

Bezüge zum KLP

Inhaltsfeld 3 Elektrodynamik

UMGANG MIT FACHWISSEN

Die Schülerinnen und Schüler

- zeigen den Einfluss und die Anwendung physikalischer Grundlagen in Lebenswelt und Technik am Beispiel der Bereitstellung und Weiterleitung elektrischer Energie auf (UF4),
- führen Induktionserscheinungen an einer Leiterschleife auf die beiden grundlegenden Ursachen „zeitlich veränderliches Magnetfeld“ bzw. „zeitlich veränderliche (effektive) Fläche“ zurück (UF3 ,UF4),
- ermitteln die Übersetzungsverhältnisse von Spannung und Stromstärke beim Transformator (UF1, UF2).

ERKENNTNISGEWINNUNG

Die Schülerinnen und Schüler

- geben Parameter von Transformatoren zur gezielten Veränderung einer elektrischen Wechselspannung an (E4),
- werten Messdaten, die mit einem Oszilloskop bzw. mit einem Messwerterfassungssystem gewonnen wurden, im Hinblick auf Zeiten, Frequenzen und Spannungen aus (E2, E5).

KOMMUNIKATION

Die Schülerinnen und Schüler können

- physikalische Aussagen und Behauptungen mit sachlich fundierten und überzeugenden Argumenten begründen bzw. kritisieren (K4).

Demonstrationsexperiment

Mit Hilfe eines Demonstrationsexperiments (vgl. Abbildung 1) kann die Messung aus Abbildung 2 der Aufgabenstellung qualitativ nachgestellt werden. Benötigt werden hierfür:

- 1 Funktionsgenerator, der möglichst „saubere“ sinus-Spannungssignale liefert
- 1 steuerbare Stromquelle
- 1 Digitalspeicheroszilloskop oder ein Zweikanal-Messwerterfassungssystem, ersatzweise evtl. ein „schneller“ (Zweikanal-) t-y-Schreiber
- 1 Mikrovoltverstärker
- 1 Feldspule
- 1 Sekundärspule
- 1 Eisenkern (passend zu Feld und Sekundärspule)
- diverse Laborkabel und ggf. BNC-4-mm-Kupplungen

In der vorliegenden Messung wurde auf eine direkte Messung der Magnetfeldstärke (z.B. durch den Einsatz einer Hallsonde) verzichtet und statt dessen die Stromstärke I durch die Feldspule als Maß für die magnetische Feldstärke B genutzt.

Versuchsdurchführung

- Die Schülerinnen und Schüler erhalten die Gelegenheit den Versuchsaufbau und -wenn vorhanden- die elektrische Zahnbürste zu betrachten. Die Lehrkraft benennt die verbauten Geräte(-gruppen) und zeigt die Analogien zwischen Experimentier-Anordnung und Ladestation auf.
- Die beiden Signale für $I_{spule}(t) \sim B_{spule}(t)$ und $U_{ind}(t)$ werden mit der Versuchsanordnung registriert.
- Die Kanäle werden abwechselnd aus- und eingeblendet, so dass nur ein Signal zu sehen ist; die Lehrkraft benennt die jeweiligen Graphen mit $I_{spule}(t) \sim B_{spule}(t)$ bzw. mit $U_{ind}(t)$.
- Wenn möglich (z.B. mit Cassy-Lab) wird die zeitliche Änderung $\dot{I}_{Spule}(t) \sim \dot{B}_{Spule}(t)$ berechnet und ebenfalls mit in das Diagramm aufgetragen.

Bezüglich der Versuchsdurchführung sind die Vorgaben der RISU zu beachten.

Film

Die Aufgabenstellung (vgl. Aufgabe 1.3) beinhaltet das Vorführen eines kurzen Films aus dem Internet. Dieser Film sollte den Schülerinnen und Schülern vor Beginn der Klausur 2-3 Mal vorgespielt werden. Die SchülerInnen und Schüler schauen den Film unter der *bekanntesten Aufgabenstellung* an und können sich ggf. auf einem Schmierblatt Notizen machen.

