

Freiherr-vom-Stein-Gymnasium Münster
Schuljahr 2022/23

Der Generator – Energieumwandlung durch Induktion:

Die Untersuchung naturwissenschaftlicher Phänomene
unter energetischen Aspekten



Projektarbeit im Projektkurs Naturwissenschaften

Herr Friedrich, Herr Kettner

Von

Emil Schwer

Sensible Daten wurden geschwärzt.
Fremdabbildungen werden als
wissenschaftliches Bildzitat verwendet, deren
Quelle entsprechend referenziert ist.

Inhaltsverzeichnis

1. Die Wahl des Themas	3
2. Prinzipien und geschichtliche Hintergründe	4
2.1. Was ist ein Generator?	4
2.2. Die Geschichte der elektromagnetischen Induktion und des Generators	5
2.3. Die elektromagnetische Induktion	7
Das Faraday'sche Induktionsgesetz.....	7
Induktion durch Bewegung einer Leiterschleife	8
Induktion durch Drehen einer Leiterschleife	11
Induktion durch Verformung einer Leiterschleife.....	12
Induktion durch Magnetfeldveränderung	12
Die Lenz'sche Regel	14
Wie lässt sich die Induktionswirkung verstärken?.....	15
3. Von Wechselstrom zu Gleichstrom	16
4. Der Dreiphasengenerator	17
5. Untersuchung der Induktionsgesetze	19
5.1. Aufbau und Durchführung.....	19
5.2. Auswertung	21
Ändern der Spulenlänge	26
6. Untersuchung von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld.....	30
6.1. Aufbau und Durchführung.....	30
6.2. Auswertung	31
7. Bau des Generators	32
7.1. Vorbereitungen	32
7.2. Die Konstruktion des Generators	34
Die Konstruktion der Rotorplatten und des Stators.....	34
Die Konstruktion der Spulen.....	38
Die Montage auf der Basisplatte	40
Die Verlötung	41
7.3. Verbesserungen und endgültige Fertigstellung	43
8. Bau des Generators: Auswertung.....	45
8.1. Fehlerbehebung und Durchführung von Messungen	45
9. Diskussion.....	48
10. Literaturverzeichnis.....	50
11. Abbildungsverzeichnis	51

1. Die Wahl des Themas

Wir – als Schüler der Jahrgangsstufe Q1 des Freiherr-vom-Stein-Gymnasiums in Münster-Gievenbeck – hatten die Möglichkeit zugestellt bekommen, an einem naturwissenschaftlichen Projektkurs teilzunehmen und ein von uns individuell ausgewähltes Thema zu bearbeiten. Dies erweckte in uns ein Interesse und wir nahmen die höhere Anzahl der Wochenstunden in Kauf, um an unserer eigenen Idee zu arbeiten und zu forschen. Zu Beginn des Jahrgangs kamen wir in eine Art Ideenphase, in welcher wir verschiedenste – sowohl realisierbare als auch unrealisierbare – Ansätze entwickelten und unseren Ideen freien Lauf ließen. Da wir planten, ein Projekt mit Sicherheit umzusetzen und nicht vor zu große Herausforderungen gestellt zu werden, haben wir uns überlegt, welche Ansätze für uns als Schüler umsetzbar wären. Uns war bereits klar, dass wir in irgendeiner Art und Weise Energie erzeugen wollten. Unsere erste Idee war die Energiegewinnung durch Algen in einem Wassertank. Da dieses Projekt womöglich zu kostenintensiv und zu umständlich durchzuführen gewesen wäre und wir bereits aus dem Physik-Leistungskurs ein fokussiertes physikalisches Interesse mitbrachten, haben wir uns dazu entschieden, die Erzeugung von Energie durch eine andere Form zu realisieren. Wir entschieden uns mithilfe von mechanischen Einwirkungen und der Induktion einen eigenen Generator zu konstruieren. Da ein Generator in einem sehr weiten Spektrum Anwendung findet und in der Energiegewinnung eine sehr wichtige Rolle übernimmt, müsste die Forschung in den Gebieten bereits weit fortgeschritten sein und uns als Schüler ein sehr lehrreiches Thema anbieten. Andere modernere Ansätze – wie die Energiegewinnung durch Algen – hätten unsere eigene Erforschung wohl eher gehemmt als gefördert. Da wir nun bereits eine Idee hatten, wohin wir unser Projekt ausrichten wollten und wir wussten, dass wir einen eigenen Generator bauen wollten, haben wir folglich diese Ansätze mit unserer Lehrkraft abgesprochen und in Folge einer Bestätigung mit der Umsetzung des Projektes gestartet. Da wir uns jedoch nicht nur auf die Konstruktion eines Generators verlassen sollten und unser Projekt nicht allein von dieser abhängig machen sollten, wurden uns noch zu bearbeitende Grundversuche zur Induktion vorgelegt. Als Schüler sind wir nicht dazu im Stande, das Thema der Induktion bis ins kleinste Detail zu bearbeiten. Trotzdem konnten wir uns mit wichtigen Themengebieten befassen, darunter das Klären der Induktionsgesetze und das Durchführen von Experimenten zur

Auswirkung auf die Induktionsspannung bei unterschiedlichsten Leitereigenschaften und das Verbessern der Induktionswirkung durch das Einführen eines ferromagnetischen Stoffes in das Magnetfeld einer Spule. Zudem haben wir auch mit unserem Generator einen Versuch zur Verstärkung der Induktionswirkung durchführen können. Ziel der Arbeit ist es, die Grundprinzipien der Induktion genauer zu veranschaulichen, mit eigenen Ansätzen weiter auszuführen und unser – über den Projektkurs hinweg – gesammeltes Wissen wiederzugeben. Die von uns angestrebte Ausgangslage war, einen funktionierenden Generator zu haben und damit eine Menge Erfahrung zu sammeln. Im Folgenden werden theoretische Ansätze genauer erläutert und wichtige Gesetzmäßigkeiten erklärt. Im Anschluss werden die darauf basierenden Versuchsdurchführungen und die Konstruktion unseres Generators beschrieben. Abschließend werden Probleme und Verbesserungsansätze aufgezählt.

2. Prinzipien und geschichtliche Hintergründe

2.1. Was ist ein Generator?

Generatoren spielen heutzutage eine sehr große Rolle für unser Energieversorgungsnetz. Sie sind in der Lage, kinetische in elektrische Energie durch das Verfahren der Induktion umzuwandeln. Sie ähneln dabei in ihrem Prinzip sehr dem Prinzip des Elektromotors. Beruhen tun Generatoren meistens auf dem Rotationsprinzip, bei welcher eine Drehbewegung die Antriebskraft ausmacht.

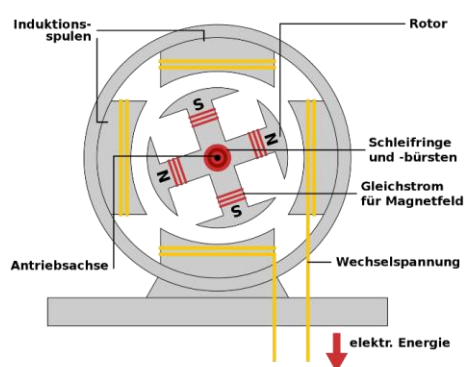


Abbildung 1: Drehstromgenerator

Neben dem Drehstromgenerator findet noch der Lineargenerator Verwendung. Bei diesem wird elektrische Energie durch Aufwenden einer geradlinigen Bewegung eine Bewegungsenergie erzeugt. Dabei wird durch eine Schüttelbewegung ein Magnet durch zwei Spulen abwechselnd durchgeführt. Verwendet wird der Lineargenerator beispielsweise in Schüttel-Taschenlampen. Der sog.

Gleichstromgenerator, welcher heutzutage nicht mehr gebräuchlich ist, funktionierte mit der Umpolung der Magneten, um so einen Gleichstrom zu erzeugen. Anderweitig können resultierende Wechselströme durch Gleichrichterioden oder Kommutatoren in Gleichströme umgewandelt werden. Kommutatoren werden direkt in die Drehbewegung mit eingebracht und sorgen für die Umkehrung des Stromflusses der Spulen bei Annäherung des Nordpols des Stators mit dem Südpol des Rotors. Aus dieser Umpolung resultiert somit ein Gleichstrom. Grundlegend basieren alle Generatoren auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion (Wikipedia 2023; Leifiphysik 2023c). Das Induzieren eines Stromes wird entweder durch eine Magnetfeldänderung oder durch eine Änderung der von einem Magnetfeld umfassten Fläche einer Leiterschleife erzielt. Um eine Flächenänderung einer Leiterschleife zu erzielen, muss diese entweder in ein Magnetfeld hinein oder aus einem Magnetfeld heraus bewegt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, diese Leiterschleife zu verformen oder in eine Drehbewegung zu versetzen, solange sich die vom Magnetfeld beeinflusste Fläche ändert. Bei einem Generator stellt sich neben dem Bewegen der Leiterschleifen bzw. der Spulen auch die Bewegung der Magneten als weitere Möglichkeit zur Induktion eines Stromes auf. So kommt es zur Magnetfeldänderung, indem die Magneten an den Spulen häufig in Form einer Drehbewegung vorbei bewegt werden (Lernhelfer 2023a; Leifiphysik 2023a). In der Regel wird ein Drehstromgenerator in einen Stator sowie Rotor unterteilt. Unter einem Stator versteht man einen unbeweglichen Teil eines Generators oder Elektromotors. Der Rotor ist dabei der Gegenspieler des Stators und macht somit eine sich bewegende Komponente eines Generators oder Elektromotors aus (Teprosa 2023).

2.2. Die Geschichte der elektromagnetischen Induktion und des Generators

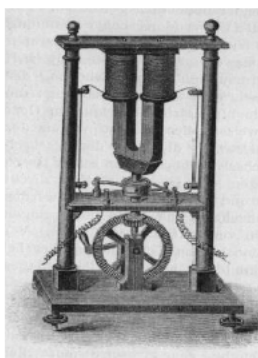


Abbildung 2:
Wechselstromerzeuger
- Pixii

Der ursprüngliche Ansatz, dass Elektrizität und Magnetismus zusammenhängen, stammt von dem dänischen Physiker Hans Christian Oersted. Dieser bemerkte im Jahr 1820 durch einen Versuch mit einer Magnethöhle, dass diese in der Nähe eines elektrischen Leiters abgelenkt wird. Dieser Versuch wurde demzufolge von den Wissenschaftlern Andre-Marie Ampere und Michael Faraday weiter ausgeführt, wobei Faraday im Jahr 1831 zunächst die elektrische Induktion beobachtete und durch mechanische

Bewegungen eines magnetfeldtragenden Körpers an einem Leiter Induktionsspannungen erzeugte. Er führte weitere Grundversuche zur Induktion durch und konstruierte bereits eine Art ersten elektrischen Generator (Lernhelfer 2023b). Der erste bekannte Wechselstromerzeuger wurde 1832 von Antoine-Hippolyte Pixii konstruiert. Pixii verwendete dafür zwei fixierte Spulen, unter welchen ein Hufeisenmagnet mithilfe einer Kurbel in eine Drehbewegung versetzt wurde. Der resultierende Wechselstrom wurde anschließend mithilfe eines Kommutators gleichgerichtet. Im gleichen Jahr wurde von dem Experimentalphysiker Michael Faraday eine Unipolarmaschine konstruiert. Diese war dazu in der Lage, direkt einen Gleichstrom zu erzeugen. Neben Hippolyte Pixii und Michael Faraday hat auch im Jahr 1832 der italienische Physiker Salvatore Dal Negro einen Schwingapparat gebaut und hat somit auf das Rotationsprinzip verzichtet. Zum ersten Mal in der Industrie wurden Wechselstromgeneratoren in dem Jahr 1849 von der Gesellschaft Alliance nach der Idee von Floris Nollet aus Brüssel eingesetzt. Sie sollten vorerst der Gewinnung von Leuchtgas – durch die elektrochemische Zerlegung von Wasser – dienen, wurden jedoch vorerst hauptsächlich für das Betreiben von Bogenlampen in englischen und französischen Leuchttürmen verwendet. Der deutsche Erfinder und Elektroingenieur Werner von Siemens entdeckte 1866 zeitgleich mit dem britischen Elektrotechniker Samuel Alfred Varley und dem britischen Physiker Charles Wheatstone das dynamoelektrische Prinzip. Im Jahr 1878 wurde dieses Prinzip erstmals durch das deutsche Elektrizitätsunternehmen Schuckert & Co. mithilfe von 24 – von Dampfmaschinen betriebenen – Generatoren in Form eines fest installierten Kraftwerks umgesetzt. Nach der Vorführung von Wechselstrommaschinen auf der Frankfurter internationalen Elektrotechnischen Ausstellung im Jahr 1891 wurde bereits im Jahr darauf das erste Zweiphasen-Kraftwerk in der Stadt Weiz in Österreich in Betrieb gesetzt. Heutzutage sind Generatoren für die Energiegewinnung nicht mehr wegzudenken und finden unter anderem in den Bereichen Wind- und Wasserkraft Verwendung (Wikipedia 2023; RP-Energie-Lexikon 2023a).

2.3. Die elektromagnetische Induktion

Das Faraday'sche Induktionsgesetz

Bei dem Faraday'schen Induktionsgesetz ist der Magnetische Fluss von besonderer Bedeutung. Dieser beschreibt ein Maß für das Magnetfeld, das in einer Induktionsanordnung die Leiterschleife durchsetzt und setzt sich aus folgender Formel zusammen:

$$\Phi = B \cdot A$$

B gibt hier die magnetische Flussdichte und A die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche des Leiters an. Zudem steht der Magnetische Fluss Φ in direktem Zusammenhang mit der Formel für die Induktionsspannung:

$$U_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Führt man diese Formel weiter aus, erhält man:

$$U_{ind} = -B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} - A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Es zeigt sich also, dass für die Erzeugung einer Induktionsspannung eine Änderung des Magnetischen Flusses stattfinden muss. Die Bedeutung des negativen Vorzeichens wird im späteren Verlauf genauer erläutert. Beim weiteren Ausführen der Formel ergibt sich für die Induktionsspannung beim Konstanthalten von A die Formel:

$$U_{ind} = -A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Beim Konstanthalten von B ergibt sich wiederum die Formel bei Änderung des Flächeninhalts:

$$U_{ind} = -B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Des Weiteren gilt bei der Änderung der Winkelweite die Formel:

$$U_{ind} = B \cdot A \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \sin(\varphi)$$

Handelt es sich nun um eine Spule, bei welcher mehrere Windungen zu berücksichtigen sind, so werden die Windungszahlen durch den Vorfaktor N angegeben. Für eine Spule mit N Windungen gilt also die Formel:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Man erhält somit auch:

$$U_{ind} = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} - N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

(Leifiphysik 2023b)

Induktion durch Bewegung einer Leiterschleife

Die Wirkung der Induktion lässt sich unter anderem durch die Bewegung eines Leiters durch ein Magnetfeld hervorrufen. Beim Bewegen eines Leiters senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes lässt sich mithilfe der Linken-Hand-Regel eine Wirkung der Lorentzkraft feststellen, welche die Elektronen in dem Leiter nach unten verschiebt. In diesem Beispiel wird der Leiter nach rechts bewegt und die Feldlinien des Magnetfeldes zeigen in die Ebene hinein.

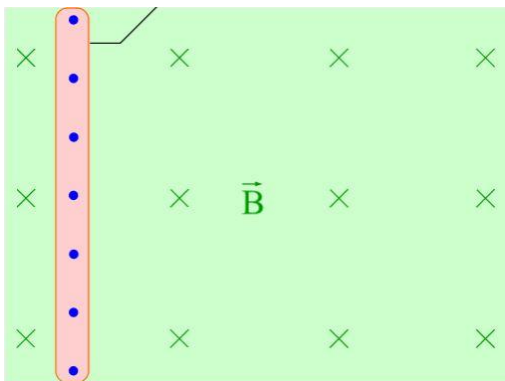


Abbildung 3: Bewegter Leiter im B-Feld

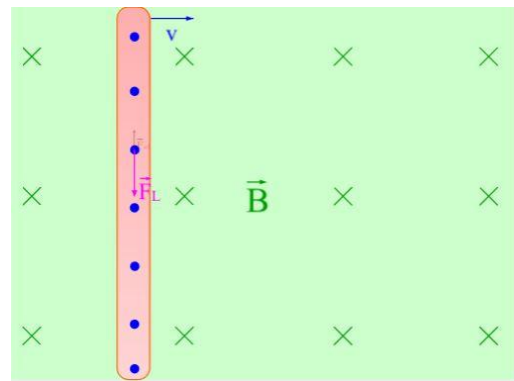


Abbildung 4: Lorentzkraft wirkt auf Elektronen

Die Verschiebung der Elektronen führt schlussendlich dazu, dass sich am oberen Ende des Leiters ein Elektronenmangel und am unteren Ende des Leiters ein Elektronenüberschuss bilden. Aus dem Elektronenüberschuss resultiert somit eine elektrische Kraft, welche entgegen der Lorentzkraft wirkt. Bei Halten einer gleichmäßigen Geschwindigkeit des Leiters entsteht ein Kräftegleichgewicht.

