experimentieren und das Variieren von vermuteten Einflussgrößen, deren Ergebnisse dann in mathematische Zusammenhänge gebracht werden.

Die Lösungen dieser Aufgabe sind fest vorgegeben. Strategie, Methode und Lösungsweg sind offen, aber zum Beispiel durch vorgegebene Bauteile eingeschränkt. Dadurch, dass zwei verschiedene Eigenschaften untersucht werden können, ist der Fachinhalt geöffnet.

4.9 Teil IV: Optimieren

Bei diesem Versuch stellt sich vor allem die Frage "Was ist Optimieren?". Optimierung kann in dem vorgestellten Versuchsaufbau sehr viel bedeuten: die maximale Anzahl an

Schwingungen aufzunehmen, eine möglichst geringe Dämpfung zu haben oder eine möglichst "schöne" Kurve aufzunehmen.

Aufgabe 4.9.1

Optimiere den Schwingkreis. Schreibe vorher auf, an welchen Stellen du den Schwingkreis optimieren möchtest.

Zusatz-Aufgabe

Recherchiere die Formel für die Frequenz der Schwingung und vergleiche sie mit den aufgenommenen Werten. Gibt es einen Unterschied und, wenn ja, warum?

Den Schülern ist hier keine Grenze gesetzt, die Aufgabe ist sehr offen gestellt. Bis auf den Fachinhalt sind alle Teilbereiche offen und je nach Auslegung des Begriffes "Optimierung" können viele unterschiedliche Lösungen gefunden werden.

Gefördert wird das zielgerichtete Experimentieren, denn die Schüler müssen das Experiment in mehreren Iterationen durchführen, die Ergebnisse auswerten und den Versuchsaufbau entsprechend der Ergebnisse anpassen. Zusätzlich muss das Ergebnis auch immer wieder bewertet und der Versuchsaufbau angepasst werden.

Optimierung kann auch das Reduzieren von Fehlern bei der Messung sein, darauf wird in der Zusatzaufgabe eingegangen. Diese Aufgabe geht auf auf die Kompetenz der Bewertung der Ergebnisse von Experimenten ein.

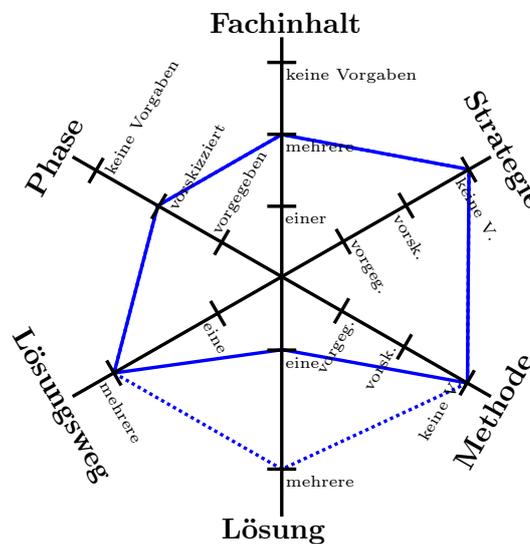


Abb. 4.4: Dimensionen der Offenheit für 4.8 und 4.9 (gestrichelt) [Priemer, 2011, eigene Bearbeitung].

4.10 Teil V: Differentialgleichung

Das Ende des Projektes wird durch einen optionalen Teil ergänzt. Das erste Experiment ist Mathematiklastig, es soll die Differentialgleichung über die Summe der Spannungen aufgestellt und gelöst werden. Da in den vorherigen Versuchsteilen kein Widerstand vor-

kommt, ist die Differentialgleichung harmonisch. Voraussetzung für die Aufgabe ist, dass sich die Schülerinnen bereits mit dem Aufstellen und Lösen von Differentialgleichungen mithilfe einer Schwingungsfunktion beschäftigt haben. Der Ansatz über die Summe der Spannungen kommt vorher nicht im Bildungsplan vor, diesen Hinweis werden die meisten Schüler verwenden müssen.

Aufgabe 4.10.1

Stelle die Differenzialgleichung für den elektromagnetischen Schwingkreis ohne Widerstand auf und löse sie.

Zusatz-Hinweis

Die Differentialgleichung ergibt sich aus der Summe der Spannungen an den Bauteilen.

Zusatz-Hinweis

Der Ansatz für die Lösung der Differentialgleichung ist eine Trigonometrische Funktion.

Die Lösung ist die Gleichung aus (2.15) ohne den Term, der den Widerstand beschreibt. Diese Gleichung wird mit dem Ansatz $f(t) = a \sin(\omega t)$ gelöst und es ergibt sich die Frequenzabhängigkeit (2.21).

Mit dieser Aufgabe werden vor allem Kompetenzen aus dem Bereich "modellieren und mathematisieren" gefördert. Es werden mathematische Zusammenhänge zwischen den Größen der Bauteile hergestellt, die anschließend überprüft werden können.