Die ausgewiesene Arbeitszeit beginnt erst im Anschluss an das Demonstrationsexperiment und/oder der Vorführung des Films.

Aufgabe 1 (Elektrische Zahnbürste)

Anordnungen zur Übertragung elektrischer Energie beinhalten meistens Metallkontakte, an welche z.B. Kabel als elektrische Leitungen angeschlossen werden. In bestimmten Anwendungen, wie z.B. Elektrozahnbürsten o.Ä., ist dies jedoch unpraktikabel, da Metallkontakte durch Verunreinigungen unbrauchbar werden können. Hier sind die elektromagnetischen Eigenschaften von Strom durchflossenen Spulen nützlich. Das Kernstück der Ladestation einer elektrischen Zahnbürste besteht aus zwei Spulen, die auf einen gemeinsamen Eisenkern gesteckt werden (vgl. Abbildung 1).

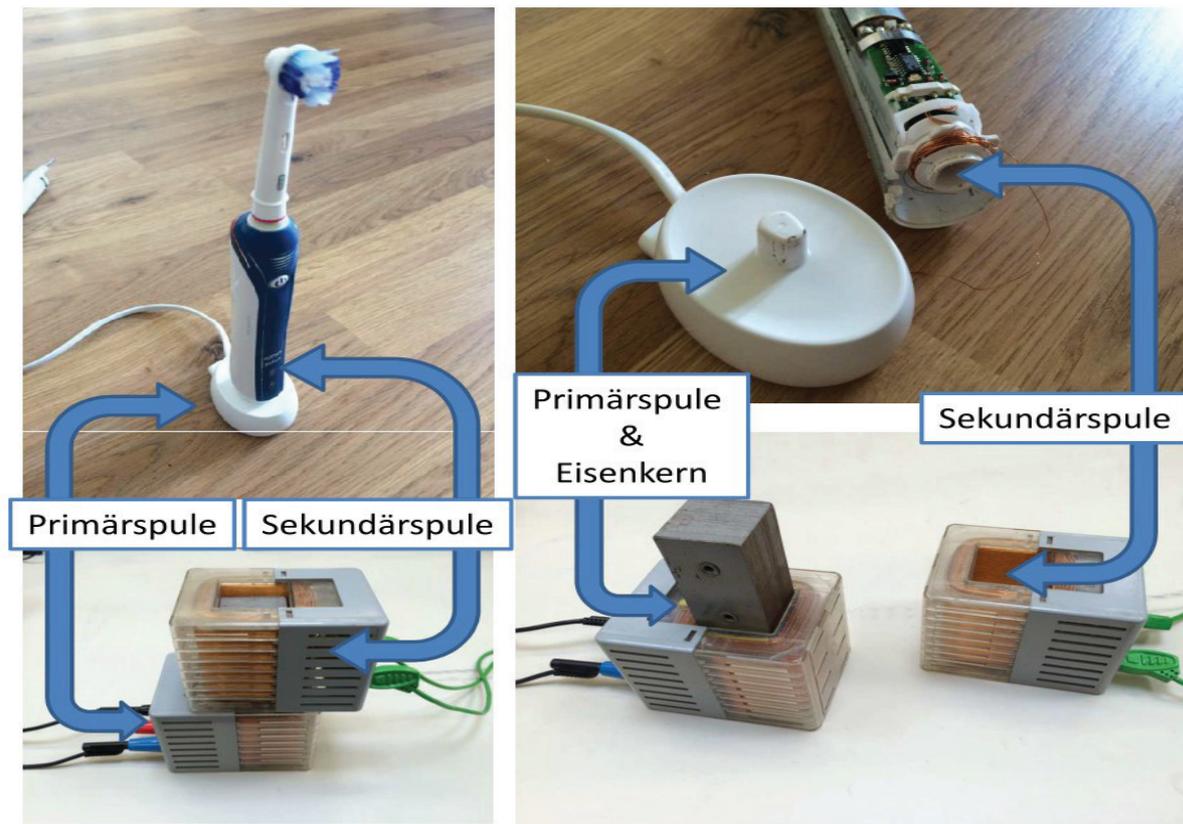


Abbildung 1: In dem linken Bild (oben) sieht man eine Ladestation mit der dazugehörigen Zahnbürste. Diese wurde an der Unterseite geöffnet, um die in der Zahnbürste selbst untergebrachte Sekundärspule sichtbar zu machen, wie das rechte Bild (oben) zeigt. Die Primärspule mit dem Eisenkern liegt nicht sichtbar in der Ladestation und wird mit Hilfe der Netzleitung versorgt. Der in der Zahnbürste untergebrachte Akku ist ebenfalls nicht sichtbar; er spielt für diese Aufgabe keine Rolle. In den unteren Bildern ist eine Experimentier-Anordnung aus zwei Spulen mit Eisenkern dargestellt, die dem Prinzip der Vorrichtung entspricht. Die Doppelpfeile bringen die entsprechenden Spulen in Beziehung.

- 1.1 Geben Sie eine mathematische Formulierung des Induktionsgesetzes (in allgemeiner Form) an und erläutern Sie die in der Formel vorkommenden physikalischen Größen.

Das allgemeine Induktionsgesetz lautet:

$$U_{ind} = -N \cdot \dot{\Phi} \quad , \text{ wobei } \begin{array}{l} U_{ind}: \text{ Induzierte Spannung} \\ N: \text{ Anzahl der Windungen} \\ \dot{\Phi}: \text{ Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses.} \end{array}$$