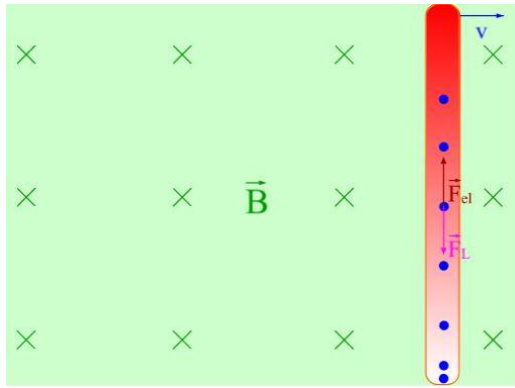


Abbildung 5: Ladungsdifferenz

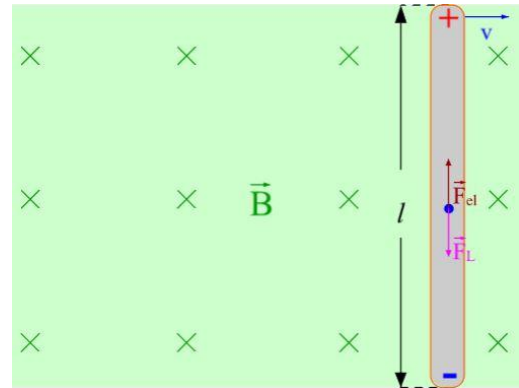


Abbildung 6: Kräftegleichgewicht

Aus dem Kräftegleichgewicht lässt sich nun der Ansatz: $F_{el} = F_L$ ziehen. Führt man diesen weiter aus, erhält man:

$$e \cdot E = e \cdot v \cdot B$$

Da für die elektrische Feldstärke $E = \frac{U_i}{l}$ gilt, lässt sich dieser somit auch nach Einsetzen von E in den oben beschriebenen Ansatz zur Formel für die Induktionsspannung umstellen. Die elektrische Ladung e kürzt sich dabei raus und man erhält:

$$U_i = l \cdot v \cdot b$$

Nach der Regel von Lenz wird jedoch ein negatives Vorzeichen zur Formel hinzugefügt:

$$U_i = -l \cdot v \cdot b$$

Führt man dieses Prinzip weiter und wendet es auf eine Leiterschleife an macht sich auch hier aufgrund der Lorentzkraft eine Verschiebung der Ladung bemerkbar.

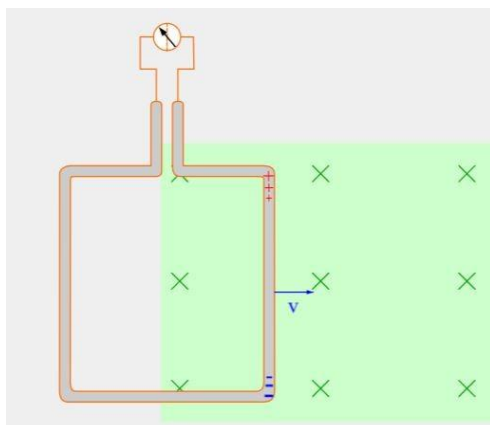


Abbildung 7: Eintreten einer Leiterschleife in ein B-Feld

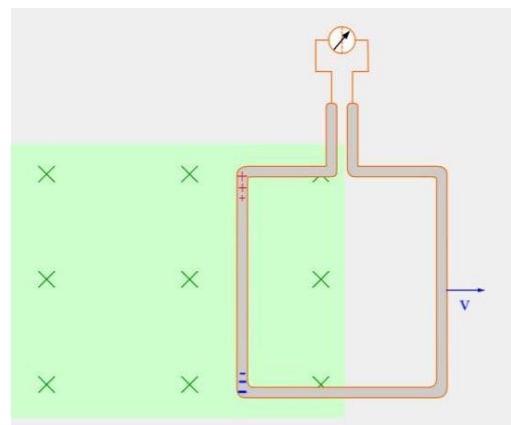


Abbildung 8: Austreten einer Leiterschleife aus einem B-Feld

Hier lässt sich feststellen, dass nur bei Ein- und Austreten der Leiterschleife das Voltmeter, was oberhalb der Leiterschleife abgebildet ist, ausschlägt. Dies ist dadurch zu begründen, dass es hier nur bei einer Hälfte der Leiterschleife zu einer Verschiebung der Elektronen kommt. Da die andere Hälfte nicht vom Magnetfeld beeinflusst wird, entsteht an den Enden der Leiterschleife eine Ladungsdifferenz. Da beim Eintauchen beider Seiten der abgebildeten Leiterschleife auch auf beiden Seiten eine Verschiebung der Ladung stattfindet, laden sich nun auch beide Anschlüsse der Leiterschleife in Folge des Elektronenmangels positiv. Somit entsteht auch keine Ladungsdifferenz bzw. Induktionsspannung, die am Voltmeter gemessen werden kann.

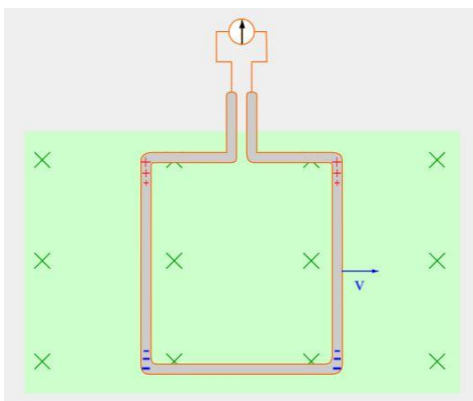


Abbildung 9: Keine Änderung des B-Feldes bewirkt keine Induktionsspannung

Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der vom Magnetfeld durchdrungenen Fläche der Leiterschleife und der resultierenden Induktionsspannung. Auch hier lässt sich die oben beschriebene Formel anwenden. Da für $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ gilt, lässt sich aus der Länge l und der sich ändernden Breite Δx die sich ändernde Fläche bestimmen: ΔA . Es ergibt sich somit aus: $U_i = -l \cdot v \cdot B = -l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot B$ die Formel:

$$U_i = -B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Bei einer Spule mit N Windungen wird die vorherige Formel mit einem zusätzlichen Faktor N versehen und es ergibt sich für Spulen die Formel:

$$U_i = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

(Leifiphysik 2023a)

Induktion durch Drehen einer Leiterschleife

Beim Drehen einer Leiterschleife lässt sich auch das Prinzip der Flächenänderung anwenden, jedoch geht diese anders von statten. Die Induktionsspannung wird hierbei durch Ändern der Winkelweite eines Leiters im Magnetfeld erzeugt. Die vom Magnetfeld beeinflusste Fläche ergibt sich aus der gesamten Fläche A_0 , welche mit $\cos(\omega \cdot t)$ multipliziert wird. Diese wird auch als effektive Fläche A_{eff} bezeichnet. Es ergibt sich also für die Fläche die Formel:

$$A_{eff}(t) = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ bzw. } A_{eff}(\varphi) = A_0 \cdot \cos(\varphi).$$

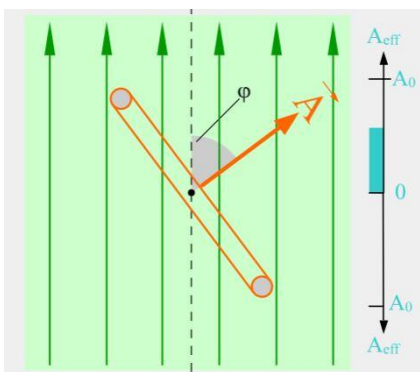


Abbildung 10: Drehende Leiterschleife im Magnetfeld

In waagerechter Stellung bzw. bei Annäherung von A_{eff} an A_0 innerhalb des Drehvorgangs ist auch die Flächenänderung pro Sekunde besonders klein. Dies trifft also bei $\varphi = 0^\circ$ bzw. $\varphi = 180^\circ$ zu. Aufgrund dessen ist auch die Induktionsspannung besonders klein. Bei senkrechter Stellung, also bei den Winkeln $\varphi = 90^\circ$ bzw. $\varphi = 270^\circ$, ist die Induktionsspannung aufgrund der stärksten Flächenänderung demgemäß jedoch am größten.

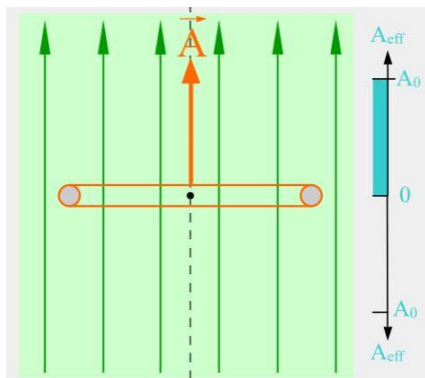


Abbildung 11: Waagrecht zum B-Feld ausgerichtete Leiterschleife

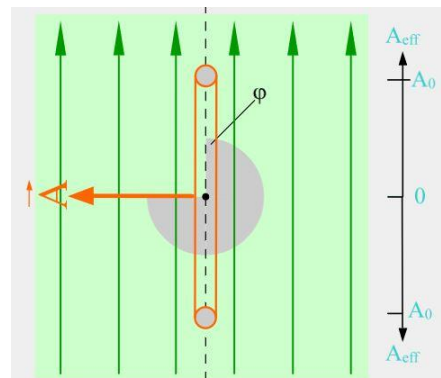


Abbildung 12: Senkrecht zum B-Feld ausgerichtete Leiterschleife

Es lässt sich hierbei somit auch die Formel $U_i = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$ oder auch mit Einbezug von A_{eff} die folgende Formel anwenden:

$$U_i = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A_{eff}}{\Delta t}$$

(Leifiphysik 2023a)

Induktion durch Verformung einer Leiterschleife

Beim Verformen einer Leiterschleife kommt es erneut zu einer Flächenänderung. Wendet man das bereits beschriebene Prinzip der Flächenänderung bei der Verformung der Leiterschleife an, lässt sich auch hier dieselbe Formel für die Induktionsspannung verwenden. Hier lässt sich bei konstanter Änderung die induzierte Spannung wie folgt beschreiben:

$$U_i = -N \cdot B \cdot \frac{A_{Ende} - A_{Anfang}}{\Delta t}$$

(Leifiphysik 2023a)

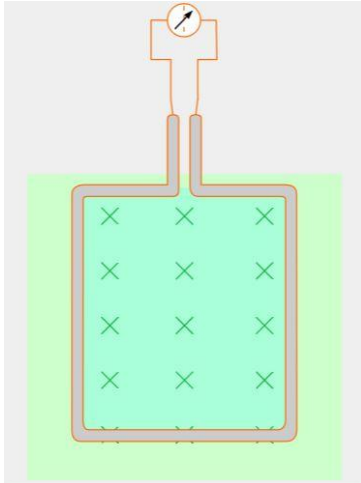


Abbildung 13: Kleiner werdende Leiterschleife

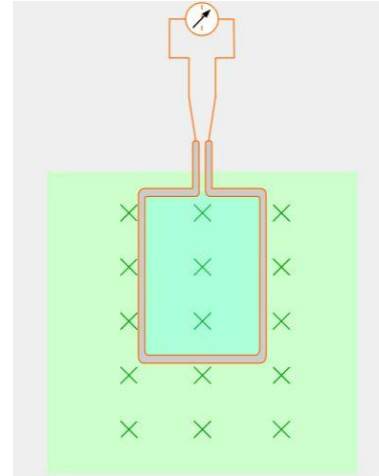


Abbildung 14: Kleine Leiterschleife

Induktion durch Magnetfeldveränderung

Aus dem bereits beschriebenen Faraday'schen Induktionsgesetz und der Formel:

$U_i = -N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ geht hervor, dass sowohl eine Änderung der Fläche als auch eine Änderung der Magnetischen Flussdichte für die Erzeugung einer Induktionsspannung sorgen kann, da für den Magnetischen Fluss $\phi = A \cdot B$ gilt.

Verstärkt man also die Magnetische Flussdichte, so vergrößert sich auch entsprechend der Magnetische Fluss.

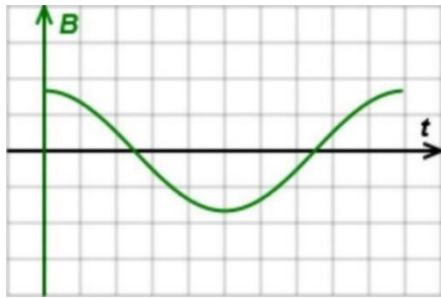


Abbildung 15: Sinusförmig verlaufende Magnetische Flussdichte

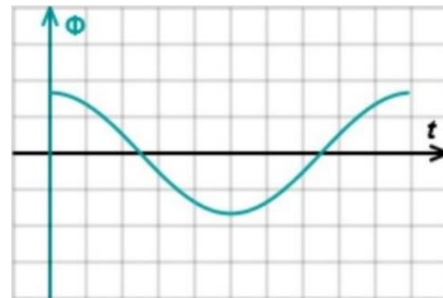


Abbildung 16: Sinusförmig verlaufender Magnetischer Fluss

Nach der Lenz'schen Regel bzw. aufgrund des negativen Vorzeichens in der Formel ergibt sich demnach eine negative Induktionsspannung. Bei einer Verkleinerung des magnetischen Flusses fällt die Induktionsspannung dementsprechend positiv aus.

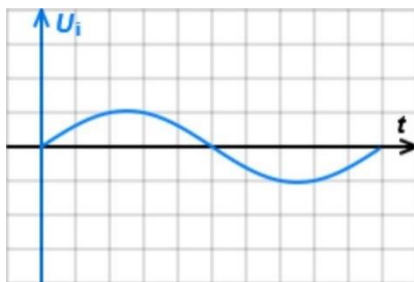


Abbildung 17: Sinusförmig verlaufende Induktionsspannung

Die oben gezeigten Graphen zeigen die harmonische Änderung der Flussdichte B . Die Flussdichte wird hier wie folgt beschrieben:

$$B(t) = \hat{B} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Die Induktionsspannung lässt sich bei harmonischer Änderung der magnetischen Flussdichte durch folgende Formel beschreiben:

$$U_i = N \cdot \hat{B} \cdot \omega \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Zum Errechnen der Amplitude bzw. der Höchstspannung kann $\sin(\omega \cdot t)$ aus der Formel ausgelassen werden, da $\sin(\omega \cdot t) \leq 1$ gilt und man erhält:

$$\hat{U}_i = N \cdot \hat{B} \cdot \omega \cdot A$$

(Leifiphysik 2023d)

Die Lenz'sche Regel

Die Lenz'sche Regel stammt von dem deutschen Physiker Heinrich Friedrich Emil Lenz und besagt, dass der Induktionsstrom immer so gerichtet ist, dass dieser der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt. Diese Regel lässt sich mithilfe des Versuchs mit einer Leiterschaukel im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten besonders gut verdeutlichen.

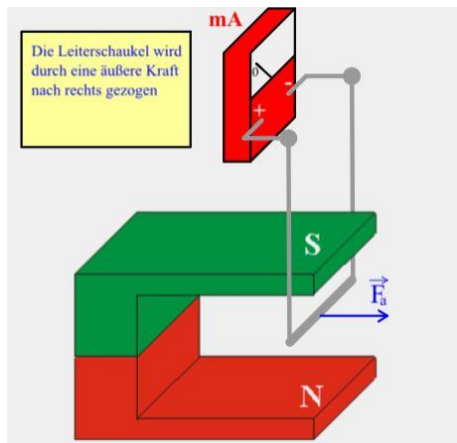


Abbildung 18: Bewegte Leiterschaukel im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten

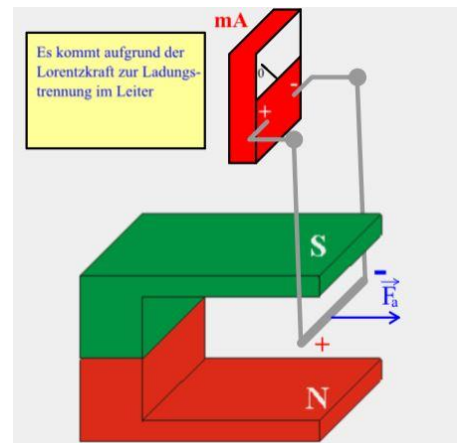


Abbildung 19: Ladungstrennung in der Leiterschaukel

Zu Beginn des Versuchs wird die Leiterschaukel durch eine äußere Kraft in Bewegung versetzt. Nimmt man nun an, die sich in der Leiterschaukel befindenden Elektronen bewegen sich aufgrund der Bewegung nach rechts, so lässt sich mithilfe der Linken-Hand-Regel die Richtung der Lorentzkraft feststellen, da neben der Bewegung des Leiters nach rechts die Magnetfeldlinien nach oben ausgerichtet sind.