Die Aufgabe hat zwei verschiedene Lösungswege: Lösungsansatz kann sowohl eine Exponentialfunktion als auch eine Trigonometrische Funktion sein. Dadurch ist die Aufgabe teilweise geöffnet, alle anderen Komponenten sind fest vorgegeben.

4.11 Teil V: Quantifizierung der Messwerte

Für dieses Experiment ist die Lösung der Differentialgleichung bereits vorgegeben, die Schüler sollen die aufgenommenen Werte mit denen der mathematischen Lösung abgleichen. Verwendet wird (2.28) mit $I_0 = 0$ und den Vorfaktoren zusammengefasst zu A . Die Schülerinnen müssen erkennen können, dass ω die Frequenz ist und β eine Dämpfungskonstante ist.

Aufgabe 4.11.1

Die Formel für das Magnetfeld einer Spule bei der Schwingung des Schwingkreises ist (Der Schwingkreis wird bei dieser Formel durch einen Widerstand R gedämpft):

$$B(t) = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \beta = \frac{R}{2L} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

R ist der Widerstand in Ω , L die Induktivität der Spule in H und C die Kapazität des Kondensators in F. A ist die Amplitude der Schwingung und kann nicht angegeben werden.

Führe eine Messung durch und vergleiche die theoretischen Werte von ω und β mit denen, die sich aus der Messung ergeben. Notiere deine Ergebnisse.

Zusatz-Aufgabe

Woran könnte die Abweichung der gemessenen Werte im Vergleich zu den theoretischen Werten liegen?

Auch hier werden Kompetenzen im Bereich "mathematisieren und modellieren" behandelt. Der mathematische Zusammenhang zwischen verschiedenen Größen wird vorgegeben und muss überprüft werden. Außerdem sollen die Werte der realen Messung mit denen des idealisierten mathematischen Modells abgeglichen werden. Mit der Zusatzaufgabe wird auch noch die physikalische Arbeitsweise bewertet und es kann eine Diskussion über Messfehler und Messgenauigkeit geführt werden.

Es können insgesamt drei verschiedene Bauteile getestet werden. Außerdem kann die Rechnung entweder über Dämpfung oder Frequenz erfolgen, für mindestens ein Bauteil muss jedoch ein gegebener Wert angenommen werden, solange nicht die Auswertung über einen Fit erfolgt. Aus diesen Gründen ist die Aufgabe sowohl bezüglich des Lösungsweges als auch von der Anzahl der Lösungen geöffnet. Auch die Methode ist ge-

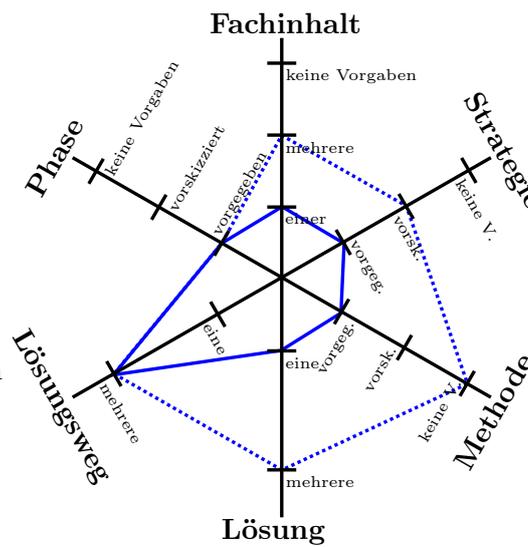


Abb. 4.5: Dimensionen der Offenheit für 4.10 und 4.11 (gestrichelt) [Priemer, 2011, eigene Bearbeitung].

öffnet, denn die Schülerinnen können Bauteile und Messmethode selbst wählen. Durch die Auswahlmöglichkeiten für die Werte der Rechnung (werden z.B. die Extrema oder die Nulldurchgänge für die Frequenzberechnung verwendet?) ist auch die Strategie in Teilen offen.

5 Durchführung mit Versuchspersonen

Für die oben vorgestellten Aufgaben wurden schülerinnengerechte Arbeitsblätter erstellt und entsprechend formatiert. Anschließend wurden die Arbeitsblätter mit insgesamt 8 Studierenden (die die Schüler darstellen sollten) in Zweiergruppen getestet. Dabei konnte wie vorgesehen jeweils ein Arbeitsblatt aus den verschiedenen Teilen gewählt werden. Um die nach der initialen Erstellung durchgemachte Entwicklung der Arbeitsblätter nachvollziehbar zu machen, werden nun die Ergebnisse und vor allem Kritikpunkte aus der Nachbesprechung einiger Gruppen vorgestellt. Nach jeder Gruppe wurden die Arbeitsblätter und deren Aufgabenstellung überarbeitet.

5.1 Gruppe 1

Die erste Gruppe bestand aus zwei angehenden Lehrerinnen mit Physik als Fach. Dies wurde explizit so gewählt, um direkt zu Beginn auch fachdidaktische Rückmeldung der Teilnehmerinnen zu erhalten. Von den Studierenden gewählt wurde der Aufbau über die vorgegebene Schwingung, die Erklärung über eine Recherche und die Optimierungsaufgabe. Die Teilnehmerinnen benötigten 1:30h für das gesamte Teilprojekt.