- 1.2 Beschreiben Sie zwei (prinzipiell) unterschiedliche Prozesse, durch die Induktionsspannungen erzeugt werden können, und geben Sie dazu jeweils ein (einfaches) Beispiel an.

Wenn B die magnetische Feldstärke und A die vom Magnetfeld senkrecht durchsetzte Fläche beschreibt, dann gilt:

$$\dot{\Phi} = (\dot{A} \cdot B) = \dot{A} \cdot B + A \cdot \dot{B} \quad .$$

Es wird immer eine Spannung induziert, wenn sich der magnetische Fluss mit der Zeit ändert, d.h. wenn sich die magnetische Feldstärke oder die senkrecht vom Feld durchsetzte Fläche mit der Zeit ändert.

Beispiele (individuell), z.B.:

Induktion durch B -Feld-Änderung → Transformator
 Induktion durch Flächenänderung → Dynamo, Generator

- 1.3 In dem gezeigten Video aus der Sendung „Kopfball“ soll die Funktionsweise der Ladevorrichtung einer elektrischen Zahnbürste erklärt werden. In dieser Erklärung finden sich jedoch einige grundlegende physikalische Fehler und/oder Ungenauigkeiten. (vgl. <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2010/1017/stromuebertragung.jsp>)

Benennen Sie einen Fehler oder eine Ungenauigkeit aus dem Video und erklären Sie den von Ihnen benannten Sachverhalt physikalisch korrekt.

Beispielhaft ist hier ein Fehler und eine Ungenauigkeit benannt:

- 1) FALSCH: Es wird kein Strom übertragen!
 RICHTIG: Es wird Energie übertragen, bzw. Spannung induziert.
- 2) UNGENAU: Beim zweiten Experiment fehlt ein Hinweis, dass das Experiment nur bei angelegter Wechselspannung funktioniert.
 GENAU: Durch das Anlegen einer Wechselspannung an die Feldspule wird ein sich mit der Zeit änderndes Magnetfeld erzeugt. Diese Feld durchsetzt auch die Induktionsspule. Daher wird an den Enden der Induktionsspule eine Spannung induziert (Induktion durch B -Feld-Änderung).

Mit Hilfe der Experimentieranordnung wurde ein Modell für die Ladevorrichtung der elektrischen Zahnbürste aufgebaut. Gehen Sie bei der Bearbeitung der folgenden Aufgabe davon aus, dass die Stärke B des Magnetfeldes einen sinusförmigen Verlauf hat. Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 2 dargestellt.

