

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

Der Stromerzeuger – Von der Spule bis zum Licht:

Die Untersuchung naturwissenschaftlicher Phänomene
unter energetischen Aspekten



Animation 1: 3D-Modell unseres Generators

Projektarbeit im Projektkurs Naturwissenschaften

von

Jan Lukas Voßhans

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

Inhaltsverzeichnis

1	Die Entscheidung zum Thema.....	4
2	Die Prinzipien eines Generators	5
2.1	Was ist ein Generator?.....	5
2.2	Die Historie / Entdeckung der Induktion	6
2.3	Das Phänomen der Induktion.....	7
2.4	Induktion durch die Bewegung eines separaten Leiters durch ein Magnetfeld.....	8
2.5	Die bewegte Leiterschleife im Magnetfeld.....	9
2.6	Die Induktion durch die Änderung der Spulengröße.....	13
2.7	Induktion mit Hilfe der Winkeländerung durch die Drehung einer Leiterschleife in einem Magnetfeld.....	14
2.8	Die Magnetfeldänderung um eine Leiterschleife	15
2.9	Das Faraday'sche Induktionsgesetz	16
2.10	Die Lenz'sche Regel	17
2.11	Wechselstrom zu Gleichstrom: Der Gleichrichter	18
2.12	Mögliche Effektivierungen eines Generators	19
2.13	Der Drei-Phasen-Generator.....	21
3	Experimente zur Induktion	23
3.1	Die Erforschung der Induktionsgesetze.....	23
3.1.1	Aufbau und Durchführung.....	23
3.1.2	Auswertung	25
3.2	Die Untersuchung verschiedener Kerne von Spulen.....	33
3.2.1	Aufbau und Durchführung.....	33
3.2.2	Auswertung	34
4	Der Bau des Generators	37
4.1	Planung.....	37
4.2	Rotorplatten.....	38
4.2.1	Befestigungsformen	38
4.2.2	Die Magneten in den Rotorplatten.....	38
4.3	Der Stator	41
4.3.1	Spulen	41
4.4	Die seitlichen Stützen	45
4.5	Die Grundplatte.....	46
4.6	Die Schaltung.....	46
4.7	Die Kurbel.....	47
4.8	Der Zusammenbau	48

5	Auswertung des Generators - Problembehebungen und Verbesserungen ..	48
6	Diskussion	52
7	Literaturverzeichnis	54
7.1	Inhalt	54
7.2	Animationen	56
7.3	Abbildungen	56
7.4	Diagramme	57
7.5	Tabellen	57