Über alle Arbeitsblätter hinweg wurde kritisiert, dass eine konkrete Anweisung zum Festhalten der Ergebnisse fehlt. Dies wurde in der folgenden Version angepasst, bei einigen Aufgaben wurde spezifiziert, was notiert werden soll. Außerdem sind für den Versuchsaufbau Krokodilklemmen-Adapter für die normalen Versuchskabel nötig, da die Kabel der Krokodilklemmen einen zu hohen Widerstand haben.

In Teil I fehlte eine Beschreibung, was mit Symbolen gemeint ist. Den Teilnehmenden wurde außerdem nicht bewusst, dass sie eine Messung neu starten müssen um ein Magnetfeld mit geringen Stärken zu messen, da diese aufgrund vorheriger großer Ausschläge nicht sichtbar sind.

In Teil II war unklar, nach welchen Kriterien die Schwingung nachgebaut werden sollte, außerdem stellten die Anschlussmöglichkeiten an die Drähte der Spule eine Hürde dar.

Insgesamt hatte die Durchführung den erwarteten Projektcharakter. Die Teilnehmenden hatten viel Zeit um verschiedene Methoden auszuprobieren und auf ein Ergebnis zu kommen. Auch die eigenen Ideen wurden wie erwartet eingebracht (z.B. eine Abstandsmessung in Teil I oder die Optimierung der Dämpfung in Teil IV).

5.2 Gruppe 2

Die zweite Gruppe bestand aus zwei Studierenden, die keinerlei Erfahrung in den Naturwissenschaften hatten. Deshalb wurde zuerst eine kleine Einführung in den Grundlagen

gegeben um die Experimente durchführen zu können. Auch diese Gruppe brauchte ca. 1:30h.

Teil I funktionierte gut, hier waren nur noch Kleinigkeiten zu verbessern. Die Eigenschaften des Sensors sollen zum Beispiel mit Experimenten gefunden werden, **phyphox** selber stellt dazu keine Informationen dar. Außerdem sollen sich die Schülerinnen und Schüler überlegen, welches die beste Raumrichtung beim Messen ist. Zu beachten ist, dass je nach verwendetem Smartphone unterschiedliche Schwierigkeiten auftreten können, so dauerte es bei dem in diesem Versuch verwendeten Smartphone erst ein paar Sekunden bevor Werte aufgenommen wurden.

Keine der Gruppen beachtete die Polarität des Kondensators, hier wurden aber keine weiteren Maßnahmen ergriffen. Solange die Messung kurz nach dem Laden des Kondensators durchgeführt wird, ist das kein Problem.

Bei den weiteren Experimenten wurde klar, dass die Lernenden auch Erfahrung in der Interpretation von Schwingungen (Frequenz, Dämpfung) brauchen, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht in den Voraussetzungen aufgeführt waren. Verglichen wurden die Schwingungen mithilfe von Screenshots, was gut funktionierte.

5.3 Gruppe 3

Auch die letzte Gruppe bestand aus zwei nicht-Physik-Studierenden, allerdings war durch Kenntnisse in Mathematik und Informatik einiges an Vorwissen vorhanden.

Die Ausrichtung in Teil I wurde durch Drehen des Smartphones sehr schnell gefunden, für das eigene Experiment wurde das Smartphone an der Längsachse eines Magneten entlang bewegt, wodurch das Magnetfeld schön visualisiert wurde.

Die anderen Teile verliefen ohne weitere Anmerkungen, in Teil V - Quantifizierung wurden einige Probleme in der Formulierung aufgedeckt. Zum einen sollte auf den Vorfaktor A genauer eingegangen werden, da eine Berechnung der Stärke des Magnetfeldes mit den gegebenen Informationen nicht möglich ist. Zum anderen geht es bei diesem Versuch um das Ausrechnen und Ermitteln von β oder ω , dies wurde nicht explizit so formuliert.

In der Nachbesprechung erwähnt wurde in allen Gruppen die offene Aufgabenstellung, meistens mit der Anmerkung, dass nicht klar war, was gemacht werden sollte. Daraufhin wurden die Aufgaben um Handlungsanweisungen ergänzt, die möglichst nicht die Offenheit einschränken. Auf die verschiedenen Lösungswege müssen die Schülerinnen jedoch in fast allen Fällen weiterhin selber kommen, deshalb sind hier weitere Tests der Aufgabenstellungen in realen Umgebungen nötig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Ausarbeitung eines Teilprojektes zum Thema "elektromagnetischer Schwingkreis", als übergeordnetes Thema für ein größeres Projekt wird "Schwingungen" vorgeschlagen. Das Teilprojekt kann auch als eigenständige Projektarbeit für circa einen Vormittag durchgeführt werden. Als Messgerät für das Magnetfeld der Spule ist ein Smartphone mit der App **phyphox** vorgesehen. Es werden in einzelne Themen unterteilte Arbeitsblätter mit Experimenten vorgestellt, dazu ein Hinweis für die Lehrkraft, der als "Anleitung" zu verstehen ist. Die Arbeitsblätter sind in fünf Teile gegliedert, für jeden Teil sind eigene Lernziele festgelegt. Innerhalb eines Teils können sich die Lernenden jeweils Experimente selbstständig aussuchen.