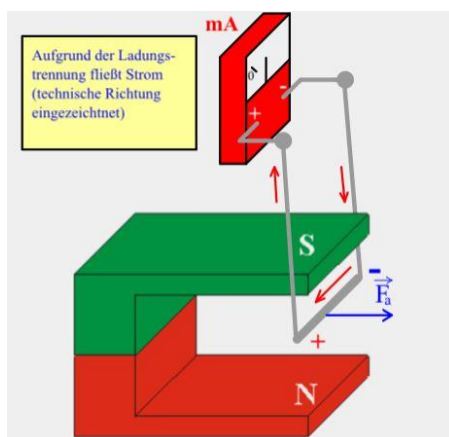


Abbildung 20: Stromfluss durch Leiterschaukel

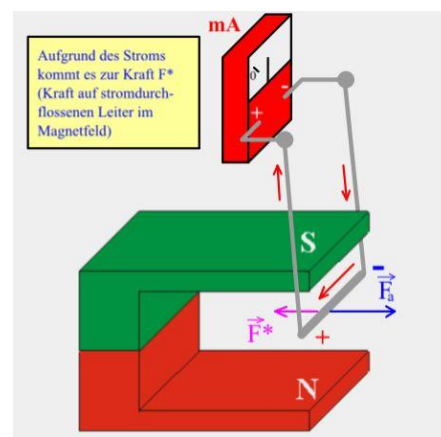


Abbildung 21: Lorentzkraft wirkt auf die Leiterschaukel abbremmend

Die Lorentzkraft wirkt nun in die Bildebene hinein, weshalb sich die Elektronen aufgrund der Lorentzkraft auch entsprechend in diese Richtung bewegen. Es entsteht eine Ladungstrennung und somit eine Induktionsspannung.

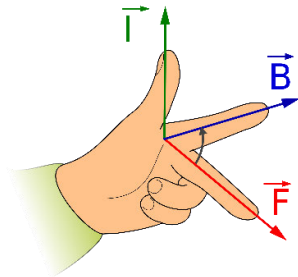


Abbildung 22: Linke-Hand-Regel

Aufgrund dessen müsste man die Linke-Hand-Regel erneut anwenden. Es ändert sich die Richtung der Lorentzkraft und die Leiterschaukel wird abgebremst. Aus der Lenz'schen Regel geht somit auch das negative Vorzeichen aus den Formeln für die Induktionsspannung hervor.

Wie lässt sich die Induktionswirkung verstärken?

Beim Betreiben eines Generators kann es vorkommen, dass weniger Energie zustande kommt, als reingesteckt wird, um den Generator zu betreiben. Um beim Betreiben eines Generators eine möglichst hohe resultierende Energie durch kleinstmöglichen Aufwand mit geringer Verlustenergie zu erreichen, bieten sich vielerlei Maßnahmen für die Verstärkung der Induktionswirkung an. Bleibt die Änderung des Magnetfeldes konstant, lässt sich beim Einsetzen von $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{l} \cdot I$ in die Formel von $U_{ind} = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} - N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$ die folgende Formel für die Induktivität herleiten:

$$L = -A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

So lässt sich die Formel der Induktionsspannung umstellen zu:

$$U_{ind} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Es zeigt sich also, dass die Induktivität einer Spule als Vorfaktor in der Formel für U_{ind} ausschlaggebend für die Größe der erzeugten Induktionsspannung ist. Im Allgemeinen ist die Induktionsspannung eine Angabe darüber, wie stark eine Spule für eine Induktionswirkung anfällig ist. Aus der Formel für die Induktivität geht also hervor, dass es sich anbieten würde, die Größen wie die Windungszahl N , die

Fläche oder auch die Änderung des Stroms zu vergrößern. Nun ist es jedoch auch möglich, Magnetfelder zu stärken durch das Einbringen von ferromagnetischen Stoffen in das Magnetfeld. In der Formel für B wird die Permeabilität eines Stoffes beschrieben durch: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$. Für die magnetische Feldkonstante bzw. für das Maß der magnetischen Leitfähigkeit im Vakuum gilt $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$, wogegen die relative Permeabilität oder auch Permeabilitätszahl genannt, μ_r bei jedem Stoff unterschiedlich ausfällt. Diese beträgt im Vakuum jedoch $\mu_r = 1$ und wird in der Regel in den Formeln ausgelassen. Die Permeabilität eines Stoffes gibt also die individuelle magnetische Leitfähigkeit an. Wird diese u.a. durch das Einsetzen eines Eisenkerns erhöht, so kommt es gleichzeitig auch zu einem dichteren Aufkommen an Feldlinien bzw. zu einer größeren magnetischen Flussdichte, woraus somit auch eine stärkere magnetische Kraft resultiert (Elektrotechnik Fachbuch 2023).

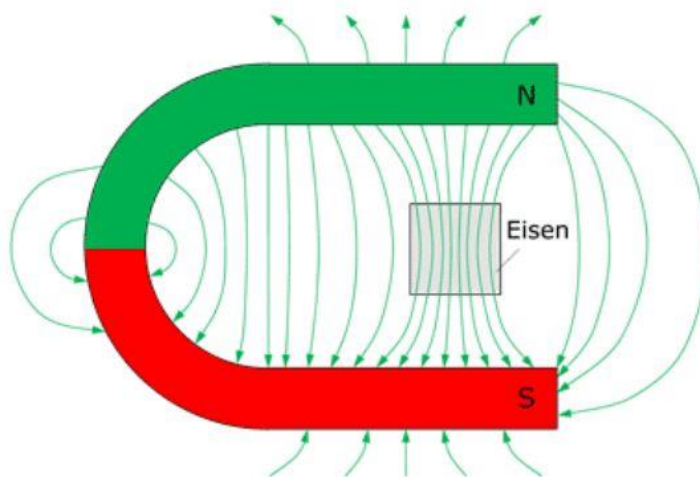


Abbildung 23: Verdichtung von Feldlinien bei einem Eisenkern im Magnetfeld

3. Von Wechselstrom zu Gleichstrom

Das Prinzip der Induktion wird vor allem bei Generatoren angewandt. Da aus diesen jedoch oftmals aufgrund der Drehbewegung eine Wechselspannung resultiert und diese in vielen Bereichen unbrauchbar ist, wird diese oft durch verschiedenste Maßnahmen gleichgerichtet. Eine Möglichkeit, einen Wechselstrom bzw. eine Wechselspannung gleich zu richten, ist das Gleichrichten per Diode.

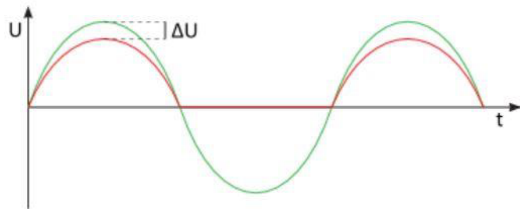


Abbildung 24: Graphische Darstellung einer pulsierenden Gleichspannung

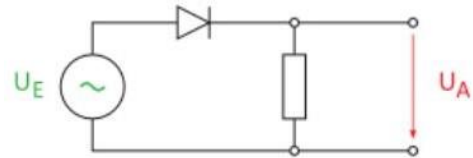


Abbildung 25: Stromkreis mit Diode

Eine Diode erlaubt dem Strom den Durchgang in nur eine Richtung. So gelangt in der hier gezeigten Abbildung bei jeder Halbwelle eine pulsierende Gleichspannung in die Schaltung. Es kommt dabei immer zu einem geringen Abfall der Spannung an der Diode. Führt man nun vier solcher Dioden, lässt sich der Gleichrichtungsvorgang effizienter gestalten.

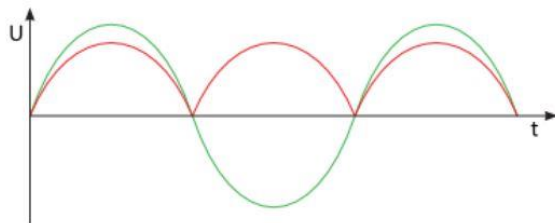


Abbildung 26: Graphische Darstellung einer Gleichspannung mit Halbwellen

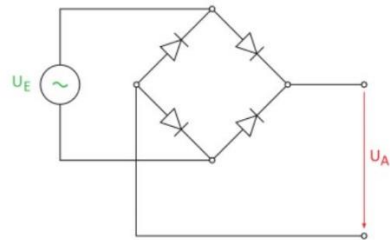


Abbildung 27: Stromkreis mit Graetz-Schaltung

Die oben gezeigte Abbildung zeigt eine sog. Graetz-Schaltung, bei welcher an zwei Stellen die Wechselspannung abwechselnd pulsieren kann und keine Halbwellen ausgelassen werden. Es treten somit immer noch wellenförmige Spannungsmuster auf, welche jedoch mithilfe eines Kondensators weiter geglättet werden können (Uni-Göttingen 2023).

4. Der Dreiphasengenerator

Ein Dreiphasengenerator oder auch Drehstromgenerator genannt, ist eine bestimmte Art eines elektrischen Generators, bei welchem drei Spulen jeweils nach einem Winkel von 120 Grad an dem Stator angebracht sind. Wie auch in der Abbildung gezeigt wird, kommt es zu einer Drehbewegung der Magneten. Die Versetzung der Spulen bewirkt das Induzieren von zu 120 Grad versetzten Induktionsströmen.

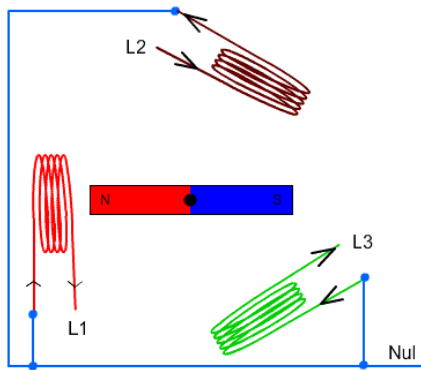


Abbildung 28: Dreiphasengenerator

Aufgrund dieser Phasenverschiebung sind spezielle Schaltungen für die Verwendung der induzierten Ströme, bzw. des Drehstroms notwendig. Besonders gängig sind die Sternschaltung und die Dreieckschaltung.

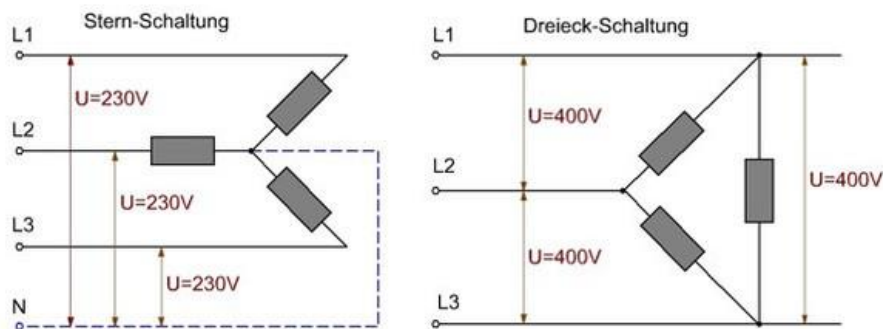


Abbildung 29: Stern- und Dreieckschaltung

Bei der Sternschaltung werden die drei Spulen zu einem Mittelpunkt zusammengeführt. Dieser bildet einen Neutralpunkt, an welchem kein Strom fließt. Aufgrund der Phasenverschiebung wirkt immer nur auf eine Spule der Reihe nach die maximale Induktionswirkung ein. Zwischen den Anschlüssen und dem Neutraleiter können dann insgesamt drei sinusförmige und um 120 Grad phasenverschobene Spannungen der Spulen gemessen werden. Die Dreieckschaltung hingegen besteht aus einem Verbund aus drei Spulen in Dreieckskonstellation und wird somit nicht zu einem Neutralpunkt zusammengeführt. Hier können die einzelnen Wechselspannungen direkt an den jeweiligen Anschlüssen gemessen werden. Da der Neutraleiter keine Spannung liefert, fallen die gemessenen Spannungen bei der Dreieckschaltung entsprechend höher aus (RP-Energie-Lexikon 2023b). Das folgende Diagramm stellt die drei zu 120 Grad versetzten sinusförmigen Spannungsverläufe resultierend aus einem Dreiphasengenerator dar.

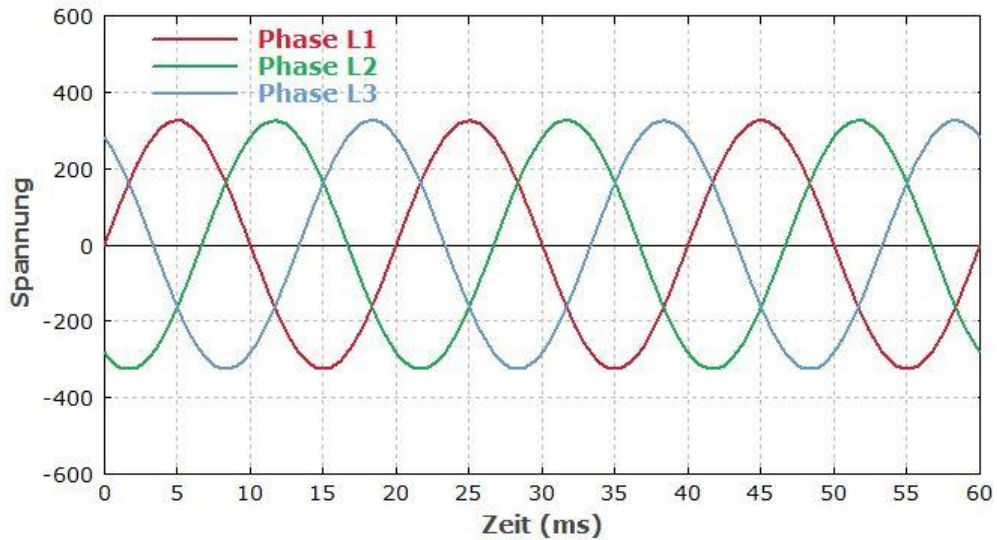


Abbildung 30: Graphische Darstellung phasenverschobener Wechselspannungen

5. Untersuchung der Induktionsgesetze

5.1. Aufbau und Durchführung

Zur weiteren Erforschung der Prinzipien der Induktion führten wir Versuche durch, um die Zusammenhänge zwischen der Induktionsspannung U_i und der Änderung der Flussdichte $\frac{\Delta B}{\Delta t}$, der Querschnittsfläche A und der Windungszahl N zu veranschaulichen. Der unten abgebildete Versuchsaufbau diente dem Nachweisen dieser Zusammenhänge.

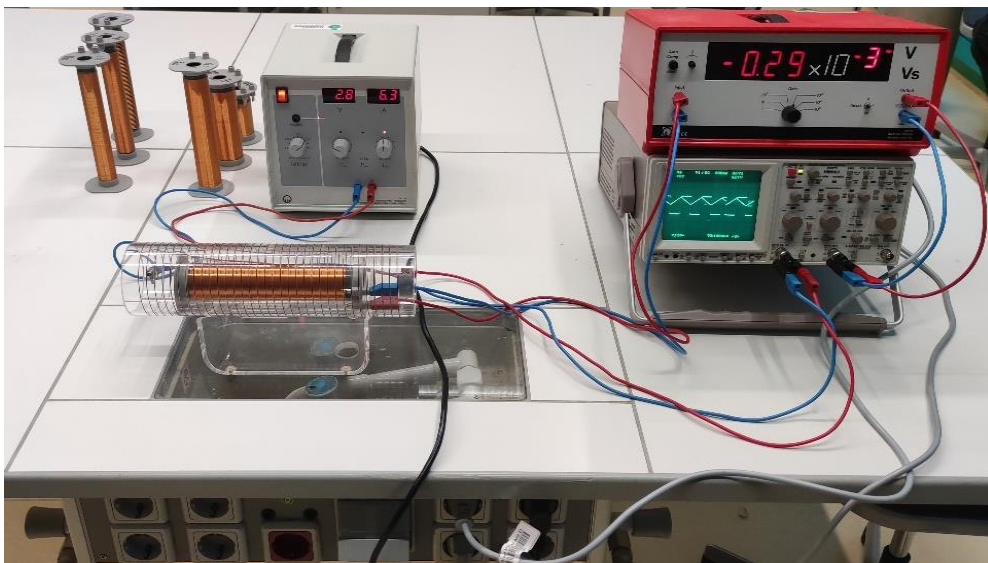


Abbildung 31: Versuchsaufbau: Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte (Eigene Abbildung).