1 Die Entscheidung zum Thema

Kurz vor Beginn des elften Schuljahres stand meiner Gruppe und mir die Möglichkeit offen, an einem Projektkurs der Naturwissenschaften teilzunehmen. Nach reichlicher Überlegung und auch Ermutigungen von der entsprechenden Lehrerseite aus, kamen wir zu dem Schluss, die Chance zu nutzen, an unserem eigenen Projekt zu arbeiten und etwas zu verfolgen, das uns alle drei interessiert. Der Entschluss war somit gefallen und wir schrieben uns ein. Als dies geschehen war, stellte sich jedoch die Frage: Mit welchem Thema wollen wir uns in dem folgenden Jahr beschäftigen? Wir berieten uns. Dabei kamen uns verschiedenste Themen in den Sinn, auch ein paar eher unrealisierbare. Da einige damalige sowie heutige Probleme jedoch mit Energie in Verbindung standen bzw. stehen, bildete dies eine interessante Forschungsrichtung für uns. Mit dem Schlagwort „Energie“ im Kopf dachten wir nach, was das Potential dazu hätte, ein Schuljahr lang von unserer Gruppe, welche für uns schon von vornerein feststand, auch wenn noch nicht offiziell festgeschrieben, untersucht bzw. erforscht zu werden. Uns war bewusst, dass ohne zur Verfügung stehende Energie vieles nicht mehr funktionieren würde, da viel der heutigen Technik auf ihr basiert. Obendrein hielten wir während unseren Gesprächen oft unser Handy in der Hand und recherchierten nach möglichen Energiethemen. Auch diese funktionieren selbstverständlich unter Verwendung von Energie in elektrischer Form, sodass wir auch darüber nachdachten, in dieser Richtung zu forschen. Dies erschien uns nach weiterem Nachdenken jedoch irrsinnig, da der Kern von Energie schließlich in der Erzeugung liegt. Als mir der baldige Bau von Windkrafträdern in meiner Umgebung in den Sinn kam, brachte ich auch diese mit in unsere Überlegungen, sodass wir uns auch über mögliche Speicherungsformen von Energie und Energieumwandlung unterhielten. Wie die Stromerzeugung der Windkraftanlage stehen diese jedoch fast immer mit dem vorausgehenden Betreiben von Generatoren in Verbindung, was zur Folge hatte, dass wir auch auf diese zu sprechen kamen. Die Idee eines eigenen Generators mit dem dazugehörigen Gedanken selbst Energie mit Hilfe von Drehung zu erzeugen, sagte uns zu, da ein großer Teil des Stroms, der in unseren Steckdosen landet, so erzeugt wird. Doch wir stellten uns die Frage, ob so etwas von uns allein realisiert werden könne. Wir wussten zwar, dass wir es schon schaffen würden, etwas zusammenzuzimmern bzw. zu kreieren, dass wie ein Generator aussieht, doch wollten wir wenigstens eine Lampe damit betreiben können. Genau diese Überlegung stellte meine Gruppe und mir eine Herausforderung, die uns dazu verleitete, uns den Bau eines Generators der Marke Eigenbau vorzunehmen. Also diesen selbst zu kreieren und

zu verwirklichen. In Zuge dessen stellten wir uns die Arbeitsfrage: Schaffen wir es ohne tiefgreifende Vorkenntnisse einen Generator zu errichten? bzw. ist es (uns) möglich, selbst Energie durch einen eigenen Generator zu erzeugen, der nicht maschinell produktionsgenau erstellt wurde? Diese Fragen stellen nach wie vor auch unser Ziel dar, einen funktionsfähigen Stromgeneratoren zu fertigen. Für den später folgenden Bau brauchten wir jedoch zunächst ein Grundwissen über Generatoren. Dieses war teils schon vorhanden, wurde jedoch im Verlauf der elften Stufe bzw. der Q1 noch weiter gefestigt. Dies gelang uns unter anderem durch Experimente, die wir selbst durchführten, um die Angaben aus dem Internet besser verstehen und auch bestätigen zu können. Aus diesem Grund beginnt diese Arbeit anfänglich mit der Nennung der Prinzipien eines Generators bzw. der Induktion, damit verständlich wird, nach welchen Grundsätzen wir gemeinsam gearbeitet haben. Um diese zu belegen, folgen darauf die entsprechenden Experimente mit ihren daraus hervorgehenden geltenden Proportionalitäten. Anschließend wird der Bau des Generators beschrieben, worauf auch dieser ausgewertet und anschließend dargelegt wird, welche Verbesserungen und Problembhebungen wir an unserem Generator durchgeführt haben. Eine Bewertung des gesamten Projektes erfolgt nachfolgend in der Diskussion.

2 Die Prinzipien eines Generators

2.1 Was ist ein Generator?¹

Grundsätzlich lässt sich über jeden Generator sagen, dass er ein Gerät darstellt, mit dem es möglich ist, mechanische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Dabei liegt die mechanische Energie zumeist in Form einer Drehbewegung vor, die durch verschiedenste Apparaturen, Organismen oder auch Naturphänomene hervorgerufen werden kann.



Abbildung 1: Bild unseres Generators

Beispiele hierfür sind der Wind bei Windkraftanlagen, das Wasser bei Wasserkraftwerken in z.B. Staudämmen, verschiedenste erhitzte Gase oder Flüssigkeiten, die Turbinen in sämtlichen Kraftwerken betreiben oder auch der Mensch, der seine eigene Energie in organischer Form in Bewegungsenergie umwandelt und so einen Generator anreiben kann. Des Weiteren lässt sich sagen, dass ein jeder Generator nach dem Prinzip der

¹ <https://www.fischerfutureheat.de/generator/>

elektromagnetischen Induktion funktioniert und so durch ein Zusammenspiel aus einem sich ändernden Magnetfeld und einer Spule Strom generiert werden kann.