Zusätzlich wird eine Auswertung einiger aufgenommenen Daten vorgenommen, dabei weichen die Werte deutlich von den theoretisch zu erwartenden Ergebnissen ab. Die Qualität der Daten ist insgesamt aber sehr hoch und die Werte sind gut reproduzierbar. Zu beachten ist jedoch, dass der Magnetsensor von Smartphones gewissen Einschränkungen unterliegt. Er sättigt schon bei recht kleinen Feldern und hat vor allem eine geringe Messfrequenz, die es meist nicht erlaubt Schwingungen mit mehr als 12 Hz aufzunehmen.

Die Tests der Experimente mit Studierenden (leider konnten die Versuche aufgrund des weltweiten *SARS-CoV-2*-Ausbruches und den damit verbundenen Kontaktbeschränkungen nicht an einer Schule durchgeführt werden) verliefen insgesamt zufriedenstellend, viele Fehler in der Aufgabenstellung und Genauigkeit der Anweisungen konnten gefunden werden. Natürlich sind weitere Tests mit Schülerinnen und Schülern nötig, da das Vorwissen und die Herangehensweise von Studierenden meist deutlich anders ist. Interessant wäre auch ein Vergleich von Experimenten mit offener und geschlossener Aufgabenstellung und der Umgangsweise der Lernenden damit, gerade weil der Vorteil offener Aufgaben sehr umstritten ist.

Die vorgestellten Experimente könnten in vielerlei Hinsicht weiter ausgebaut werden. Zum einen ist eine Anpassung an verschiedene Niveaustufen der Lernenden möglich, so können bei Teil IV (Erklären) zum Beispiel Lückentexte vorgegeben werden, oder Sätze, die sortiert werden sollen. Zum anderen können die Experimente weiter ausgebaut oder neue hinzugefügt werden. In Teil V kann Beispielsweise mehr Wert auf eine Messunsicherheitsanalyse gelegt werden, und in Teil IV kann ein weiteres Experiment hinzugefügt werden, in dem der Einfluss eines Eisenkerns auf die Schwingung untersucht wird.

Ein in letzter Zeit immer wichtiger gewordenes Thema fehlt vollständig in den vorgestellten Experimenten: die mathematische Modellbildung. Die in der Schule verwendeten Programme erfordern eine hohe Einarbeitungszeit (sowohl für Lehrende als auch für Ler-

nende) und könnten den zeitlichen Rahmen, den die Lehrkraft für das Projekt einplant deutlich sprengen. Sie stellt jedoch eine interessante Erweiterung der Experimente dar und kann Fächerübergreifend den Bogen zur Mathematik spannen.

Allgemein sind mit dem Magnetsensor des Smartphones natürlich unzählige weitere Experimente möglich, die weit über das Gebiet des elektromagnetischen Schwingkreises hinaus gehen. So könnte zum Beispiel ein Kondensator über einen hohen Widerstand über die Spule entladen werden und die Entladungskurve beobachtet werden, oder es können mit einer Spule mit wenig Widerstand die Ströme in einem Stromkreis dargestellt werden. Auch das Messen einer erzwungenen Schwingung im Schwingkreis wäre eine passende Erweiterung für die vorgestellten Arbeitsmaterialien. Hier ist in den nächsten Jahren mit vielen weiteren interessanten Experimentiervorschlägen mit `phyphox` zu rechnen.

7 Literatur

- [Borchardt, 2020] Borchardt, M. (2020). Der gedämpfte Schwingkreis. [Online; Stand 02. Februar 2021], http://www.mabo-physik.de/der_gedaempfte_schwingkreis.pdf.
- [Demtröder, 2013] Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6. Auflage.
- [Frey, 2007] Frey, K. (2007). *Die Projektmethode - "Der Weg zum bildenden Tun"*. Beltz, Langensalza.
- [Hochberg et al., 2018] Hochberg, K., Kuhn, J., und Müller, A. (2018). Using Smartphones as Experimental Tools — Effects on Interest, Curiosity, and Learning in Physics Education. *Journal of Science Education and Technology*, 27(5):385 – 403.
- [Kircher et al., 2006] Kircher, E., Girwidz, R., und Häußler, P. (2006). *Physikdidaktik - Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1. Auflage.
- [Kircher et al., 2015] Kircher, E., Girwidz, R., und Häußler, P. (2015). *Physikdidaktik - Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 3. Auflage.
- [KM, 2016] KM (2016). *Bildungsplan 2016 - Physik*. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport, Baden-Württemberg.
- [Priemer, 2011] Priemer, B. (2011). *Was ist das Offene beim offenen Experimentieren?* Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 17, 2011.
- [Staacks, 2019] Staacks, S. (2019). phyphox: Using smartphone sensors for physics experiments. [Online; Stand 23. Januar 2021], https://media.ccc.de/v/36c3-11195-phyphox_using_smartphone_sensors_for_physics_experiments.