Zu den verwendeten Materialien zählten sieben verschiedene Spulen, welche die neun verschiedenen Eigenschaften für die Änderung des Durchmessers, der Länge und der Windungszahl vertreten konnten, eine Feldspule, ein Netzgerät, ein Oszilloskop und auch ein Messverstärker. In dem Versuch wurde zunächst eine Induktionsspule in eine Feldspule platziert. An die Feldspule wird mithilfe des Netzgerätes, welches in der Lage ist, eine Wechselspannung abzugeben, eine Wechselspannung an die äußere Feldspule angelegt. Die an die Feldspule angelegte Spannung verläuft nicht sinusförmig, sondern gezackt und bildet eine Sägezahnspannung, weshalb der Stromverlauf vom Oszilloskop linear und die Stromänderungsrate auch mit $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ an der inneren Induktionsspule angegeben wird.

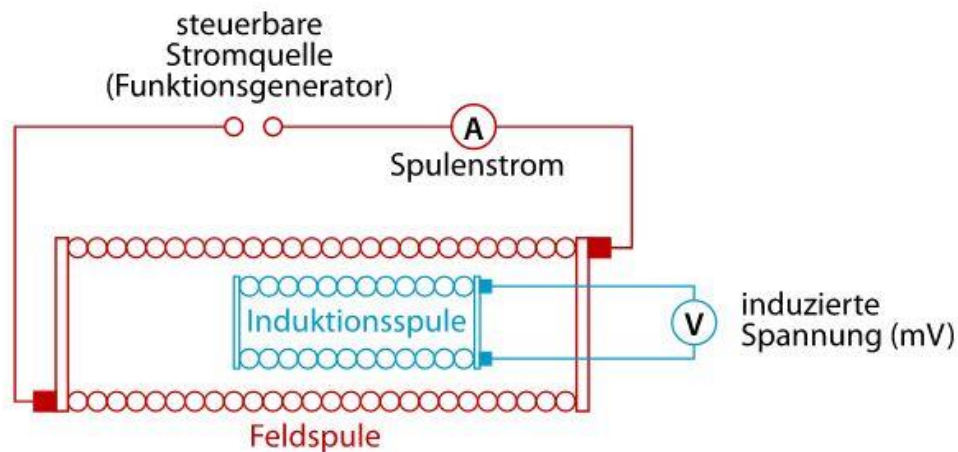


Abbildung 32: Schaltplan zum Versuchsaufbau aus Abbildung 31

Anschließend wird der Messverstärker angeschlossen, welcher die Messwerte der übertragenen Wechselspannung an ein Oszilloskop verstärkt liefert, welches den Spannungsverlauf auf einem Bildschirm anzeigt. Da die in das Oszilloskop eingehenden Messwerte nun verstärkt vorliegen, werden für diese Maßstäbe festgelegt. Die dreieckförmige Wechselspannung der Feldspule wird von Y1 mit einem Maßstab von 5V pro Einheit angegeben, wogegen der Graph Y2 die induzierte Wechselspannung bzw. die Änderungsrate der gezackten Wechselspannung mit einem Maßstab von 100mV pro Einheit angibt. Die dort angezeigten Messverläufe und die Werte des Netzgerätes wurden anschließend für die Auswertung verwendet. Dafür fotografierten wir für jede Messung den Messverlauf des Oszilloskops. Dieser Versuch wurde mit verschiedenen Stromänderungsraten $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ und somit jeweils mit den Werten von $1,2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$, $1,6 \frac{\Delta I}{\Delta t}$ und $2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$ durchgeführt. Im Folgenden wird der Versuch für die Stromänderungsrate von $1,6 \frac{\Delta I}{\Delta t}$ genauer beschrieben.

Unterschiedliche Durchmesser:



Abbildung 33: Spulen mit unterschiedlichen Durchmessern (Eigene Abbildung)

Unterschiedliche Windungszahlen:



Abbildung 34: Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen (Eigene Abbildung)

Unterschiedliche Spulenlängen:



Abbildung 35: Spulen mit unterschiedlicher Länge (Eigene Abbildung)

5.2. Auswertung

Ändern des Durchmessers

Zu Beginn wurde der Versuch mit der Änderung des Durchmessers durchgeführt. Dieser steht im direkten Zusammenhang zur Querschnittsfläche der jeweiligen Spule. Wir haben mit der schmalsten Spule begonnen und uns bis zur breitesten

Spule hochgearbeitet. Während des Änderns des Durchmessers der Induktionsspule wurden alle anderen Größen konstant gehalten, um so im Anschluss nachzuweisen, dass die Induktionsspannung proportional zu dem Durchmesser bzw. der damit verbundenen Fläche ist. Somit wurde die Windungszahl bei 300 konstant gehalten. Die Feldspule hat bei dem gesamten Versuch eine Windungszahl von 34.

Messverlauf bei einem Durchmesser von 26 mm:



Abbildung 36: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 26 mm Durchmesser; $2,2 \Omega$; $330 \mu\text{H}$; 1,2 A (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einem Durchmesser von 33 mm:

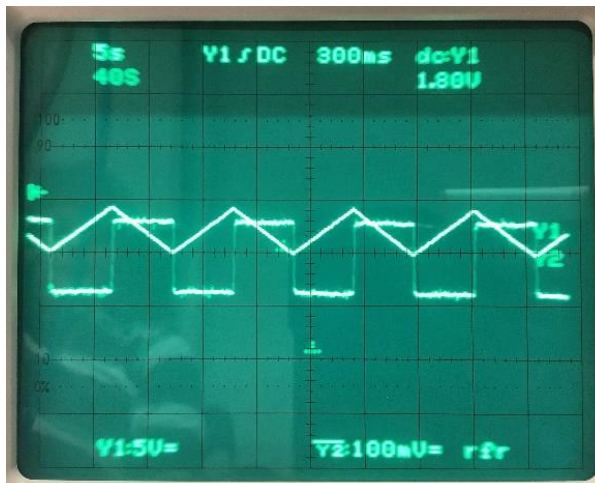


Abbildung 37: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 33 mm Durchmesser; $2,8 \Omega$; $530 \mu\text{H}$; 1,2 A (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einem Durchmesser von 41 mm:



Abbildung 38: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 3,5 Ω ; 800 μ H; 1,2 A (Eigene Abbildung)

Es ist zu beobachten, dass sich beim Erhöhen des Durchmessers gleichermaßen auch die Induktionsspannung erhöht. Im Anschluss haben wir die Messwerte abgelesen und mithilfe einer Tabelle und einem Graphen den Durchmesser und die Induktionsspannung der Induktionsspule auf eine Proportionalität geprüft.

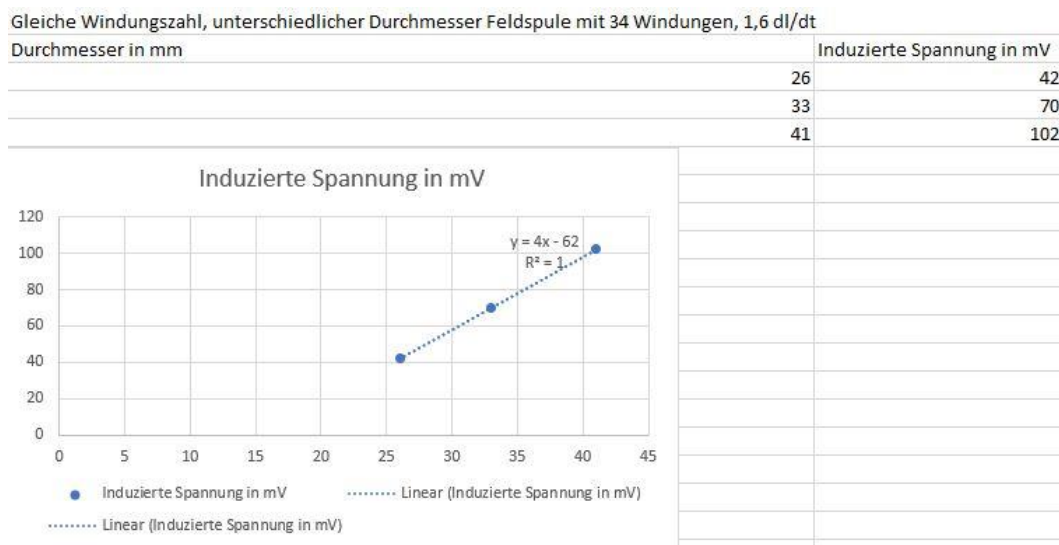


Abbildung 39: Auftragung der induzierten Spannung gegen den Durchmesser (Eigene Abbildung)

Es ergeben sich bei diesem Versuch eine Gerade und eine Trendlinie mit einem R-Wert von 1. Dieser Wert gibt an, wie linear die Messwerte verlaufen. Solange sich hier ein linearer Verlauf zeigt, gilt eine Proportionalität zwischen dem Durchmesser der Induktionsspule und der entstandenen Induktionsspannung. Da sich die Querschnittsfläche der Spulen durch den Durchmesser definiert gilt also: $U_i \sim d$ bzw. $U_i \sim A$.

Ändern der Windungszahl

Nachdem nun das Verhältnis zwischen der Induktionsspannung und dem Durchmesser beschrieben und dessen Proportionalität geprüft sind, wurde folglich der nächste Durchgang gestartet. In diesem wurden die Induktionsspannungen bei Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen gemessen. Dabei wurde der Durchmesser der drei Induktionsspulen bei 26 mm konstant gehalten. Auch hier wurde mit der geringsten Windungszahl begonnen und sich zu den höheren Windungszahlen hochgearbeitet.

Messverlauf bei einer Windungszahl von 75:



Abbildung 40: Messverlauf bei einer Spule: 75 Wdg.; 26 mm Durchmesser; $0,15 \Omega$; $24 \mu\text{H}$; 4 A (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einer Windungszahl von 150:

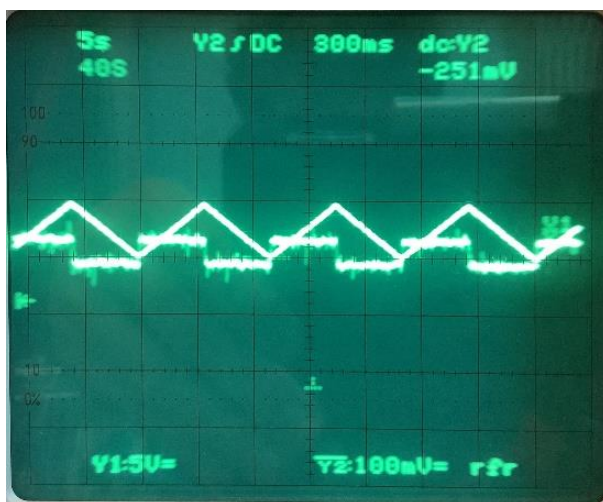


Abbildung 41: Messverlauf bei einer Spule: 150 Wdg.; 26 mm Durchmesser; $0,3 \Omega$; $90 \mu\text{H}$; 4 A (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einer Windungszahl von 300:

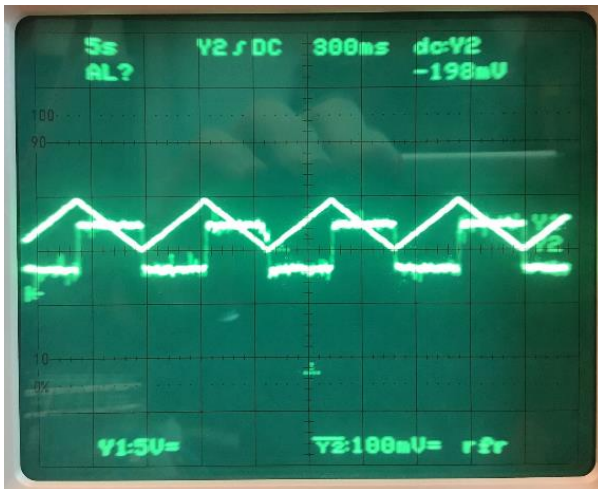


Abbildung 42: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 26 mm Durchmesser; 2,2 Ω; 330 μH; 1,2 A (Eigene Abbildung)

Auch hier ist zu beobachten, dass sich die Induktionsspannung beim Erhöhen der Windungszahl erhöht. Zum Prüfen der Proportionalität der Induktionsspannung zu der Windungszahl wurden die gemessenen Werte erneut in eine Tabelle eingetragen und mittels Excel in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen.

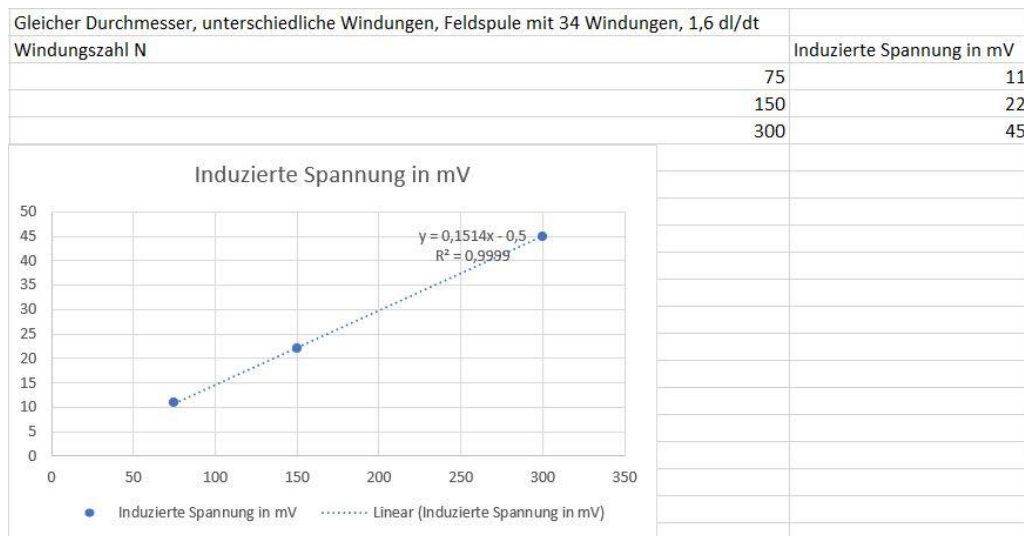


Abbildung 43: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Windungszahl (Eigene Abbildung)

Im Anschluss erhielten wir eine lineare Aufführung der Messwerte und eine Trendlinie mit dem R-Wert von 0,9999, was somit für eine Proportionalität zwischen Induktionsspannung und der Windungszahl spricht. Es gilt also: $U_i \sim N$.

Ändern der Spulenlänge

Nach der Bearbeitung der Verhältnisse zwischen der Induktionsspannung und dem Durchmesser sowie der Windungszahl wurde in Folge die Auswertung des Versuches mit dem Ändern der Spulenlänge durch das Benutzen von Induktionsspulen mit unterschiedlichen Längen durchgeführt. Dabei wurden die Windungsdichte und der Durchmesser von 41mm unverändert gelassen und erneut mit der längsten Induktionsspule begonnen.

Messverlauf bei einer Spulenlänge von 5,5 cm:

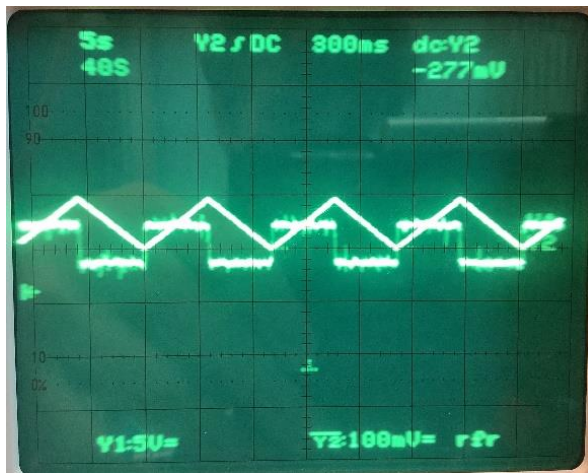


Abbildung 44: Messverlauf bei einer Spule: 100 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 1,1 Ω ; 200 μ H; 1,2 A; 5,5 cm Länge (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einer Spulenlänge von 10,7 cm:

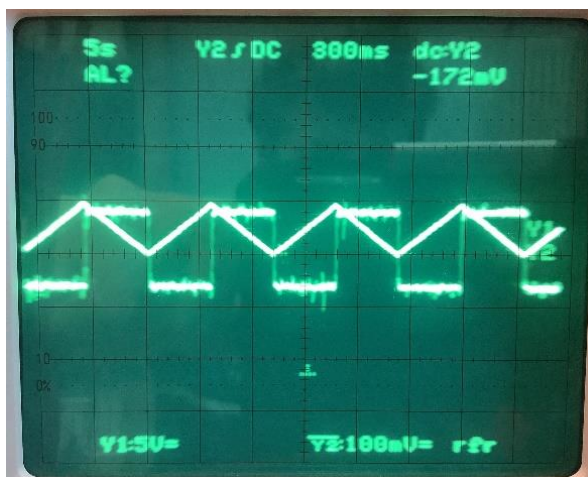


Abbildung 45: Messverlauf bei einer Spule: 200 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 2,2 Ω ; 500 μ H; 1,2 A; 10,7 cm Länge (Eigene Abbildung)

Messverlauf bei einer Spulenlänge von 16,2 cm:



Abbildung 46: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 3,5 Ω; 800 μH; 1,2 A; 16,2 cm Länge (Eigene Abbildung)

Aus den Messwerten lässt sich, wie auch beim vorherigen Ändern des Durchmessers und der Windungszahl, eine Vergrößerung der Induktionsspannung beim Vergrößern der Spulenlänge feststellen.