2.2 Die Historie / Entdeckung der Induktion²

Den Beginn der Entdeckung des Prinzips der soeben erwähnten elektromagnetischen Induktion stellt die um das Jahr 1800 aufgekommene Vermutung eines Zusammenhangs zwischen dem Magnetismus und der Elektrizität dar. Diese entstand, nachdem es Luigi Galvani (1737 - 1798) und Alessandro Volta (1745 - 1827) nach einigen Entdeckungen in der Elektrotechnik gelang, erste performante Elektrizitätsquellen zu konstruieren, mit denen ab dem Jahre 1800 verschiedenste Experimente in Bezug auf den Nutzen elektrischen Stromes durchgeführt wurden. Einer der bedeutendsten Anhänger jener Vermutung war der dänische Physiker Hans Christian Oersted, welcher 1820 durch Zufall bei der Zurschaustellung eines durch Elektrizität glühenden Drahtes die Ablenkung einer Kompassnadel nach Ein- und Ausschalten des Stromes bemerkte und so den magnetischen Einfluss eines elektrischen Stromes entdeckte. Er führte mehrere Experimente dieser Art durch und konnte so Gesetzmäßigkeiten für den Ausschlag durch die Richtung des in der Nähe fließenden Stromes festmachen. Diese Entdeckungen wurden in der darauffolgenden Zeit von mehreren Physikern aufgegriffen und weiterentwickelt. Der Grundstein für den heutigen Elektromotor oder das Stromstärkemessgerät zum Beispiel wurde darauf aufbauend von dem französischen Physiker André-Marie Ampère (1775 – 1836) gelegt. Der englische Forscher Michael Faraday (1791 – 1867)³ versuchte sich ebenfalls mit den Experimenten Oersteds. Dieser setzte sich jedoch 1822 eine andere Fragestellung. Er wollte dem Nachgehen, ob es möglich sei, nicht wie bereits bekannt durch Strom Magnetismus, sondern aus Magnetismus Strom zu erzeugen. Zunächst beschäftigte er sich jedoch mit der heutzutage sogenannten Influenz, nach der elektrische Ladungen auf einem Körper in Ruhelage auf einem zuerst ungeladenen Körper eine Ladungstrennung hervorrufen⁴. Der Grund dafür war seine Annahme, dass Ladungen in Bewegung bzw. elektrischer Strom Induktionsströme in anliegenden Leitern induziert. Auf Grund dessen, dass er in seinen Experimenten dies nicht nachweisen, sondern beobachten konnte, dass ein Induktionsstrom in benachbarten Leitern nur dann

² <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/entdeckung-der-elektromagnetischen-induktion#>

³ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/geschichte/michael-faraday-1791-1867>

⁴ <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/influenz>

entsteht, wenn er den Strom ein- oder ausschaltete, wurde ihm folgendes klar: Die Änderung des Magnetfeldes in der Nähe eines Leiter erzeugt einen Strom und somit nicht das Magnetfeld eines Leiters, in dem Strom fließt. Zehn Jahre nach dem Beginn seiner Nachforschungen war die elektromagnetische Induktion entdeckt. Faraday forschte weiter, sodass er herausfand, dass diese Änderung auch durch mechanische Bewegung eines Magnetfeldes erzeugt werden kann, es also möglich ist, aus Bewegung von magnetischen Feldern elektrischen Strom zu erzeugen. Nach drei Monaten stellte er die heute noch geltenden Grundsätze der Induktion auf und entwickelte die grundlegenden Versuche der Induktion. Auch kreierte er so den Prototypen bzw. das Grundmodell eines Generators und die Eventualität eines Elektromotors.