8 Anhang

Im Anhang zu finden sind:

- Eine Anleitung für die Lehrenden.
- Sämtliche ausgearbeiteten Arbeitsblätter.
- Das Datenblatt des Magnetsensors des Smartphones (von <https://www.akm.com/global/en/support/product-technical-information/document-download/> abgerufen am 07.04.2021, nur die erste Seite!).
- Die Datenblätter der verwendeten Spulen (auch zu finden unter <https://www.hamfmg.com/electronics/transformers/choke/195-196> und <https://www.monacor.de/produkte/components/lautsprechertechnik/frequenzweichen-und-bauteile-/lsi-100t/> abgerufen am 07.04.2021).
- Erste Seite von [Priemer, 2011].
- Erste Seite von [Borchardt, 2020].
- Erste Seite von [Hochberg et al., 2018].
- Erste Seite von [KM, 2016].
- Erste Seite von [Kircher et al., 2015].
- Erste Seite aus [Kircher et al., 2006].
- Erste Seite von [Demtröder, 2013].
- Bildschirmaufnahmen aus dem Video [Staacks, 2019]. Aufgenommen ist der Zeitpunkt an dem der Titel des Vortrages eingeblendet wird.
- Erste Seite aus [Frey, 2007].

Anleitung für die Arbeitsblätter zum elektromagnetischen Parallelschwingkreis für Lehrerinnen und Lehrer. Wenn alle Arbeitsblätter verwendet werden, können die Materialien als Teilprojekt in einer Projektarbeit zum Thema "Schwingungen" eingesetzt werden. An dieser Stelle werden die Inhalte der QR-Codes bereit gestellt und, wo nötig, Lösungsvorschläge zu den Aufgaben gemacht.

Materialien: Wenn nötig steht ganz oben eine Materialliste, bei einigen Arbeitsblättern ist diese bewusst weggelassen.

Aufgabe 1

Dieses Feld zeigt eine nummerierte Aufgabe, die von allen Schülern gelöst werden muss. Meistens ist eine Aufforderung zu finden, etwas in das Textfeld unter der Aufgabe zu schreiben.



_____ Das ist das Freitextfeld.

Hinweis(e) zum Einscannen

Im Hinweis zum Einscannen befindet sich immer eine QR-Code mit zusätzlichen Informationen, falls die Schülerinnen nicht weiter kommen. die Hinweise werden nicht zwingend benötigt.



Vorraussetzungen:

- Sämtlicher im Bildungsplan genannter Stoff zum Thema Elektromagnetismus
- Kenntnis von Lenz'scher Regel
- Grundlagen von Schwingungen (Frequenz, Dämpfung) und deren Lösung

Allgemeine Hinweise:

- Die Dauer beträgt einen Vormittag oder 4 Schulstunden, mit Abschlusspräsentation länger.
- Die SuS können sich aus jedem Teilbereich selbstständig einen Versuch aussuchen.
- Teil V kann als optional gekennzeichnet sein.
- Lösungsvorschläge und die Inhalte der QR-Codes finden sich in dieser Anleitung.

Materialliste:

- Verschiedene Spulen mit $\frac{R}{L} \geq 0.01 \text{ s}$
- Kondensatoren im Bereich von $22\,000 \mu\text{F}$ bis $470 \mu\text{F}$
- Dicker Nagel
- Magnete
- 9 V Batterie
- eventuell niedrigohmige Widerstände
- Verbindungskabel (Versuchskabel mit Krokodilklemmenadapter)
- Wenn vorhanden Stecksysteme aus der Physik-Sammlung mit Schalter
- Smartphones, wenn bei den SuS nicht vorhanden
- Internetzugang oder andere Recherchequellen (Schulbuch, etc.)
- Taschenrechner
- Auf dem Smartphone installierte phyphox-App und eine App, die QR-Codes lesen kann

Lernziele und Übersicht über die Teilerperimente:

Teil	Lernziele	Experimente
I	phyphox bedienen Ort des Magnetsensors Messverhalten Sensor	phyphox Kennenlernen
II	Aufbau Schwingkreis Messung Schwingung LC-Kombinationen	Aufbau über Graphen Aufbau über Schaltkreis Aufbau über Recherche
III	Funktionsweise erklären	Erklärung mit Recherche Erklärung analog zur mech. Schw.
IV	Proportionalität von LC und ω Proportionalität von RL und β Bewertung der Grenzen des Sensors	Untersuchen des Schwingkreises Optimieren des Schwingkreises
V	Schwingung math. beschreiben β und ω bestimmen	Aufstellen und Lösen der DGL Quantifizierung der Messerwerte

Weitere und ausführlichere Informationen sind in der von Niklas Westermann 2021 an der Universität Konstanz angefertigten Staatsexamensarbeit zu finden.