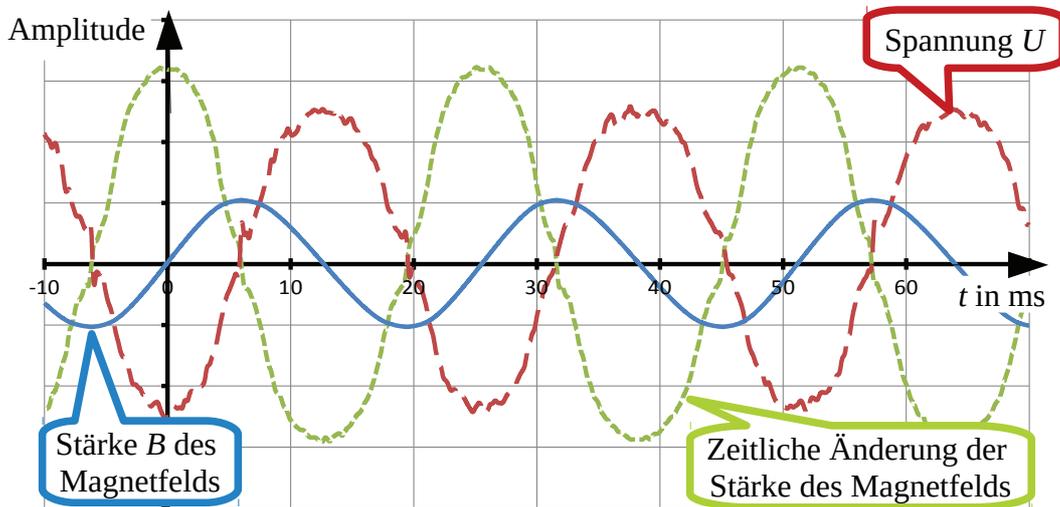


Abbildung 2: Ergebnisse der Messungen an der Sekundärspule. Die drei gemessenen Größen werden in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt, um die zeitlichen Zusammenhänge erkennbar zu machen.

- 1.4 Erläutern Sie, wie die gemessene Spannung zwischen den Anschlüssen der Sekundärspule entsteht und erklären Sie den Verlauf der Graphen in Abbildung 2 jeweils mit Bezug auf das allgemeine Induktionsgesetz.

Geben Sie für diesen Versuch einen allgemeinen Funktionsterm für die Stärke des $B(t)$ des Magnetfeldes an und leiten Sie, ausgehend vom allgemeinen Induktionsgesetz, daraus den Term

$$U_{ind}(t) = -N \cdot A_0 \cdot B_0 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

für die Zeit-Induktionsspannungs-Funktion her und erklären Sie die Bedeutung der enthaltenen Variablen und Konstanten. Gehen Sie bei der Herleitung vereinfachend davon aus, dass $B(0)=0$ ist.

Bei der Anordnung aus zwei Spulen mit Eisenkern handelt es sich um einen Transformator. Dabei wird die Primärspule, die sich in der Ladestation befindet, an eine Wechselspannung angeschlossen. Dadurch entsteht um die Spule ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld. Dieses ruft in der Sekundärspule, die sich in der Zahnbürste befindet, eine Induktionsspannung hervor.

Das diesem Vorgang zugrunde liegende Gesetz ist das Induktionsgesetz: Eine Induktionsspannung entsteht, wenn sich der magnetische Fluss zeitlich ändert (vgl. Aufgabe 1.2).

In der Aufgabe ist die Fläche A konstant, d.h. $\dot{A}=0$ und somit folgt für die Induktionsspannung:

$$U_{ind} = -N \cdot A \cdot \dot{B} \quad ,$$

d.h. $U_{ind} \sim \dot{B} \quad .$

Betrachtet man den Graphen der Abbildung 2 aus der Aufgabenstellung, so ist die Stärke B des Magnetfeldes periodisch. An ihren Extremstellen nimmt ihre zeitliche Ableitung den Wert 0 an und an ihren Nullstellen ist die zeitliche Ableitung extremal. Den gleichen Verlauf wie die zeitliche Ableitung zeigt auch die Induktionsspannung U_{ind} , da $U_{ind} \propto \dot{B}$. Das umgekehrte Vorzeichen wird durch das Lenz'sche Gesetz begründet, die Induktionsspannung wirkt ihrer Ursache entgegen.