Abbildung 2: Faradays Generator

2.3 Das Phänomen der Induktion⁵

Wie man der Historie der Induktion entnehmen kann, beschreibt die elektromagnetische Induktion einen Vorgang, bei dem in einem elektrischen Leiter ein Strom und eine Spannung erzeugt werden können. Dies kann entweder durch die Bewegung eines solchen Leiters durch ein Magnetfeld hindurch oder mit der Änderung eines Magnetfeldes um diesen herum erfolgen. Jeder Generator funktioniert nach genau diesem Prinzip der elektromagnetischen Induktion, weshalb es nötig ist, dieses Phänomen genau zu verstehen, um die Funktion eines Stromerzeugers vollständig zu begreifen.

⁵ <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/grundversuche-zur-elektromagnetischen-induktion>

2.4 Induktion durch die Bewegung eines separaten Leiters durch ein Magnetfeld⁶

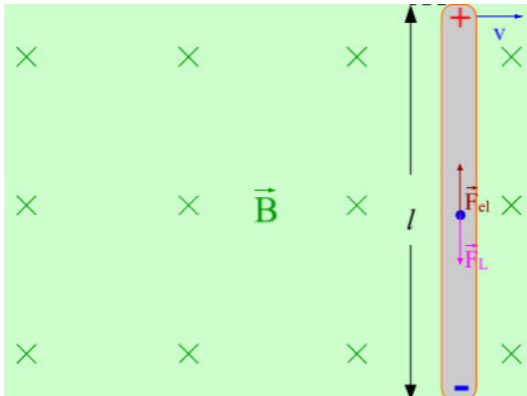


Abbildung 3: bewegter Leiter im homogenen Magnetfeld

Die elektromagnetische Induktion ist schon anhand eines einzelnen metallischen geraden Leiters zu erkennen. In Abbildung 3 ist ein solcher innerhalb eines homogenen Magnetfeldes, auch B-Feld genannt, vorzufinden, der mit der Geschwindigkeit v nach rechts verschoben wird. Die Feldlinien des B-Feldes stehen senkrecht zum elektrischen Leiter und sind, wie an ihrer Kennzeichnung durch das X zu erkennen, in die Abbildung hinein ausgerichtet. Durch das Zusammenspiel von jenem Feld und der Bewegung des senkrecht stehenden Leiters wirkt eine sogenannte Lorentzkraft F_L auf die Elektronen im Leiter. Der Grund dafür liegt darin, dass eine Lorentzkraft dann auf bewegte Ladungen wirkt, wenn sie sich in magnetischen Feldern befinden. Hierbei wirkt sie stets senkrecht zu sowohl der Bewegungsrichtung als auch zur Richtung der Magnetfeldlinien des B-Feldes, sodass sie in dem oben gezeigten Schaubild der Linken-Hand-Regel entsprechend nach unten gerichtet ist. Die Linke-Hand-Regel ist dabei eine Möglichkeit zur Bestimmung der Richtung der Lorentzkraft. Die drei Finger Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger werden hierbei jeweils senkrecht im 90° Winkel zueinander aufgestellt. Der Daumen entspricht hierfür der Richtung der Stromstärke, der Zeigefinger der Richtung der magnetischen Feldstärke (Magnetfeldlinien) und der Mittelfinger anschließend die Richtung der Lorentzkraft⁷. Da nun die freibeweglichen Elektronen (Ladungen) hier senkrecht nach unten zur



Abbildung 4: Darstellung der Linken-Hand-Regel

⁶ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>

⁷ <https://studyliflix.de/elektrotechnik/linke-hand-regel-6330>

Stromrichtung abgelenkt werden, bilden sich am unteren Ende des Leiters im oberen Beispiel ein Elektronenüberschuss (Überschuss an negativen Ladungen), da sich die negativen Ladungen der Elektronen dort summieren. Am oberen Ende des Leiters bildet sich daraus resultierend ein Elektronenmangel (Überschuss an positiven Ladungen), da die positiven Ladungen des Leiters nicht frei beweglich sind und somit den Ladungsunterschied nicht ausgleichen können. Der dadurch entstandene Ladungsunterschied lässt eine elektrische Kraft auftreten, die wiederum ebenfalls auf die Elektronen einwirkt, da diese dem Versuch der Wiederherstellung des Ladungsgleichgewichtes nachkommt. Jene Kraft wird mit jeder erfolgten Ladungstrennung stärker und wirkt somit der Lorentzkraft zunehmend deutlicher in die hier obere Richtung entgegen. Dies ist so lange der Fall, bis sich die Lorentzkraft und die elektrische Kraft ausgleichen. Die hier entstandene Ladungstrennung führt somit zu der Induktionsspannung U , welche mit dem Gleichsetzen der Formeln für die Lorentzkraft