Teil I:**Hinweis(e) zum Einscannen**

Starte eine Messung, in dem du auf das Play-Symbol drückst. Mit dem Pause-Symbol kannst du die Messung anhalten, mit dem Mülleimer-Symbol die Messung löschen. Mit zwei Fingern kannst du die Anzeige der Messwerte vergrößern.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 4: Die z-Achse geht meistens nach oben, x- und y-Achse sind Smartphoneabhängig. Der Ort kann mit einem magnetisierten Nagel gefunden werden. Als Eigenschaft ist zusätzlich noch die Sättigung ab einer bestimmten Feldstärke zu nennen.

Hinweis(e) zum Einscannen

Das kannst du zum Beispiel mit einem Magneten machen und die maximale Stärke des Magneten messen. Was passiert wenn du den Magneten umdrehst? Welche räumliche Ausrichtung hat der Sensor im Smartphone? Wo genau ist der Sensor im Smartphone? Den Ort kannst du mithilfe eines magnetisierten Nagels bestimmen. Trage die Achsen und den Ort in die Skizze in. Wie groß ist das Erdmagnetfeld? Gibt der Sensor die richtige Größe an? Wie oft misst der Sensor pro Sekunde?

Hinweis(e) zum Einscannen

Du kannst zum Beispiel einen Magneten, eine Spule oder das Erdmagnetfeld für die Experimente verwenden.

Messen kannst du zum Beispiel das Magnetfeld einer Spule bei verschiedenen starken Stromstärken oder die Stärke des Magnetfeldes in Abhängigkeit vom Abstand des Sensors.

Teil II - Aufbau über Schaltkreis**Hinweis(e) zum Einscannen**

Suche dir passende Kondensatoren und Spulen aus, mit denen du eine gut erkennbare Schwingung aufnehmen kannst.

Hinweis(e) zum Einscannen

Du kannst das Magnetfeld der Spule mit deinem Smartphone messen.

Teil II - Aufbau über Graphen**Hinweis(e) zum Einscannen**

Materialliste: Spulen, Kondensatoren, Widerstände, Kabel, Smartphone

Hinweis(e) zum Einscannen

Du kannst den Magnetsensor deines Smartphones verwenden um das Magnetfeld der Spule zu messen.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 1: Der gezeigte Graph ist mit einer Spule mit 30 mH , 0.17Ω und einem Kondensator mit $10\,000 \mu\text{F}$ aufgenommen. Parameter können zum Beispiel die Frequenz und die Dämpfung sein.

Teil II - Aufbau über Recherche**Hinweis(e) zum Einscannen**

Du kannst den Magnetsensor deines Smartphones verwenden, um das Magnetfeld der Spule zu messen.

Teil III - Erklärung analog zur mech. Schwingung**Lösungsvorschlag der Tabelle:**

Federpendel	Schwingkreis
Die Gesamtenergie setzt sich aus Spannenergie und kinetischer Energie zusammen.	Die Gesamtenergie setzt sich aus elektrischer Energie im Kondensator und magnetischer Energie des Feldes in der Spule zusammen.
Die Feder speichert die Spannenergie.	Der Kondensator speichert die elektrische Energie.
Durch die Bewegung besitzt der Pendelkörper kinetische Energie.	Die magnetische Energie ist in der Spule gespeichert.
Durch das Spannen der Feder wird die nötige Energie für die Schwingung von außen zugeführt.	Durch das Laden des Kondensators wird die nötige Energie für die Schwingung...
Der Pendelkörper schwingt aufgrund seiner Trägheit über die Ruhelage hinaus, die Feder wird gespannt und gestaucht.	Ist der Kondensator entladen, bricht das Magnetfeld in der Spule zusammen. Dabei entsteht nach der Lenz'schen Regel eine Induktionsspannung, die den Kondensator mit umgekehrter Polarität wieder auflädt.

Teil III - Erklärung über eine Recherche

Der Text für eine Lösung kann einem beliebigen Physikbuch entnommen werden.

Hinweis(e) zum Einscannen

Du kannst dich an folgenden Leitfragen bei der Beantwortung orientieren:

- Welche Bauteile werden verwendet?
- Wie verändert sich das Vorzeichen der Stromstärke an einem bestimmten Punkt im Zeitverlauf?
- Von welcher im Versuch variablen Größe ist das Magnetfeld der Spule abhängig?
- Wie wird Energie in den Bauteilen gespeichert?
- Wie werden die Energieformen ineinander umgewandelt?
- Wie lautet die Formel für die Gesamtenergie?

Teil IV - Optimieren

Diese Aufgabe ist so offen gestellt, dass die SuS fast alles machen können. Vorstellbar ist die Optimierung hin zu einer möglichst geringen Dämpfung oder der höchsten Frequenz die aufgenommen werden kann.

Teil IV - Untersuchen

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 1: Die Frequenz hängt von der Kapazität und der Induktivität ab, die Dämpfung vom Widerstand und der Induktivität.

Hinweis(e) zum Einscannen

Von welchen Parametern hängt die Frequenz ab?

Von welchen Parametern hängt die Stärke der Dämpfung ab?