Auf der Basis des gegebenen Hinweises ergibt sich für die gesuchte Funktion:

$$B(t) = B_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

Für den hier vorliegenden Fall reduziert sich das allgemeine Induktionsgesetz (vgl. oben) zu:

$$U_{ind} = -N \cdot A \cdot \dot{B}$$

Mit $\dot{B}(t) = B_0 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$ und $A = A_0$ ergibt sich die gesuchte Formel:

$$U_{ind}(t) = -N \cdot A_0 \cdot B_0 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

wobei U_{ind} : an den Ender der Induktionsspule induzierte Spannung,
 N : Windungszahl der Induktionsspule,
 A_0 : senkrecht vom B -Feld durchsetzte Fläche,
 B_0 : maximale Stärke des B -Feldes,
 T : Periodendauer.

- 1.5 Durch elektronisch gesteuerte Bauteile wird die Netzspannung bereits in den Netzteilen herunter transformiert. Für die elektrische Zahnbürste gilt also am Netzteil 10V/5A und 600 Windungen, der in der Zahnbürste enthaltene Akku ist für 1,2V ausgelegt.

Bestimmen Sie die Windungszahl der Sekundärspule in der Zahnbürste.

Es gilt: $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$, wobei N_1 und U_1 Windungszahl der Primärspule (Feldspule),

N_2 und U_2 Windungszahl der Sekundärspule (Induktionsspule).

Somit folgt für die Windungszahl N_2 der Sekundärspule:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 600 \cdot \frac{1,2V}{10V} = 72$$

- 1.6 Wenn man keinen sinusförmigen elektrischen Strom in der Primärspule verwendet, kann man ein Messergebnis wie in Abbildung 3 erhalten.

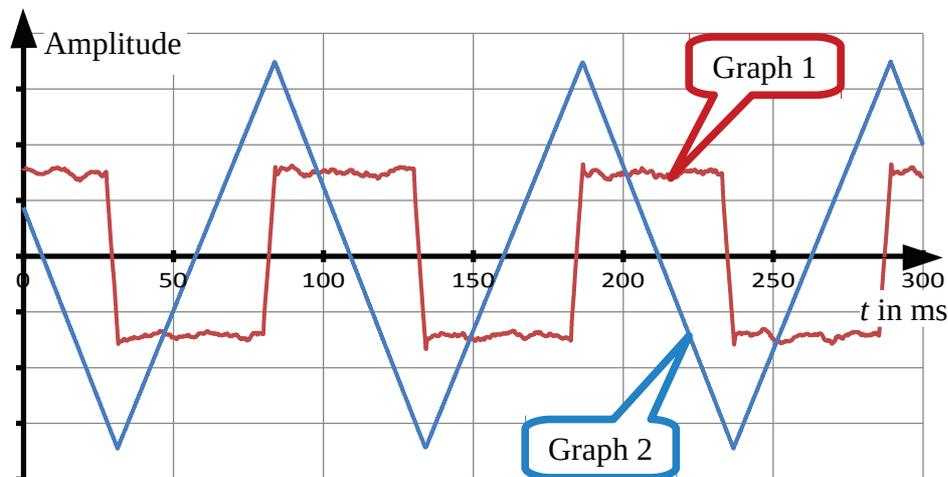


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf von Magnetfeldstärke B in der Primärspule und Spannung U an der Sekundärspule in einem gemeinsamen Koordinatensystem.

Begründen Sie, welcher der beiden Graphen die Stärke B des Magnetfeldes und welcher die Spannung U an der Sekundärspule darstellt, indem Sie den Begriff Steigung verwenden.

Aus Teilaufgabe 1.4 ist bekannt, dass $U_{ind} \sim -\dot{B}$, d.h. die Spannung ist proportional zur Ableitung der negativen Stärke B des Magnetfeldes. Ist also die Steigung der Magnetfeldstärke B linear, so ist die Induktionsspannung konstant. Das negative Vorzeichen führt bei einem Anstieg von B zu einer negativen Induktionsspannung und bei einem Abfall von B zu einer positiven Induktionsspannung.