$$F_l = e * v * B$$

und die elektrische Kraft

$$F_{el} = e * E = e * \frac{U_{ind}}{l}$$

hergeleitet werden kann, sodass für die Induktionsspannung gilt:

$$U_{ind} = -l * v * B.$$

Die entstandene Induktionsspannung ist zu diesem Zeitpunkt auf Grund der Regel von Lenz negativ (Näheres zur Regel wird im weiteren Verlauf dargestellt).

2.5 Die bewegte Leiterschleife im Magnetfeld⁸

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung einer Induktionsspannung in einem elektrischen Leiter ist die Änderung einer von einem B-Feld durchsetzten Fläche einer Leiterschleife. An die vorherige Darstellung angelehnt, wird nun statt einem einzelnen geraden Leiter ein rechteckiger Leiter in der Form eines Rahmens in ein homogenes Magnetfeld hineinbewegt. Dieser Leiter ähnelt folglich einer Spule mit nur einer einzelnen Windung.

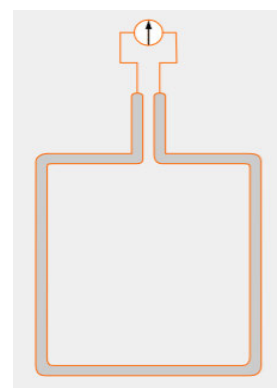


Abbildung 5: Leiterschleife

⁸ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>



Abbildung 6: Leiterschleife außerhalb des Magnetfeldes

Wie in der oberen Abbildung 6 zu sehen, ist das durch die mehreren X gekennzeichnete Magnetfeld weiterhin in die Abbildung hineingerichtet. Zum gezeigten Zeitpunkt null sind sowohl keine Bewegung als auch kein die Leiterschleife umgebendes B-Feld vorhanden.

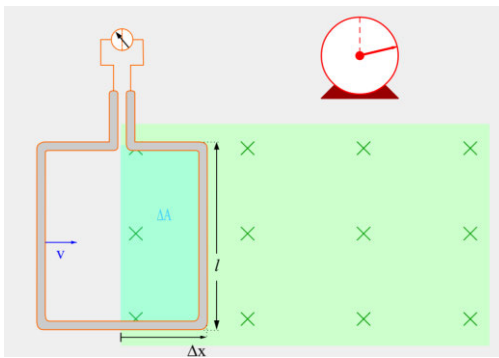


Abbildung 7: Leiterschleife in Bewegung, teils in das B-Feld eingedrungen

Wenn nun die Leiterschleife in Bewegung versetzt wird und in das Magnetfeld teilweise eindringt, lässt sich erneut das Wirken einer Lorentzkraft nach der Linken-Hand-Regel in die untere Richtung feststellen. Diese wiederum ruft eine elektrische Kraft in die entgegengesetzte Richtung hervor. Als Folge daraus ist am Voltmeter des Beispiels eine Spannung zu messen, da sich an der rechten oberen Seite ein Elektronenmangel und an der linken oberen Seite ein Elektronenüberschuss durch die entstandene Ladungstrennung ausbilden.