Teil V - Differentialgleichung

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 1: Die Spannungen ergeben:

$$0 = U_L + U_C = L \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{L} Q(t) = \ddot{Q}(t) + \frac{1}{LC} Q(t) \quad (1)$$

und damit:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad Q(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

Hinweis(e) zum Einscannen

Die Differentialgleichung ergibt sich aus der Summe der Spannungen an den Bauteilen.

Hinweis(e) zum Einscannen

Der Ansatz für die Lösung der Differentialgleichung ist eine Trigonometrische Funktion.

Teil V - Quantifizierung

Hier ist das Ergebnis, dass die gemessenen Werten von denen der Formel mehr oder weniger deutlich abweichen. Die Dämpfung kann mithilfe der Maxima, bzw. des natürlichen Logarithmus bestimmt werden. Die (Kreis-) Frequenz wie üblich über die Periodendauer.

Zu Beginn des Projektes sollst du die App *phyphox* kennen lernen und dich damit vertraut machen Magnetfelder zu messen.

Materialien: Smartphone, Nagel, Magnet, Spulen, Batterie, Widerstände.

Aufgabe 1

Installiere die App *phyphox* auf deinem Smartphone.

Aufgabe 2

Öffne die App und öffne anschließend den Versuch *Magnetfeld* in der App.

Aufgabe 3

Starte eine Messung und schreibe auf, was die einzelnen Symbole zur Steuerung der Messung bedeuten. Mache dich außerdem mit der Darstellung der Graphen vertraut.

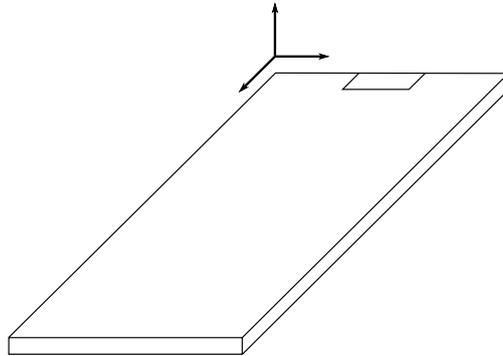


Hinweis(e) zum Einscannen



Aufgabe 4

Finde nun möglichst viele Eigenschaften des Magnetsensors heraus und ergänze dessen Ort und Achsenbeschriftung in der Skizze. Notiere die Eigenschaften unten.

**Hinweis(e) zum Einscannen**

Aufgabe 5

Überlege dir selbst Experimente, bei denen du mit dem Sensor ein Magnetfeld misst und führe sie durch. Beschreibe im Textfeld den Versuchsaufbau und die Ergebnisse.

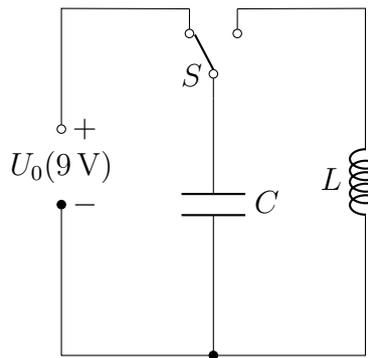
Hinweis(e) zum Einscannen

In diesem Experiment sollst du einen Schwingkreis mit einem gegebenen Schaltplan aufbauen.

Materialien: Spule, Kondensator, Schalter, Batterie, Kabel, Smartphone.

Aufgabe 1

Unten siehst du den Schaltplan eines elektromagnetischen Schwingkreises. Baue die Schaltung auf und miss anschließend eine Schwingung, fertige eine Skizze an.



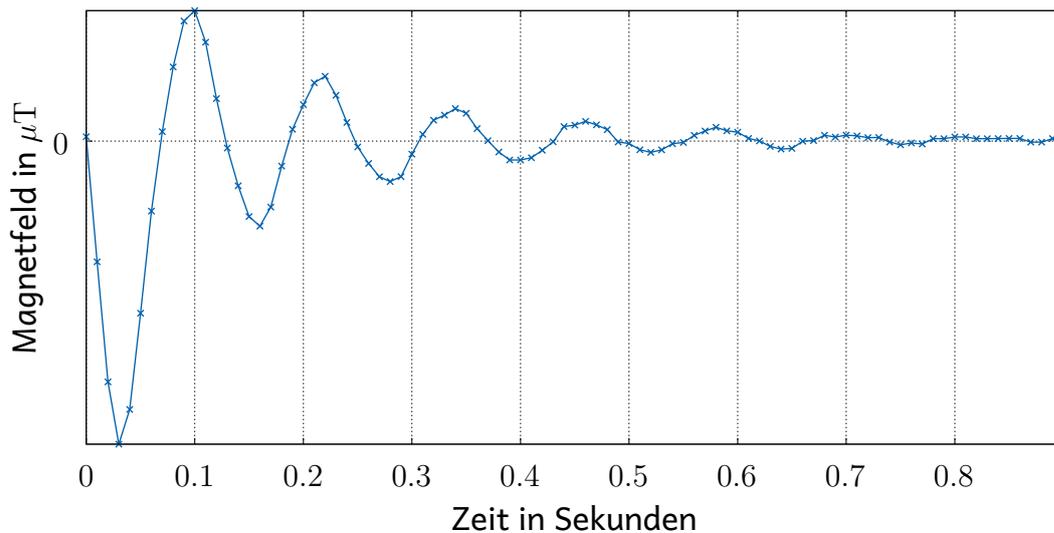
Hinweis(e) zum Einscannen



In diesem Experiment sollst du den Graphen einer magnetischen Schwingung reproduzieren..