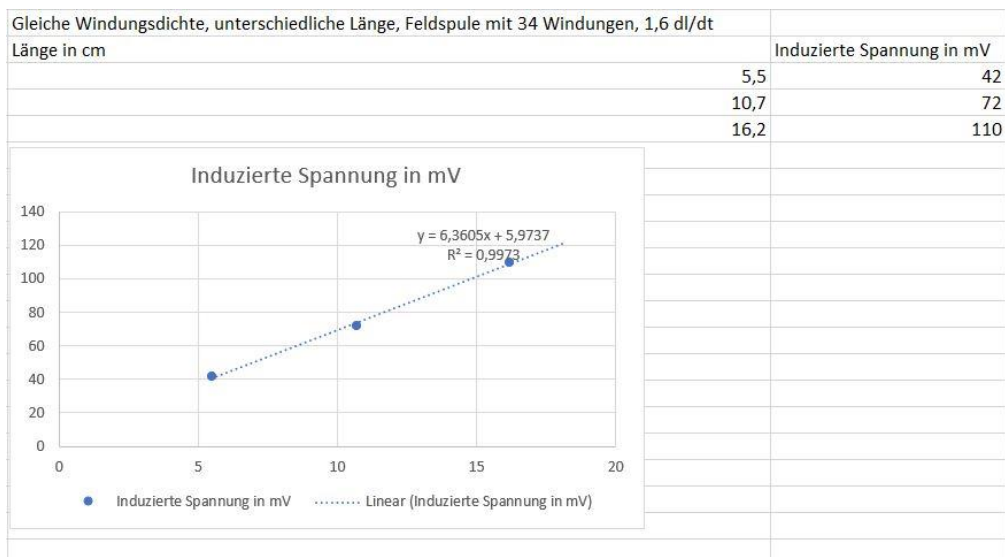


Abbildung 47: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Spulenlänge (Eigene Abbildung)

Um hier die Proportionalität zu prüfen, wurden die Spulenlängen mit der Induktionsspannung nochmalig in einer Tabelle bzw. in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen, wobei sich erneut eine Gerade mit dem R-Wert von 0,9973 ergab. Somit ist die Induktionsspannung proportional zu der Länge der Induktionsspule. Es gilt also: $U_i \sim l$.

Änderung der Stromstärke bzw. der magnetischen Flussdichte

Betrachtet man jetzt jedoch die anderen Stromänderungsraten von $1,2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$ und $2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$, nachdem hier die Auswertung mit einer Stromänderungsrate von $1,6 \frac{\Delta I}{\Delta t}$ durchgeführt wurde, zeigen sich dieselben Zusammenhänge bzw. Proportionalitäten zwischen der Induktionsspannung und den beschriebenen Größen. Die Aufteilung hat nun den Vorteil, dass sich zusätzlich auch der Zusammenhang zwischen der Stromänderungsrate und der Induktionsspannung darstellen lässt. Neben der Stromänderungsrate ändert sich gleichermaßen auch die Änderung der magnetischen Flussdichte $\frac{\Delta B}{\Delta t}$. Somit würde eine Proportionalität zwischen der Induktionsspannung und der Stromänderungsrate gleichzeitig auch dafürsprechen, dass die Induktionsspannung proportional zur Magnetfeldänderung ist. Das Nachweisen dieser Proportionalität geschah mit einem erneuten Auftragen der Messdaten. Dabei wurden die Versuche mit den unterschiedlichen Stromänderungsraten in ein Diagramm zusammen aufgetragen. So lassen sich für die unterschiedlichen Durchmesser der Spulen drei Geraden feststellen, was für dieselbe Proportionalität zwischen der induzierten Spannung und der Stromänderungsrate bzw. Magnetfeldänderung spricht.

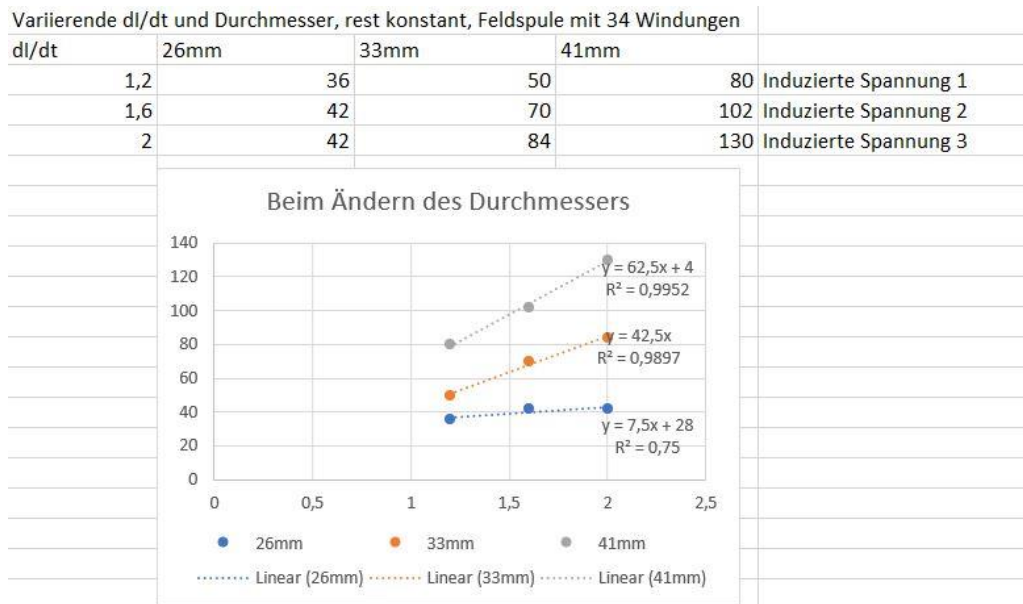


Abbildung 48: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Durchmesser (Eigene Abbildung)

Dieselbe Proportionalität zeigte sich beim Auftragen der Induktionsspannung zur Stromänderungsrate bei unterschiedlichen Windungszahlen.

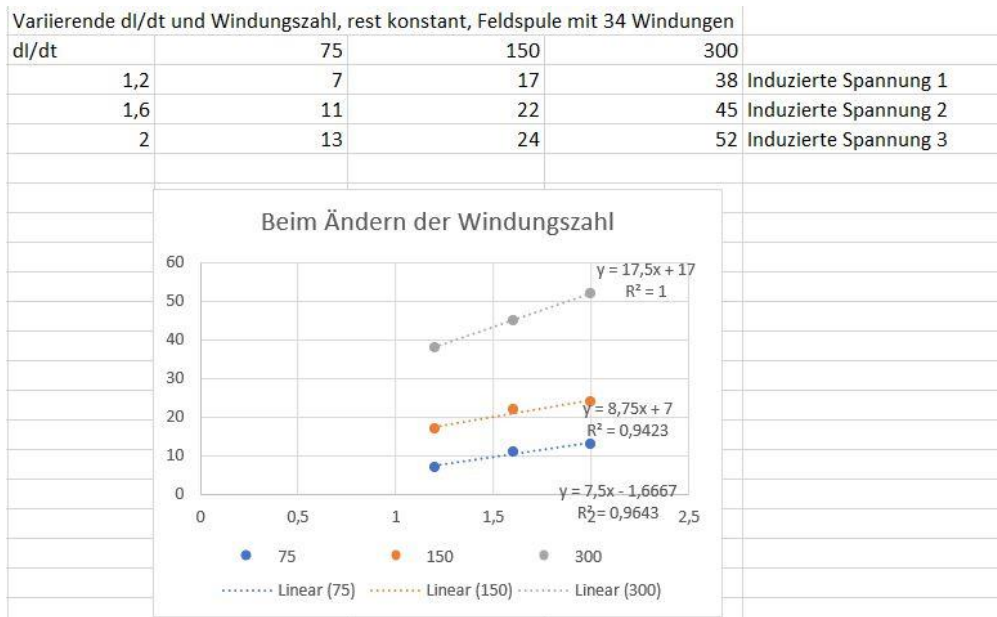


Abbildung 49: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Windungszahlen (Eigene Abbildung)

Auch beim Auftragen der Induktionsspannung zur Stromänderungsrate bei unterschiedlichen Spulenlängen ergab sich dieser Zusammenhang.

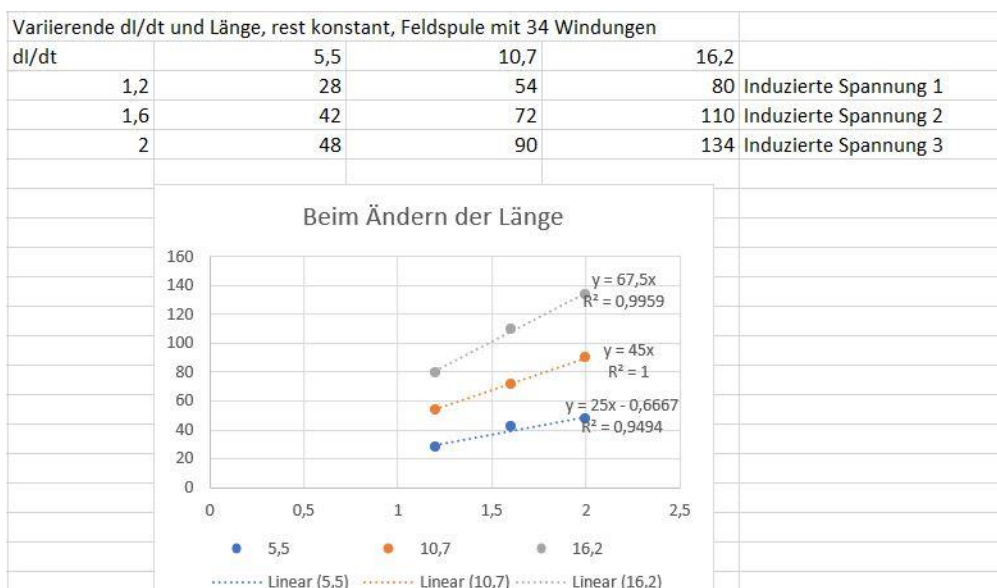


Abbildung 50: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Spulenlängen (Eigene Abbildung)

Es zeigt sich also deutlich, dass $U_i \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$ bzw. $U_i \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}$ gilt.

6. Untersuchung von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld

6.1. Aufbau und Durchführung

Da wir es in Erwägung zogen, Eisenkerne in unserem Generator zu verbauen, war ein weiteres Experiment zur Verstärkung der Induktionswirkung sinnvoll. Dabei haben wir die Auswirkungen durch das Einführen verschiedener ferromagnetischer Stoffe in ein Magnetfeld einer Spule auf die Selbstinduktion untersucht. Dafür sollte sich die Induktivität der Spule je nach eingeführtem Stoff verändern. Zu den verwendeten Materialien zählten ein Netzgerät, ein Spannungsmessgerät, eine Spule, eine Leiterplatte zum Zwischenschalten eines $100\ \Omega$ Widerstandes und auch verschiedene Stäbe, bestehend aus Ferrit und Eisen, welche in das innere Magnetfeld der Spule eingeführt wurden.

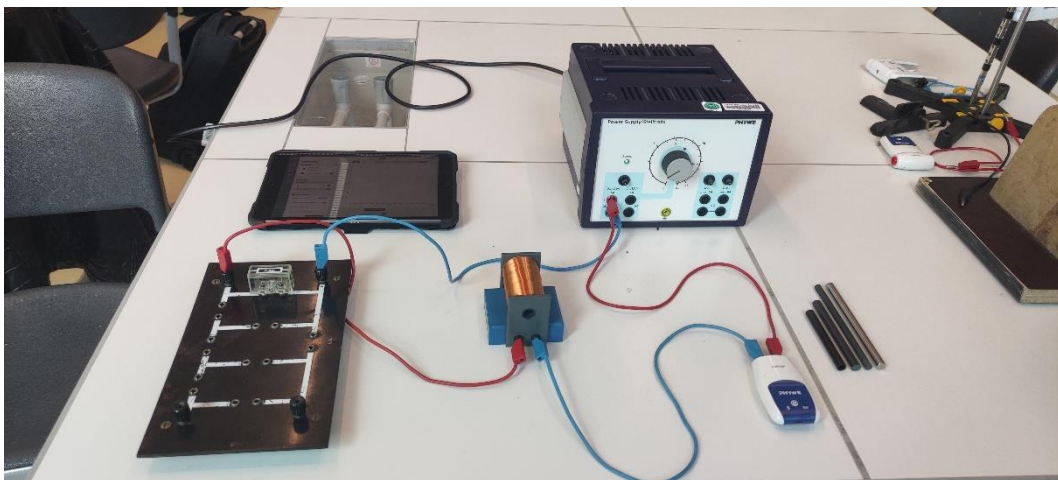


Abbildung 51: Versuchsaufbau: Untersuchung von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld (Eigene Abbildung)

Im Stromkreis lag eine Spannung von einem Volt an. Gemessen wurde mithilfe eines I-Pads, welches per Bluetooth mit dem Messgerät verbunden wurde. So konnten wir direkte Spannungsverläufe aufzeichnen und einfacher auswerten. Zur Durchführung des Experimentes wurde die Spannungsquelle angeschaltet und im Anschluss der Stromkreis unterbrochen. So kam es zu einem – durch die Selbstinduktion der Spule – abfallenden Spannungsverlauf. Das Experiment wurde sowohl ohne jegliche Art von Kern bzw. mit Luft, als auch mit einem Eisenkern und einem dünnen sowie dicken Ferritkern durchgeführt.

6.2. Auswertung

Beim Durchführen des Experimentes zeichneten wir zuerst die Kurve des Entladungsvorgangs der Spule ohne Kern auf. Es ergaben sich somit vier verschiedene Entladungskurven, welche unterschiedlich schnelle Entladungsvorgänge zeigten. Die Entladungskurve beim Einbringen eines ferromagnetischen Stoffes zeigte ein langsamerer Abfallen der Spannung als bei Luft. Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Entladungskurven in einem Diagramm gegeneinander aufgeführt, wobei die Verschiebungen der Graphen nicht zu beachten sind, da das Öffnen des Stromkreises bei den unterschiedlichen Durchgängen an unterschiedlichen Zeitpunkten geschah. Die unterschiedlich schnell abfallenden Kurven sind durch die unterschiedliche Permeabilität der Stoffe zu erklären, welche bereits im Theorieteil thematisiert wurde.

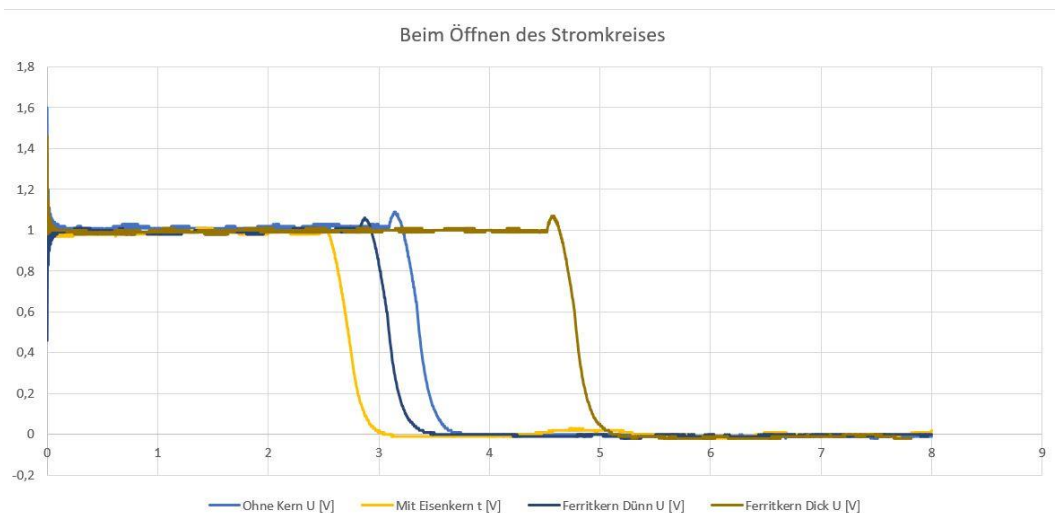


Abbildung 52: Auftrag von verschiedenen Entladungskurven (Eigene Abbildung)

Da Luft als ein Standardmaß gilt, wird dessen Permeabilität auch mit $\mu_r = 1$ angegeben. Die Stoffe Eisen und Ferrit verfügen über eine deutlich höhere Permeabilität, wobei Eisen über eine Permeabilität von $\mu_r = 10000$ und Ferrite Permeabilitäten von bis zu $\mu_r = 15000$ erreichen können (Chemie 2023). Nach der Formel für die Induktivität: $L = -A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ können ferromagnetische Stoffe zu einer Veränderung der Induktivität führen, woraus unterschiedlich starke Induktionswirkungen und auch Entladungskurven zustande kommen. Es lässt sich also sagen, dass eine höhere Permeabilität für eine höhere Induktivität sorgt und somit auch eine längere Anhaltung der Spannung hervorruft.