Vergleicht man diesen Sachverhalt mit der Abbildung 3 der Aufgabenstellung, so erkennt man, dass Graph 2 die Stärke B des Magnetfeldes und Graph 1 die Induktionsspannung darstellt.

- 1.7 In Europa, Asien, Australien, den Großteil von Afrika und Teilen von Südamerika wird für das allgemeine Stromnetz, in sogenannten Verbundnetzen, eine Netzfrequenz von 50 Hz verwendet. In Nordamerika verwendet man im öffentlichen Stromnetz eine Netzfrequenz von 60 Hz.

Diskutieren Sie, welche Auswirkungen es für eine Ladestation haben könnte, wenn man diese zugleich in Deutschland und in den USA einsetzen möchte.

Eine höhere Frequenz der Wechselspannung führt zu einem schnelleren Anstieg der Magnetfeldstärke. Aufgrund der Proportionalität $U_{ind} \sim -\dot{B}$ ist auch die Induktionsspannung größer.

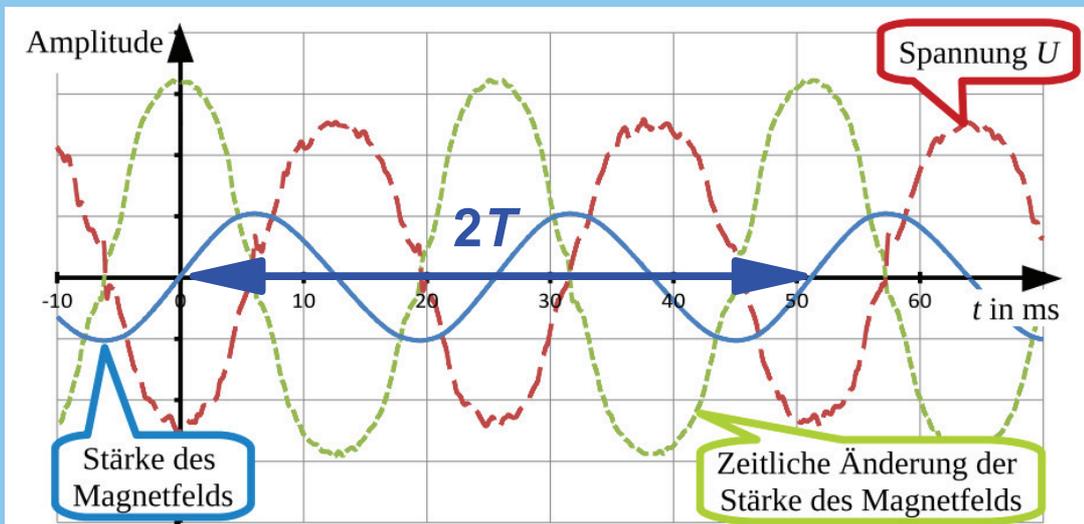
Oder genauer: Nach Teilaufgabe 1.4 gilt $U_{ind}(t) = -N \cdot A_0 \cdot B_0 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$, d.h. die

Amplitude \hat{U} der Spannung ist proportional zur Frequenz. Würde man die obige Ladestation in Amerika einsetzen ergäbe sich somit in an der Sekundärspule eine

Scheitelwert der Spannung von $\hat{U} = \frac{60}{50} \cdot 1,2V = 1,44V$.

Da es sich hierbei nur um den Scheitelwert der Spannung handelt, kann die Ladestation bedenkenlos auch in den USA eingesetzt werden.

Bestimmen Sie anhand der Daten aus Abbildung 2, welche Frequenz in der dort untersuchten Ladestation verwendet wurde.



Aus dem Diagramm ist zu entnehmen:

$$2 \cdot T = 51 \text{ ms}$$

Somit folgt für die Frequenz:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{25,5 \text{ ms}} \approx 39 \text{ Hz}$$