Aufgabe 1

Baue eine elektrische Schaltung auf, an der du den unten gezeigten Graphen reproduzieren kannst. Notiere vorher, welche Parameter des Graphen entscheidend sind.



Hinweis(e) zum Einscannen



In diesem Experiment sollst du einen Schwingkreis aufbauen und dafür eine Recherche durchführen.

Aufgabe 1

Baue einen elektromagnetischen Schwingkreis auf. Du kannst die Quelle für den Bauplan selber wählen (zum Beispiel dein Physikbuch oder das Internet). Passende Materialien wurden bereit gelegt.

Zusatz-Aufgabe

Mit dem Smartphone kannst du die Schwingung messen. Stelle eine Hypothese auf, wie diese Schwingung aussieht.

Aufgabe 2

Miss die Schwingung des Schwingkreises und fertige eine Skizze der Messung an.

Hinweis(e) zum Einscannen



Zusatz-Aufgabe

Kannst du deine Hypothese bestätigen? Warum?

Nachdem du einen Schwingkreis aufgebaut hast, sollst du nun die Abläufe innerhalb des Schwingkreises mithilfe einer Recherche erklären.

Aufgabe 1

Beschreibe die Funktionsweise des elektromagnetischen Schwingkreises in eigenen Worten. Um eine Erklärung zu finden, kannst du eine beliebige Quelle auswählen. Notiere das Ergebnis unten.

Hinweis(e) zum Einscannen



Nachdem du einen Schwingkreis aufgebaut hast, sollst du nun die Abläufe innerhalb des Schwingkreises analog zur mechanischen Schwingung erklären.

Aufgabe 1

Beschreibe die Funktionsweise des elektromagnetischen Schwingkreises in eigenen Worten. Vergleiche sie dazu mit der Schwingung eines Federpendels.

Hinweis

Die folgende Tabelle zum Ausfüllen kann dir bei der Lösung helfen:

Federpendel	Schwingkreis
Die Gesamtenergie setzt sich aus Spannenergie und kinetischer Energie zusammen.	
Die Feder speichert die Spannenergie.	Der Kondensator speichert die elektrische Energie.
Durch die Bewegung besitzt der Pendelkörper kinetische Energie.	
Durch das Spannen der Feder wird die nötige Energie für die Schwingung von außen zugeführt.	
Der Pendelkörper schwingt aufgrund seiner Trägheit über die Ruhelage hinaus, die Feder wird gespannt und gestaucht.	



Nachdem du einen Schwingkreis aufgebaut und anschließend die Funktionsweise erklärt hast, sollst du nun etwas über die Eigenschaften herausfinden.

Aufgabe 1

Untersuche die Eigenschaften eines Schwingkreises und bestimme deren Parameter. Notiere welche Eigenschaften du untersuchen möchtest und notiere nach dem Untersuchen die Parameter der Eigenschaften.

Hinweis(e) zum Einscannen



Nachdem du einen Schwingkreis aufgebaut und anschließend die Funktionsweise erklärt hast, sollst du nun etwas über die Eigenschaften herausfinden und den Schwingkreis mit vorhandenen Materialien optimieren.

Aufgabe 1

Optimiere den Schwingkreis. Schreibe vorher auf, an welchen Stellen du den Schwingkreis optimieren möchtest.



Zusatz-Aufgabe

Recherchiere die Formel für die Frequenz der Schwingung und vergleiche sie mit den aufgenommenen Werten. Gibt es einen Unterschied und, wenn ja, warum?

Zum Schluss kannst du die Differentialgleichung der Schwingung aufstellen und lösen. Damit hast du die mathematische Lösung des Schwingkreises gefunden.

Aufgabe 1

Stelle die Differentialgleichung für den elektromagnetischen Schwingkreis ohne Widerstand auf und löse sie.

Hinweis(e) zum Einscannen



Hinweis(e) zum Einscannen



Zum Schluss kannst du die aufgenommenen Messdaten mit den Angaben der Bauteile vergleichen.

Aufgabe 1

Die Formel für das Magnetfeld einer Spule bei der Schwingung des Schwingkreises ist (Der Schwingkreis wird bei dieser Formel durch einen Widerstand R gedämpft):

$$B(t) = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

R ist der Widerstand in Ω , L die Induktivität der Spule in H und C die Kapazität des Kondensators in F. A ist die Amplitude der Schwingung und kann nicht angegeben werden.

Führe eine Messung durch und vergleiche die theoretischen Werte von ω und β mit denen, die sich aus der Messung ergeben. Notiere deine Ergebnisse.

Zusatz-Aufgabe

Woran könnte die Abweichung der gemessenen Werte im Vergleich zu den theoretischen Werten liegen?