7. Bau des Generators

7.1. Vorbereitungen

Bei der Planung unseres Projektes entschieden wir uns für den Bau eines Dreiphasengenerators bzw. eines Drehstromgenerators, da dieser in besonders vielen Bereichen Verwendung findet. Dazu zählen alle Bereiche, in denen das Rotationsprinzip entscheidend für die Energiegewinnung ist. Windkraft, Wasserkraft und der Dynamo am Fahrrad wirkten auf uns inspirierend. Zu den benötigten Materialien zählten Schrauben, Kugellager, eine Achse mit passenden Muttern, reichlich Holz und natürlich Spulen sowie Magneten. Die Spulen haben wir jedoch durch das Aufspulen von Kupferdraht selbst hergestellt. Wir haben uns also über die benötigten Einzelteile ausgetauscht und diese im Anschluss besorgt. In manchen Fällen mussten jedoch auch spontane Einkäufe getätigt werden. Bei der Konstruktion sind Arbeitsgeräte, wie Akkuschauber u.a. zum Aufdrehen der Spulen, Bandschleifer, Schraubenschlüssel, Schraubendreher und ein Lötgerät zum Einsatz gekommen. Bevor wir jedoch mit der Konstruktion unseres Generators beginnen konnten, war es wichtig, Maßstäbe festzulegen und einen Plan mit Skizzen anzufertigen.

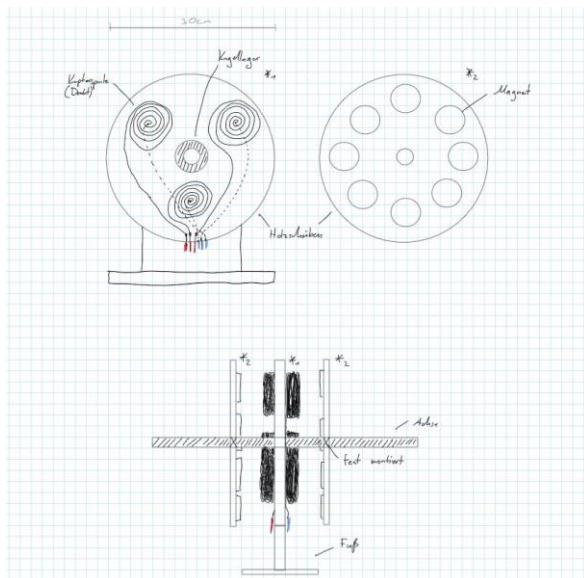


Abbildung 53: Erste Skizze für den Generator (Eigene Abbildung)

Grundlegend besteht ein Generator aus einem Stator, also einem unbeweglichen Element und einem Rotor, also einem sich drehenden Element. Diese sind dann mithilfe einer Achse miteinander verbunden. Da Generatoren im Regelfall einer kreisrunden Form entsprechen und diese bei einer Drehbewegung einen geringen

Luftwiderstand zur Folge hat, haben wir uns auch für eine runde Form entschieden. Sowohl die Form des Rotors als auch die des Stators haben wir demzufolge auf scheibenförmig festgelegt. Für die Erzeugung einer Induktionsspannung kommt es nicht darauf an, ob sich das Magnetfeld oder die Leiterschleife, in diesem Fall die Spule, bewegt, jedoch wäre bei der Bewegung der Spulen die Verbindung der Kupferdrähte erschwert worden. Um aus dieser Vorgehensweise einen Nutzen zu ziehen, wären Schleifkontakte von Nöten. Da jedoch eine vollständig gerade Drehbewegung des Rotors bei einem selbstgebauten Generator auszuschließen ist, das Schleifen also zusätzlich ein Abbremsen bedeuten würde und diese Vorgehensweise zudem auch umständlich umzusetzen gewesen wäre, haben wir uns für die einfachere Variante entschieden. Dabei haben wir die Magneten an dem Rotor befestigt, wobei die Spulen dem Stator angehören. Der Rotor mit den Magneten sollte dabei aus zwei Scheiben bestehen, zwischen welchen sich der Stator mit den Spulen befindet. Des Weiteren haben wir die Anzahl der Magneten je Rotorscheibe auf vier begrenzt. Zudem haben wir uns für eine Anzahl von drei Spulen entschieden. Sowohl die Magneten als auch die Spulen sollten in gleichmäßigen Abständen zueinander platziert werden. Dafür wurden die Magneten in 90 Grad und die Spulen in 120 Grad Abständen angebracht. Da die Spulen und die Magneten über eine gewisse Breite vertreten und in den Stator bzw. Rotor in passende Löcher eingesetzt werden sollten, haben wir dementsprechend auch dickes Nadelholz als Material für den Stator sowie Rotor verwendet, auf welches wir beim Rotor zusätzlich noch dünnere Sperrholzplatten zur weiteren Fixierung der Magneten sowie dünnere Holzbretter für die Fixierung der Spulen anbrachten. Zudem benötigte der Generator ein Antriebsorgan. Die Idee war es, den Generator mit einer Kurbel anzutreiben und ggf. die Drehkraft entweder mithilfe von einer Zahnradübersetzung oder durch eine Riemenübersetzung zu verstärken. Auf die Verstärkung der Drehkraft haben wir jedoch vorerst verzichtet und uns auf die alleinige Funktionstüchtigkeit des Generators konzentriert. Anschließend sollten noch die Spulen so verbunden werden, dass man schlussendlich zwei Kontakte erhält, um Lampen zum Leuchten zu bringen o. Ä. .

7.2. Die Konstruktion des Generators

Die Konstruktion der Rotorplatten und des Stators

Da uns anfangs schon die Magneten zur Verfügung standen und wir die Spulen selbst herstellen wollten, haben wir uns dazu entschieden, mit der Konstruktion der Rotorplatten zu beginnen. Wir starteten also mit dem Zuschneiden der Holzplatten.



Abbildung 54: Nadelholzplatte (Eigene Abbildung)



Abbildung 55: Rotorplatten mit ausgeschnittenen Löchern (Eigene Abbildung)

Zu Beginn haben wir aus einer 2,5 cm dicken Nadelholzplatte zwei kreisförmige Platten mit jeweils etwa dem Durchmesser von 30 cm ausgeschnitten. Damit wir wussten, wo wir die Löcher für die Magneten bohren müssen, haben wir einen Radius von 15 cm festgelegt, welchen wir mithilfe eines Zirkels auf das Holz skizzierten. Auf dieser Höhe haben wir anschließend jeweils vier Löcher mit einem Durchmesser von ca. 9 cm und in 90 Grad Abständen herausgeschnitten. In diese sollten die acht ringförmigen Magneten eingesetzt werden und bilden somit unseren Rotor. Die Magneten verfügen über einen Durchmesser von 80mm, wobei das Loch über einen Durchmesser von 40mm verfügt. Wir entschieden uns für ringförmige Magneten, da wir vorerst die Idee hatten, die Magneten mithilfe des Lochs zu befestigen. Die Fixierung der Magneten haben wir jedoch mit anderen Mitteln gelöst. Bei den Magneten haben wir uns für sog. Ferrit-Magneten entschieden.



Abbildung 56: Ferritmagnete (Eigene Abbildung)

Diese sind – anders als Neodym-Magneten – besonders hitze-, und feuchtigkeitsbeständig. Zudem verfügen die von uns verwendeten Magneten über ein besonders starkes Magnetfeld und sind somit in der Lage, mehrere Kilos an Gewicht zu tragen. Bei der Anbringung der Magneten haben wir auf eine Versetzung hinsichtlich der Pole geachtet. Somit haben wir die Magneten auf ihre Pole getestet und mit abwechselnden Polen vorsichtig in die Rotorplatten bzw. in die passenden Löcher eingesetzt.



Abbildung 57: Rotorplatten mit Abdeckung (Eigene Abbildung)



Abbildung 58: Rotorplatten mit Polsterung (Eigene Abbildung)

Dementsprechend haben wir noch mithilfe von klebbaren Schaumstoffstreifen die Magneten – so gut es geht – vor dem Zerbrechen in den leicht größer ausgeschnittenen Löchern bewahren und etwas fester fixieren können.



Abbildung 59: Eingesetzte Ringmagneten (Eigene Abbildung)

Anschließend wurden die Scheiben mit dünnen Sperrholzplatten mit einer Dicke von ca. 4 mm von beiden Seiten mithilfe von jeweils 12 Schrauben und Holzleim abgedichtet, um das Herausfallen der Magneten zu vermeiden. Auf einer Seite der Scheibe haben wir vier kleinere Löcher gebohrt mit etwa dem Durchmesser von 5 cm. Diese dienen dem späteren Einsetzen der Eisenkerne. Deren Wirkung wird im späteren Verlauf der Projektarbeit noch genauer erläutert.



Abbildung 60: Fertige Rotorplatte ohne Eisenkerne (Eigene Abbildung)

Nachdem nun die zwei Rotorplatten angefertigt und für das spätere Einsetzen der Eisenkerne zurechtgefugt wurden, haben wir folglich die Holzscheibe für den Stator ausgeschnitten. Dabei haben wir erneut aus der 2,5 cm dicken Holzplatte eine kreisförmige Haltevorrichtung mit Fußansatz für die Spulen ausgeschnitten. Auch hier beträgt der Durchmesser der Scheibe 30 cm. Für den Fußansatz haben wir an derselben Holzplatte an der Unterseite eine – sich zur Achse zuspitzende – Form im Winkel von 70 Grad herausgeschnitten und erhöhten so den Stator um 15 cm. Für das spätere Einsetzen der Spulen haben wir in den Stator drei Löcher jeweils mit dem Durchmesser von 6 cm gebohrt, welche zu 120 Grad versetzt gebohrt wurden. Fortlaufend haben wir an den Stator auf Höhe der vorher ausgeschnittenen Löcher jeweils zwei dünne Holzbretter angebracht und verschraubt. Anschließend wurden auch in diese drei 4 mm breite Löcher gebohrt, um im späteren Verlauf die Spulen anzubringen.



Abbildung 61: Statorplatte (Eigene Abbildung)



Abbildung 62: Stator ohne Spulen (Eigene Abbildung)

Dazu kamen auch zwei kleinere Holzvorrichtungen aus Eichenholz, welche wir an beiden Enden der Achse anbrachten und die den Zweck besitzen, die Achse zu stabilisieren.



Abbildung 63: Ständer (Eigene Abbildung)



Abbildung 64: Ständer mit Loch für das Kugellager (Eigene Abbildung)

Die Achse besteht aus einer M12 Gewindestange und hat eine Länge von 30 cm. Für die Drehbarkeit der Achse haben wir Kugellager verwendet. Die Kugellager verfügen über einen Durchmesser von 3,1 cm, wobei das Loch einen Durchmesser von 1,2 cm hat. Dementsprechend haben wir dafür in jede der fixierten Holzplatten ein 3,1 cm breites Loch gebohrt, um durch diese die Kugellager einzusetzen.



Abbildung 65: Eingehängte Achse (Eigene Abbildung)

Da jedoch der Rotor bzw. die beweglichen Rotorplatten fest mit der Achse verbunden werden mussten, wurden in diese entsprechend dem Durchmesser der Achse auch 1,2cm breite Löcher hineingebohrt und im Anschluss abgeschliffen. An diese Achse wurden dann die beiden Rotorplatten mithilfe von M12 Muttern fixiert.

Die Konstruktion der Spulen

In unserem Generator sind drei Spulen in dem Stator eingebaut. Diese haben wir selbst hergestellt, um sie auf unsere individuellen Anforderungen maßlich abstimmen zu können. Dafür haben wir von einem ca. 2,5 cm breiten Besenstiel jeweils drei ca. 1 cm lange Stücke abgeschnitten. Anschließend haben wir aus einer dünnen Nadelholzplatte jeweils sechs Scheiben mit einem Durchmesser von 5 cm ausgeschnitten und abschließend abgeschliffen.



Abbildung 66: Trennwände der Spulen (Eigene Abbildung)



Abbildung 67: Holzkerne der Spulen (Eigene Abbildung)

Sie sorgen dafür, dass der aufgespulte Draht nicht verrutscht. Die Holzscheiben haben wir mithilfe von Holzleim an die vorher ausgeschnittenen Stücke des Besenstiels festgeklebt und über Stunden hinweg in der Sonne trocknen lassen.



Abbildung 68: Trocknende Spule (Eigene Abbildung)



Abbildung 69: Spulenhalterung (Eigene Abbildung)

Anschließend haben wir in die Spulen ca. 3 mm breite Löcher hineingebohrt, um diese später an der entsprechenden Holzplatte, bzw. dem Stator mithilfe von Schrauben zu befestigen. Für die drei verbauten Spulen haben wir vorerst 700 m an 0,1 mm dicken Kupferdraht gekauft. Dieser Draht wurde anschließend auf die von uns vorher angefertigten Holzhalterungen aufgespult. Dafür verwendeten wir einen Akkubohrer, an welchen wir die Holzhalterungen festklemmten und vorsichtig den Kupferdraht aufgespult haben. So konnten wir den Draht auf unsere Halterungen aufteilen. Dabei haben wir oftmals mit unseren Händen den Draht in die Spule geführt und so ein gleichmäßigeres Aufspulen ermöglichen können.

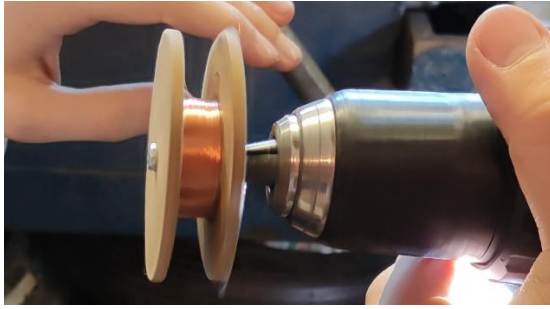


Abbildung 70: Aufspulen des Kupferdrahtes (Eigene Abbildung)



Abbildung 71: Fast aufgebrauchter Kupferdraht (Eigene Abbildung)

Letztendlich stellte sich jedoch heraus, dass die 700 m an Kupferdraht unzureichend waren und wir erhielten drei unterschiedlich aufgefüllte Spulen.



Abbildung 72: Ungleichmäßig gefüllte Spulen (Eigene Abbildung)

Aus diesem Grund besorgten wir weiteren Kupferdraht in einer Länge von 1000 m, löteten diesen an den bereits aufgespulten Kupferdraht der Spulen und spulten auch diesen weiter mithilfe eines Akkuschaubers auf.



Abbildung 73: Verlöten der Drahtenden (Eigene Abbildung)

Zudem kam es öfters vor, dass der dünne Draht gerissen ist und wir gezwungen waren, diesen wieder zusammenzulöten oder ggf. den Draht beim Aufspannen durch leichtes Festhalten zu stützen. Jedoch sind beim Löten die Isolierungen des Drahtes geschmolzen, weshalb wir den Draht anschließend noch mit Klebeband nachträglich isolieren mussten.



Abbildung 74: Fertige Spule (Eigene Abbildung)



Abbildung 75: Eingesetzte Spulen (Eigene Abbildung)

Die Spulen wurden im Anschluss daran an die vorher angebrachten Holzbretter mithilfe von M4-Gewindeschrauben und Unterlegscheiben mit Muttern befestigt.

Die Montage auf der Basisplatte

Die gesamte Konstruktion galt es anschließend auf einer 2 cm dicken, 41 cm langen und 27 cm breiten Siebdruckplatte zu befestigen, um Standfestigkeit zu ermöglichen und den Transport des Generators zu vereinfachen. Dabei war es eine Herausforderung die vorher konstruierten Komponenten in gerader Linie passend zur Achse anzubringen und Verschiebungen bestmöglich zu vermeiden. Die Komponenten haben wir mithilfe von langen Schrauben von unterhalb der Platte angebracht. Die Rotorscheiben haben wir mithilfe von Unterlegscheiben und Muttern an der Achse befestigt.