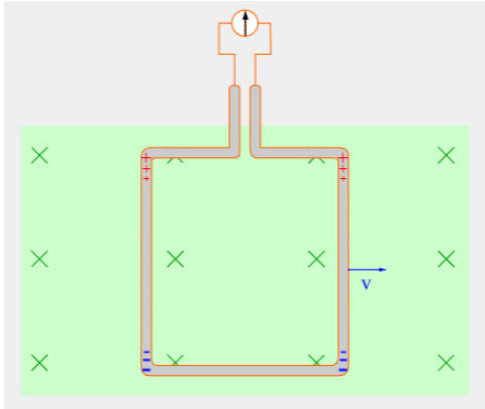


Abbildung 8: Leiterschleife vollständig in das B-Feld eingedrungen

Die zu messende Spannung bleibt jedoch ab dem Zeitpunkt aus, an dem sich die Leiterschleife vollständig im Magnetfeld befindet. Der Grund dafür liegt darin, dass nun beide Seiten der Leiterschleife im B-Feld durch ihre Bewegung eine Lorentzkraft erfahren. Als Folge daraus bilden sich an beiden oberen Seiten der Leiterschleife auf Grund der Ladungstrennung Überschüsse an positiven Ladungen aus. Es kann keine Spannung gemessen, da für eine solche zwei unterschiedliche Pole benötigt werden. Aus diesem Grund schlägt das Voltmeter in Abbildung 8 nicht aus.

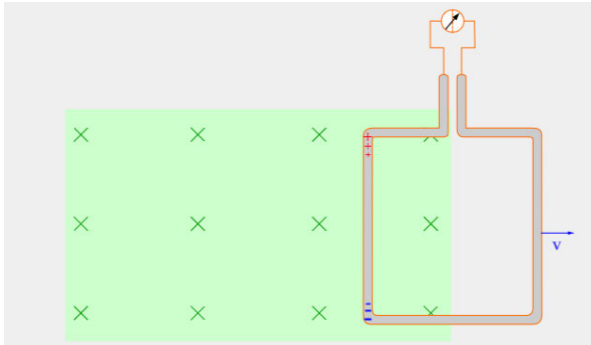


Abbildung 9: Austreten der Leiterschleife aus dem B-Feld

Bei einem Heraustrreten aus dem Magnetfeld ist erneut eine messbare Spannung festzustellen, da die Lorentzkraft, wie Abbildung 9 zu entnehmen, nur noch auf einer Seite wirkt, sodass die andere (hier rechte Seite) als Überschuss an negativen und die soeben genannte (hier linke obere) Seite als Überschuss an positiven Ladungen fungieren kann. Die entstehende Induktionsspannung hat dabei allerdings ein umgedrehtes Vorzeichen im Gegensatz zur Begebenheit in Abbildung 7, da die Pole durch das Herausfahren aus dem Magnetfeld in Bezug auf das Hereinfahren umgedreht wurden.



Abbildung 10: Leiterschleife aus B-Feld ausgetreten

Sobald die Leiterschleife aus dem B-Feld wieder heraustritt, ist keine Spannung mehr zu messen, da keine Lorentzkraft mit ihren entsprechenden Folgen mehr wirken kann.

Aus dem gesamten Beispiel lässt sich somit auf Grund der Auftritte von messbaren Spannungen zu spezifischen Zeitpunkten der Bewegung entnehmen, dass die entstehende Induktionsspannung von der zeitlichen Änderung der von einem Magnetfeld durchsetzten Fläche einer Leiterschleife abhängt. Demzufolge ist es nicht möglich, eine Induktionsspannung zu erzeugen, wenn es keine Änderung dieser Fläche (siehe Abbildung 8) gibt.

Für die Berechnung der Induktionsspannung einer Leiterschleife bzw. einer Spule, die auch mehr Windungen als eine besitzen kann, wird erneut die bereits bekannte Formel

$$U_{ind} = -l * v * B$$

betrachtet.

Da die Geschwindigkeit v durch dx/dt dargestellt werden kann, lässt sich dies für v einsetzen, sodass

$$U_{ind} = -l * \frac{dx}{dt} * B$$

gilt.