Abbildung 76: Angebrachte Elemente des Stators (Eigene Abbildung)



Abbildung 77: Anbringung der wesentlichen Elemente (Eigene Abbildung)

Zudem musste der Generator noch durch eine Drehkraft angetrieben werden. Der erste Gedanke war bei uns eine Kurbel. Die Überlegung, eine Zahnradübersetzung oder Riemenübersetzung einzubauen, um für ein schnelleres Drehmoment zu

sorgen, wurde von uns jedoch nicht umgesetzt. Für die Kurbel haben wir ein rundes 8 cm langes, 2,5 cm breites und abgeschliffenes Stück Holz versetzt an eine 10 cm lange, 4 cm breite und 1 cm dicke Holzplatte angeschraubt. An das andere Ende der Holzplatte wurde ein 1,2 cm breites Loch mit dem Durchmesser der Achse gebohrt, um die Kurbel im Anschluss mithilfe von zwei Muttern an der Achse zu befestigen. Nach der Montierung der Komponenten auf der Basisplatte und dem Anbringen der Kurbel hat der Generator seine maximalen Ausmaße erreicht. Insgesamt verfügt dieser somit über eine Höhe von 42,5 cm, einer Breite von 29,5 cm und einer gesamten Länge von 44 cm.

Die Verlotung

Obwohl nun die Grundkonstruktion so weit abgeschlossen war, hatte der Generator zu diesem Zeitpunkt jedoch noch keine Funktionalität. Der nächste Schritt war somit das Verlöten der Spulen, damit der Generator schlussendlich eine Spannung induzieren konnte. Wir verlöteten also die insgesamt sechs verschiedenen Kabel der Spulen mit einer Leiterplatte. Daraufhin führten wir die Kabel an den Rändern des Stators hoch und verklebten diese mithilfe von Klebeband.



Abbildung 78: Befestigung der Kabelverbindungen (Eigene Abbildung)



Abbildung 79: Verlegte Kabel von der Leiterplatte zu den Spulen (Eigene Abbildung)

Wir entschieden uns zu Beginn für die Umsetzung einer Dreieckschaltung. Dies stellte sich für uns aber nicht als sehr zweckvoll heraus, da sich so bei der Messung immer nur an einer Spule ein Induktionsstrom vernehmen ließ. Aufgrund dessen haben wir uns dafür entschieden, unsere eigenen Ideen in die Schaltung mit einzubringen und haben also auf die Dreieckschaltung verzichtet. Die jeweils zwei Enden des Drahtes der drei Spulen gaben zu diesem Zeitpunkt drei verschiedene Wechselströme ab. Diese hätten sich womöglich durch eine fehlerhafte

Versetzung gegenseitig aufheben können. Zudem wollten wir Leuchtdioden betreiben, welche eine Gleichspannung benötigen. Um letztendlich Gleichströme zu erhalten, mussten mithilfe von drei Gleichrichtern zu jeder der drei Spulen die Wechselströme in Gleichströme umgewandelt werden. Dafür besorgten wir drei Brückengleichrichterdiode.



Abbildung 80: Kondensator (Eigene Abbildung)

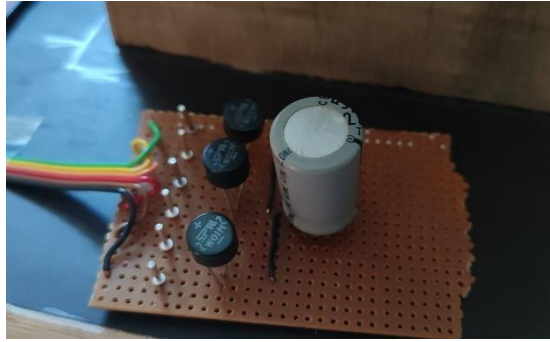


Abbildung 81: Unfertige Leiterplatte (Eigene Abbildung)

Diese verfügen über vier Kontakte, wovon zwei davon für den einfließenden Wechselstrom und zwei Kontakte für den umgewandelten Gleichstrom gedacht sind. Zwischen den Eingängen der Spulen und den Eingängen der Gleichrichter haben wir jeweils immer eine kleine Kontaktstelle zwischengelötet. Dies ermöglichte uns das Messen der Werte der einzelnen Spulen. Nachdem wir die Gleichrichter mit eingebracht hatten, haben wir jeweils die zwei Kontakte der drei Gleichrichter mit einem Kondensator, mit einer Kapazität von $220 \mu\text{F}$ und einer maximalen Spannung von 50 V in Reihe geschaltet.

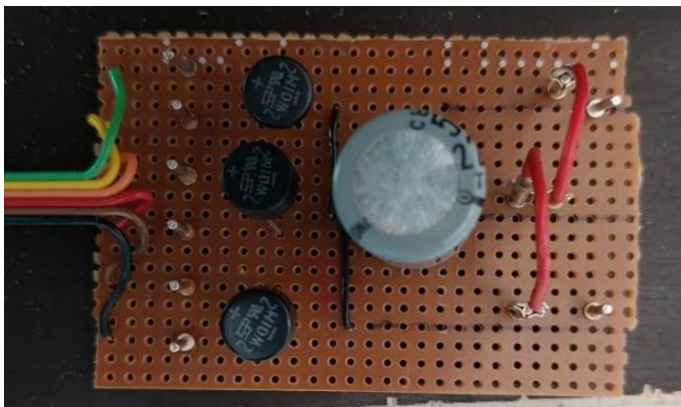


Abbildung 82: Fertige Leiterplatte (Eigene Abbildung)

Diese hatte zum einen die Funktion, die elektrische Ladung zu speichern und zum anderen die Funktion, den gewellten resultierenden Strom zu glätten. Die Gleichrichter bewirkten bei dem Wechselstrom nur das Verhindern des Zurücklaufens des Stroms bzw. des Abfallens des Stroms in den negativen Bereich. Mithilfe des Kondensators resultiert aus diesem durch die Speicherung

der elektrischen Energie ein Strom mit annähernd konstanter Änderung. Dafür haben wir eine kleine Leiterplatte besorgt, diese verfügt jedoch nur über Leiterbahnen, welche geradlinig verlaufen. Um nun einen Stromkreis zu schaffen, mussten wir kurze Drahtstücke zwischen den Leiterbahnen, auf denen die Anschlüsse der Gleichrichter verlötet sind, und den Leiterbahnen, auf denen die Anschlüsse des Kondensators verlötet sind, als Brückenelemente miteinander verbinden.

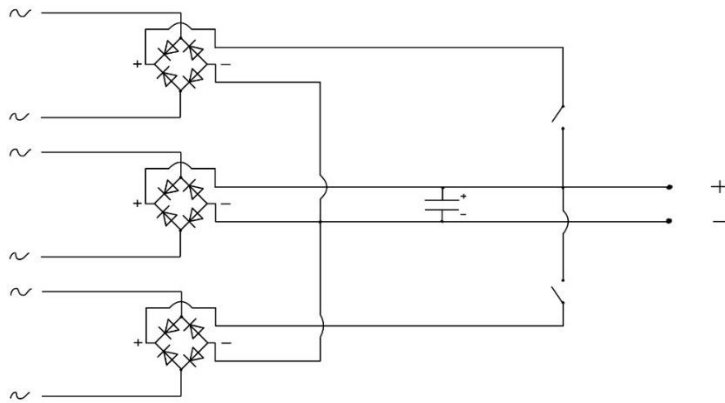


Abbildung 83: Schaltskizze der Leiterplatte (Eigene Abbildung)

7.3. Verbesserungen und endgültige Fertigstellung

Folglich haben wir die Holzplatte, auf welcher die gesamte Vorrichtung des Generators befestigt wurde, noch vor dem Verrutschen absichern wollen, da beim Betätigen der Kurbel die Konstruktion zu rutschen begann. Aufgrund dessen haben wir Anti-Rutsch-Pads aus Silikon an der Unterseite der Platte angebracht. Da deren Klebewirkung unzureichend war, wurden diese folglich durch besser Haftende ausgetauscht. Nun war der Generator beim Betätigen der Kurbel vor dem Verrutschen geschützt und wir konnten unsere Experimente an unserem Generator vorerst unbehindert fortführen. Im späteren Verlauf haben wir jedoch gemerkt, dass für eine höhere resultierende Induktionsspannung mehr Windungen an den Spulen von Nöten sind.



Abbildung 84: Eisenkerne (Eigene Abbildung)

Zudem war dies der Anlass, die Eisenkerne zu besorgen. Aus diesem Grund haben wir neuen Draht besorgt, die Spulen ausgebaut, die Drähte miteinander verlötet und anschließend mithilfe eines Akkubohrers weiter auf unsere Spulen aufgespult. Die Eisenkerne haben wir durch einen Metallbau-Betrieb nach Maß anfertigen lassen, siehe Abbildung 85.

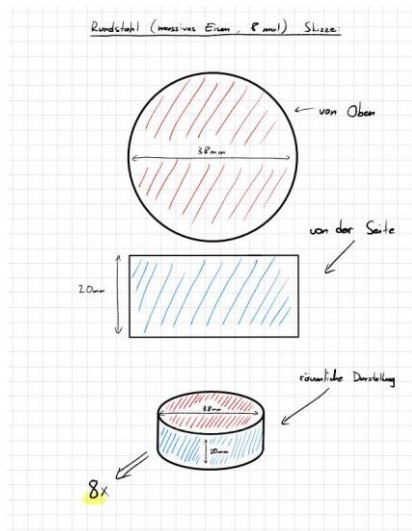


Abbildung 85: Eisenkerne Skizze (Eigene Abbildung)



Abbildung 86: Rotorplatten mit Eisenkernen (Eigene Abbildung)

Zuerst haben wir dafür eine Skizze erstellen müssen, welche wir an den Metallbau-Betrieb zugesendet haben. Die Eisenkerne bestehen aus massivem Eisen und wurden für uns auf einen Durchmesser von 38 mm und auf eine Höhe von 20 mm genau zugeschnitten und passend abgeschliffen. Somit ist deren Radius um 1 mm kleiner als der der Löcher der Magneten. So ließen sich diese sehr gut und einfach in die Löcher der Magneten einsetzen.

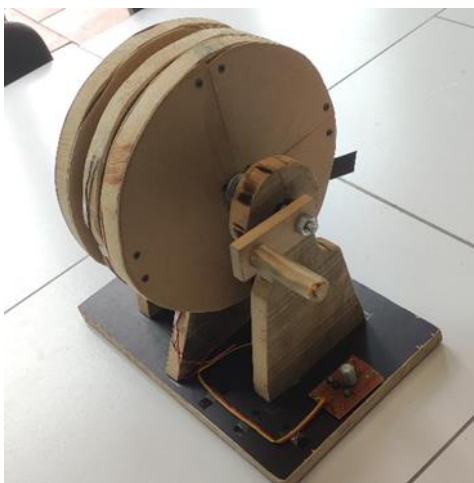


Abbildung 87: Fertiger Generator (Eigene Abbildung)

Der finale Generator ergab sich also aus dem vorerst konstruierten Generator mitsamt den später eingesetzten Eisenkernen. Wir hatten nun unser Ziel erreicht und konnten mithilfe unseres Generators Strom erzeugen.

8. Bau des Generators: Auswertung

8.1. Fehlerbehebung und Durchführung von Messungen

Unser Generator war in der Lage, eine kleine LED kurz aufleuchten zu lassen, kam dabei jedoch schon an seine Grenzen. Ein einfaches Fahrradrücklicht war nicht möglich zu betreiben. Aufgrund dessen wollten wir den Generator hinsichtlich der Leistung verbessern. Somit haben wir also mehr Draht auf die Spulen aufgespult und die Eisenkerne eingebaut, welche die Induktivität der Magneten steigern sollten. Bevor wir dies jedoch taten, nahmen wir Messwerte für die resultierende Spannung ohne und mit Eisenkernen auf. Es zeigte sich jedoch eine Abnahme der Spannung nach dem Einsetzen der Eisenkerne. Wir waren uns sicher, dass es zu einem Anstieg der Spannung kommen würde und haben dabei die Stromstärke außer Acht gelassen und nicht mitgemessen. Wir benötigten jedoch eine Erklärung für die Abnahme der Spannung, weshalb wir, um die Ursache herauszufinden, auch Messwerte der Stromstärke aufnehmen wollten. Aufgrund dessen waren wir gezwungen, die Eisenkerne wieder auszubauen. Dies erwies sich jedoch als eine Herausforderung, da die Eisenkerne von den starken Ferritmagneten angezogen wurden und ein Schraubendreher beim Heraushebeln die zerbrechlichen Ferritmagneten zerkratzt oder sogar kleine Stücke der Magneten abbrachen.



Abbildung 88: Bohren von Löchern an den Rückseiten der Rotorplatten (Eigene Abbildung)

Somit haben wir uns dafür entschieden, kleine Löcher in die Rückwand der Rotorscheiben zu bohren, was auch riskant wäre, da beim Bohren die Ferritmagnete genauso, wenn nicht noch schlimmer beschädigt werden könnten.

Aber so wären wir in der Lage, mithilfe eines Stiftes oder Ähnlichem die Eisenkerne von der Rückseite herauszudrücken. Dafür haben wir unseren Daumen auf die Rückseite angelegt und so die Stellen markiert, an denen wir mit einer Standbohrmaschine die Löcher bohren mussten. Dieses Vorgehen hat gut funktioniert und wir waren in der Lage, ohne Aufwand die Eisenkerne wieder herauszudrücken. Danach führten wir verschiedene Messungen der Spannung und der Stromstärke unter verschiedenen Zuständen des Generators durch. Dafür versuchten wir, eine für alle Durchgänge des Versuches gleichbleibende Drehgeschwindigkeit einzuhalten und hielten die Umdrehungszahl bei etwa 150 Umdrehungen pro Minute.



Abbildung 89: Versuchsaufbau: Messung der Spannung und Stromstärke bei Rotorplatten mit und ohne Eisenkerne (Eigene Abbildung)

Durchgeführt haben wir den Versuch mithilfe einer Lichtschranke, welche für die Messung der Umdrehungszahl zuständig war und mit einem I-Pad für die Ausgabe der Messwerte verbunden war und auch ein Multimeter, welches an die Kontakte der Platine des Generators angeschlossen wurde. Die unten abgebildete Tabelle zeigt alle durchgeführten Versuche, bei denen wir unterschiedliche Stellungen der Rotorplatten und auch verschiedene Anzahlen der Eisenkerne ausprobierten. Bei den Rotorplatten bestanden die Optionen, die Platten so zu drehen, dass die abwechselnden Pole der Magneten in den jeweiligen Platten für eine Anziehung oder ein Abstoßen der Platten sorgten. Zudem konnten wir die Platten so drehen, dass die Pole versetzt zueinanderstanden. Bei den Eisenkernen hatten wir die Optionen, diese entweder gar nicht, in nur eine Platte vollständig oder in beide Platten vollständig einzusetzen.

Spannung in V	Strom in mA	Leistung in W	Umdrehungen pro Minute	Anzahl der Platten	Anzahl der Eisenkerne	Magneten Stellung	Eisenkerne Stellung
3,981	2,4	0,0095544	150	1	0	Keine	Keine
8	4,1	0,0328	150	2	0	Versetzt	Keine
1,312	0,34	0,00044608	150	2	0	Gleichpolig	Keine
5,8	0,6	0,00348	150	2	0	Ungleichpolig	Keine
6,35	1,65	0,0104775	150	1	4	Keine	Alle ausgefüllt
6,8	3,6	0,02448	150	2	8	Versetzt	Alle ausgefüllt
5,56	0,54	0,0030024	150	2	8	Gleichpolig	Alle ausgefüllt
7	5,1	0,0357	150	2	8	Ungleichpolig	Alle ausgefüllt
7,3	3,8	0,02774	150	2	4	Versetzt	Eine gefüllt andere Leer
4,1	1,2	0,00492	150	2	4	Gleichpolig	Eine gefüllt andere Leer
7,3	4,9	0,03577	150	2	4	Ungleichpolig	Eine gefüllt andere Leer

Abbildung 90: Tabellarische Auswertung des Versuchs aus Abbildung 89 (Eigene Abbildung)

Betrachtet man die resultierenden Spannungen, fällt sofort auf, dass diese bei einer versetzten Stellung der Magnetpole mit 8 V, jedoch auch unter Auslassung der Eisenkerne, am höchsten ausfällt. Auch die Leistung von 0,0328 W fällt unter diesen Bedingungen am höchsten aus. Bei Nutzung der Eisenkerne und gleicher Stellung der Magnetpole zeigt sich jedoch eine Leistung von nur 0,02448 W. Es ist somit zu erkennen, dass sich die Leistung beim Einsetzen der Eisenkerne in der effektivsten bzw. versetzten Stellung der Magnetpole verschlechtert hat. Es zeigt sich also, dass für das Erreichen der Höchstspannung die Eisenkerne ausgelassen werden müssten. Dies entspricht nicht unseren Erwartungen. Was die Eisenkerne jedoch bewirken konnten, ist die Steigerung der Leistung bei der gleichpoligen und ungleichpoligen Stellung der Magneten, wobei wir eine Steigerung der Leistung bei gleichpoliger Stellung von 0,00044 W auf 0,003 W sowie eine Steigerung der Spannung von 1,312 V auf ganze 5,56 V bei Nutzung aller Eisenkerne erreichen konnten. Auch bei der ungleichpoligen Stellung zeigt sich unter selben Bedingungen ein Anstieg der Leistung von 0,00348 W auf 0,0357 W sowie der Spannung von 5,8 V auf 7 V. Es zeigt sich jedoch auch, dass, wenn nur die Magneten einer Platte Eisenkerne beinhalten, die Spannung mit 7,3 V und die Leistung mit 0,03577 W größer ausfällt als bei zwei mit Eisenkernen befüllten Platten mit einer Spannung von 7 V und einer Leistung von 0,0357 W. Es ist somit festzuhalten, dass bei Nutzung von Eisenkernen sich die Leistung erhöht, die Spannung jedoch abnimmt. Wie dieses Ergebnis zustande kam, ist für uns fragwürdig, jedoch konnten wir die Spannung und auch die Leistung unter bestimmten Bedingungen durch die Eisenkerne erhöhen. Um nun die maximale Spannung zu erlangen, wäre es möglich, aufgrund der Höchstleistung von 0,03577 W bei ungleichpoliger Stellung der Magneten und bei Nutzung von Eisenkernen in nur einer Rotorplatte einen Transformator zu nutzen.

9. Diskussion

In den Zügen unseres Projektes konnten wir durch die vielseitigen Experimente zur Induktion und durch das Bauen unseres Generators eine Menge an Wissen aufbauen. Wir haben sowohl die Experimente als auch die Konstruktion des Generators erfolgreich absolvieren und eine Menge Daten sammeln können. Trotzdem trat bei der Durchführung unseres Projektes eine Reihe an Schwierigkeiten auf. Eine große Schwierigkeit war wohl die Beschaffung unterschiedlichster Materialien. Zu Beginn unseres Projektes ließ sich Kupferdraht in hohen Mengen sehr einfach besorgen. Nachdem wir jedoch mehr Kupferdraht zum weiteren Aufspulen der Spulen benötigten, war dieser nur schwer zu beschaffen und nur mit erhöhtem Preis. Des Weiteren war es schwierig, die Eisenkerne zu beschaffen. Es hat Tage gedauert, sich zwischen verschiedenen Metallbau-Betrieben durchzutelefonieren und letztendlich die Empfehlung für einen geeigneten Metallbau-Betrieb zu erhalten. Zudem hat es mehrere Wochen gedauert und mehrere Anrufe sowie E-Mails gebraucht, um die Eisenkerne zum Einbauen vorliegen zu haben. Dieser Prozess hat sich sehr lange gestreckt und wir konnten erst spät mit den Eisenkernen arbeiten. Zudem war das spätere Wiederherausnehmen der Eisenkerne aus den Ringmagneten schwierig, da diese von den Magneten an ihrer Stelle gehalten wurden. Erst starke Stöße gegen die Rotorplatte halfen uns diese wieder herauszubekommen. Da so die leicht zerbrechlichen Ferritmagnete womöglich zu Schaden hätten kommen können, haben wir für das Ausnehmen der Magneten nicht nochmal das Zerstören der Magneten riskieren wollen. Deshalb haben wir, wie bereits beschrieben, kleine Löcher in die Rückseiten der Platten gebohrt. Des Weiteren haben wir die Spulen zu Beginn mit einer nur geringen Menge an Draht aufgespult, weshalb wir diesen mit erneuten 1000 m Kupferdraht erweitern konnten. Dabei kam es jedoch häufig dazu, dass uns der dünne Draht und aufgrund dessen auch das häufige Abbrechen des Drahtes die Arbeit erschwert haben. So waren wir oftmals gezwungen, einige Stellen neu zusammen zu löten. Auch die Leiterplatte bereitete uns einmalig Schwierigkeiten, als sich dort einzelne der empfindlichen Kontaktstifte lösten. Auch dies erforderte ein erneutes Anlöten. Wie auch das letzte Experiment gezeigt hat, hat sich die Spannung in effektivster Position der Rotoren eher verringert. Möglicherweise wäre die Anbringung der Magneten im Stator die bessere Option für eine höhere Leistung gewesen. Die Spulen in den Rotorplatten anzubringen wäre zwar ein umständlicheres Vorgehen gewesen und hätte Schleifkontakte gebraucht, hätte womöglich aber für eine größere Effektivität

gesorgt. Möglicherweise hätte die Anbringung der Eisenkerne in diese Spulen dann auch zur Steigerung der Leistung beigetragen. Betrachtet man die Effektivität unseres Generators, wäre dies womöglich die bessere Option gewesen, jedoch würde dies für uns als Schüler aufgrund des deutlich größeren Aufwands höchstwahrscheinlich unmöglich umzusetzen sein. Für die weitere Effektivierung des Generators hätten wir noch die Kurbel so ausbessern können, dass der Griff auch drehbar wäre und man mit der Hand mit weniger Aufwand kurbeln könnte. Zudem haben wir bereits über eine Zahnrad- sowie Riemenübersetzung nachgedacht, um den Generator schneller betreiben zu können. Eine Übersetzung haben wir jedoch aufgrund des beschränkten Zeitrahmens nicht umsetzen können. Kleine Misserfolge kamen zwar vor, hielten uns jedoch nicht davon ab, von großem Spaß bei unserem Vorgehen begleitet zu werden. Letztendlich haben wir trotz der vielen Misserfolge den Großteil unserer Ideen umsetzen können. Unser Generator erfüllt seinen Zweck, ist in der Lage, Strom zu erzeugen und uns eine Grundlage zum Experimentieren zu bieten. Wir haben an der Umsetzung dieses Projektes Spaß finden und zusätzlich eine Menge Erfahrung sammeln können.

10. Literaturverzeichnis

Chemie (20.05.2023). „Permeabilitätszahl“ In:

<https://www.chemie.de/lexikon/Permeabilit%C3%A4tszahl.html> (S.31)

Elektrotechnik Fachbuch (10.05.2023). „Grundlagen der Elektrotechnik“ In:

https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html
(S.16)

Leifiphysik (06.05.2023a). „Induktion und LORENTZ-Kraft“ In:

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft> (S.5)

Leifiphysik (06.05.2023b). „Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz“ In:

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/magnetischer-fluss-und-induktionsgesetz> (S.8)

Leifiphysik (07.05.2023c). „Kraft auf Stromleiter - E-Motor“ In:

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/kraft-auf-stromleiter-e-motor/versuche/elektromotor> (S.5)

Leifiphysik (10.05.2023d). „Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte“ In:

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte> (S.13)

Lernhelfer (06.05.2023a). „Generator“ In:

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/generator#>
(S.5,10,12)

Lernhelfer (19.05.2023b). „Entdeckung der elektromagnetischen Induktion“ In:

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/entdeckung-der-elektromagnetischen-induktion#> (S.6)

RP-Energie-Lexikon (07.05.2023a). „Generator“ In: <https://www.energielexikon.info/generator.html> (S.6)

RP-Energie-Lexikon (12.05.2023b). „Generator“ In: <https://www.energielexikon.info/drehstrom.html> (S.18)

Teprosa (06.05.2023). „Rotor und Stator im Elektromotor“ In: <https://www.teprosa.de/rotor-und-stator/> (S.5)

Uni-Göttingen (10.05.2023). „Anwendungen der Diode“ In: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6787> (S.17)

Wikipedia (06.05.2023). „Elektrischer Generator“ In: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Generator (S.5,6)

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Drehstromgenerator (20.05.2023). aus: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c4/Generator.svg/330px-Generator.svg.png	4
Abbildung 2: Wechselstromerzeuger – Pixii (06.05.2023) aus: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Wechselstromerzeuger.jpg	5
Abbildung 3: Bewegter Leiter im B-Feld (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	8
Abbildung 4: Lorentzkraft wirkt auf Elektronen (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	8
Abbildung 5: Ladungsdifferenz (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	9
Abbildung 6: Kräftegleichgewicht (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	9
Abbildung 7: Eintreten einer Leiterschleife in ein B-Feld (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	9
Abbildung 8: Austreten einer Leiterschleife aus einem B-Feld (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	9

Abbildung 9: Keine Änderung des B-Feldes bewirkt keine Induktionsspannung (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	10
Abbildung 10: Drehende Leiterschleife im Magnetfeld (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	11
Abbildung 11: Waagrecht zum B-Feld ausgerichtete Leiterschleife (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	11
Abbildung 12: Senkrecht zum B-Feld ausgerichtete Leiterschleife (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	11
Abbildung 13: Kleiner werdende Leiterschleife (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	12
Abbildung 14: Kleine Leiterschleife (06.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft	12
Abbildung 15: Sinusförmig verlaufende Magnetische Flussdichte (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte	13
Abbildung 16: Sinusförmig verlaufender Magnetischer Fluss (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte	13
Abbildung 17: Sinusförmig verlaufende Induktionsspannung (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte	13
Abbildung 18: Bewegte Leiterschaukel im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel	14
Abbildung 19: Ladungstrennung in der Leiterschaukel (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel	14
Abbildung 20: Stromfluss durch Leiterschaukel (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel	14
Abbildung 21: Lorentzkraft wirkt auf die Leiterschaukel abbremsend (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel	14
Abbildung 22: Linke-Hand-Regel (10.05.2023) aus: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Linke-Hand-Regel.svg	15

Abbildung 23: Verdichtung von Feldlinien bei einem Eisenkern im Magnetfeld (10.05.2023) Screenshot aus: https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html	16
Abbildung 24: Graphische Darstellung einer pulsierenden Gleichspannung (10.05.2023) Screenshot aus: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6787	17
Abbildung 25: Stromkreis mit Diode (10.05.2023) Screenshot aus: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6787	17
Abbildung 26: Graphische Darstellung einer Gleichspannung mit Halbwellen (10.05.2023) Screenshot aus: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6787	17
Abbildung 27: Stromkreis mit Graetz-Schaltung (10.05.2023) Screenshot aus: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6787	17
Abbildung 28: Dreiphasengenerator (12.05.2023) aus: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Simpel-3-faset-generator.gif	18
Abbildung 29: Stern- und Dreieckschaltung (12.05.2023) aus: https://www.elektrollerforum.de/imagewrapper/?url=http://www.elektroschneebeli.ch/schaltungen/dsgenerator/drehstrom.jpg	18
Abbildung 30: Graphische Darstellung phasenverschobener Wechselspannungen (12.05.2023) Screenshot aus: https://www.energie-lexikon.info/phase.html	19
Abbildung 31: Versuchsaufbau: Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte (Eigene Abbildung).....	19
Abbildung 32: Schaltplan zum Versuchsaufbau aus Abbildung 31 (12.05.2023) Screenshot aus: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/versuche/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte-demonstrationsversuch	20
Abbildung 33: Spulen mit unterschiedlichen Durchmessern (Eigene Abbildung)	21
Abbildung 34: Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen (Eigene Abbildung)	21
Abbildung 35: Spulen mit unterschiedlicher Länge (Eigene Abbildung).....	21
Abbildung 36: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 26 mm Durchmesser; 2,2 Ω ; 330 μH ; 1,2 A (Eigene Abbildung)	22
Abbildung 37: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 33 mm Durchmesser; 2,8 Ω ; 530 μH ; 1,2 A (Eigene Abbildung)	22
Abbildung 38: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 3,5 Ω ; 800 μH ; 1,2 A (Eigene Abbildung)	23
Abbildung 39: Auftragung der induzierten Spannung gegen den Durchmesser (Eigene Abbildung)	23
Abbildung 40: Messverlauf bei einer Spule: 75 Wdg.; 26 mm Durchmesser; 0,15 Ω ; 24 μH ; 4 A (Eigene Abbildung)	24
Abbildung 41: Messverlauf bei einer Spule: 150 Wdg.; 26 mm Durchmesser; 0,3 Ω ; 90 μH ; 4 A (Eigene Abbildung)	24
Abbildung 42: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 26 mm Durchmesser; 2,2 Ω ; 330 μH ; 1,2 A (Eigene Abbildung)	25

Abbildung 43: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Windungszahl (Eigene Abbildung)	25
Abbildung 44: Messverlauf bei einer Spule: 100 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 1,1 Ω ; 200 μH ; 1,2 A; 5,5 cm Länge (Eigene Abbildung).....	26
Abbildung 45: Messverlauf bei einer Spule: 200 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 2,2 Ω ; 500 μH ; 1,2 A; 10,7 cm Länge (Eigene Abbildung).....	26
Abbildung 46: Messverlauf bei einer Spule: 300 Wdg.; 41 mm Durchmesser; 3,5 Ω ; 800 μH ; 1,2 A; 16,2 cm Länge (Eigene Abbildung).....	27
Abbildung 47: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Spulenlänge (Eigene Abbildung)	27
Abbildung 48: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Durchmesser (Eigene Abbildung)	28
Abbildung 49: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Windungszahlen (Eigene Abbildung)	29
Abbildung 50: Auftragung der induzierten Spannung gegen die Stromänderungsrate für verschiedene Spulenlängen (Eigene Abbildung).....	29
Abbildung 51: Versuchsaufbau: Untersuchung von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld (Eigene Abbildung)	30
Abbildung 52: Auftragen von verschiedenen Entladungskurven (Eigene Abbildung)	31
Abbildung 53: Erste Skizze für den Generator (Eigene Abbildung)	32
Abbildung 54: Nadelholzplatte (Eigene Abbildung).....	34
Abbildung 55: Rotorplatten mit ausgeschnittenen Löchern (Eigene Abbildung)..	34
Abbildung 56: Ferritmagnete (Eigene Abbildung)	34
Abbildung 57: Rotorplatten mit Abdeckung (Eigene Abbildung).....	35
Abbildung 58: Rotorplatten mit Polsterung (Eigene Abbildung)	35
Abbildung 59: Eingesetzte Ringmagneten (Eigene Abbildung).....	35
Abbildung 60: Fertige Rotorplatte ohne Eisenkerne (Eigene Abbildung)	36
Abbildung 61: Statorplatte (Eigene Abbildung).....	36
Abbildung 62: Stator ohne Spulen (Eigene Abbildung).....	36
Abbildung 63: Ständer (Eigene Abbildung).....	37
Abbildung 64: Ständer mit Loch für das Kugellager (Eigene Abbildung).....	37
Abbildung 65: Eingehängte Achse (Eigene Abbildung)	37
Abbildung 66: Trennwände der Spulen (Eigene Abbildung)	38
Abbildung 67: Holzkerne der Spulen (Eigene Abbildung).....	38
Abbildung 68: Trocknende Spule (Eigene Abbildung)	38
Abbildung 69: Spulenhalterung (Eigene Abbildung)	38
Abbildung 70: Aufspulen des Kupferdrahtes (Eigene Abbildung).....	39
Abbildung 71: Fast aufgebrauchter Kupferdraht (Eigene Abbildung).....	39

Abbildung 72: Ungleichmäßig gefüllte Spulen (Eigene Abbildung)	39
Abbildung 73: Verlöten der Drahtenden (Eigene Abbildung)	39
Abbildung 74: Fertige Spule (Eigene Abbildung).....	40
Abbildung 75: Eingesetzte Spulen (Eigene Abbildung)	40
Abbildung 76: Angebrachte Elemente des Stators (Eigene Abbildung)	40
Abbildung 77: Anbringung der wesentlichen Elemente (Eigene Abbildung).....	40
Abbildung 78: Befestigung der Kabelverbindungen (Eigene Abbildung).....	41
Abbildung 79: Verlegte Kabel von der Leiterplatine zu den Spulen (Eigene Abbildung)	41
Abbildung 80: Kondensator (Eigene Abbildung).....	42
Abbildung 81: Unfertige Leiterplatine (Eigene Abbildung)	42
Abbildung 82: Fertige Leiterplatine (Eigene Abbildung).....	42
Abbildung 83: Schaltskizze der Leiterplatine (Eigene Abbildung)	43
Abbildung 84: Eisenkerne (Eigene Abbildung)	43
Abbildung 85: Eisenkerne Skizze (Eigene Abbildung).....	44
Abbildung 86: Rotorplatten mit Eisenkernen (Eigene Abbildung)	44
Abbildung 87: Fertiger Generator (Eigene Abbildung).....	44
Abbildung 88: Bohren von Löchern an den Rückseiten der Rotorplatten (Eigene Abbildung)	45
Abbildung 89: Versuchsaufbau: Messung der Spannung und Stromstärke bei Rotorplatten mit und ohne Eisenkerne (Eigene Abbildung)	46
Abbildung 90: Tabellarische Auswertung des Versuchs aus Abbildung 89 (Eigene Abbildung)	47