Da l und dx eine Fläche A darstellen, lässt sich außerdem schreiben:

$$U_{ind} = -B * \frac{dA}{dt}$$

Hieran lässt sich erkennen, dass die Induktionsspannung proportional zur Größe der Änderung der durchsetzten Fläche und Stärke des B-Felds ansteigt. Demzufolge ist es der Fall, dass je schneller die Änderung dieser Fläche durchgeführt wird, desto größer die resultierende Induktionsspannung ist. Der

Grund hierfür liegt erneut in der Lorentzkraft, da diese von der Geschwindigkeit abhängt, mit der die Elektronen der Leiterschleife durch das Magnetfeld bewegt werden, wie an der Formel

$$F_l = e * v * B$$

erkannt werden kann. Dies führt dazu, dass sowohl mit einer steigenden Geschwindigkeit als auch mit einem stärker werdenden B-Feld, die Lorentzkraft zunimmt und somit auch eine stärkere Ladungstrennung stattfindet, die zu einer höheren messbaren Spannung führt. Jene Werte können sich auch pro Umwicklung addieren, weshalb die Windungszahl N ebenfalls eine Größe in der Formel darstellen muss. Folglich gilt für die Induktionsspannung durch die Änderung der von einem B-Feld durchsetzten Fläche:

$$U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt}$$

2.6 Die Induktion durch die Änderung der Spulengröße⁹

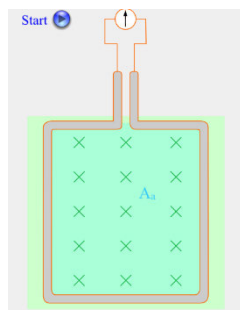


Abbildung 11: große Leiterschleife im Magnetfeld

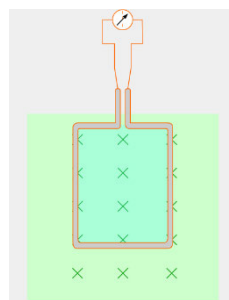


Abbildung 12: kleiner werdende Leiterschleife im Magnetfeld

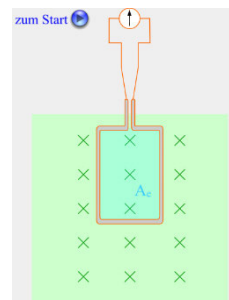


Abbildung 13: kleine Leiterschleife im Magnetfeld

Die Änderung der von einem magnetischen Feld durchsetzten Fläche einer Leiterspule, die zu einer Induktionsspannung führt, ist ebenfalls durch die Verkleinerung und die Vergrößerung des Flächeninhalts der Leiterschleife zu erreichen. Aus diesem Grund schlägt ein Voltmeter auch bei der Abänderung der Größe einer Leiterschleife (siehe Abbildung 12) aus. Auch hier ist die entstehende Induktionsspannung durch die Formel

$$U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt}$$

zu beschreiben.

⁹ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>

Verläuft die Verkleinerung bzw. Vergrößerung dabei gleichmäßig, lässt sich außerdem schreiben:

$$U_{ind} = -N * B * \frac{(A_{Ende} - A_{Anfang})}{dt}$$

2.7 Induktion mit Hilfe der Winkeländerung durch die Drehung einer Leiterschleife in einem Magnetfeld¹⁰¹¹

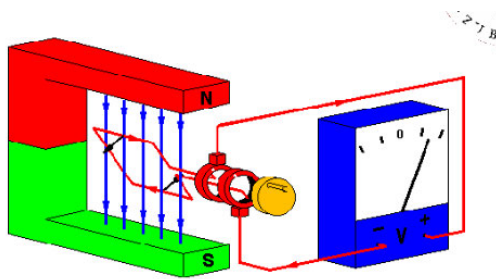


Abbildung 14: sich drehende Leiterschleife im B-Feld

Wie bereits bekannt, wird durch die Änderung der Fläche einer Leiterschleife in einem Magnetfeld eine Induktionsspannung in dieser erzeugt. Um diese Änderung zu gewährleisten, ist ebenfalls die Drehung einer solchen in einem B-Feld (siehe Abbildung 14) möglich. Auch hierbei wirkt die Lorentzkraft mit seinen bereits beschriebenen Nachfolgen so, dass eine Ladungstrennung entsteht, die eine Induktionsspannung hervorruft. Auf Grund dessen, dass die Änderung der Fläche zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedlich hoch ist, verändert sich entsprechend auch die Stärke der Lorentzkraft und mit ihr die Induktionsspannung. Unter optimalen Bedingungen ist der Verlauf des Wertes der Induktionsspannung durch eine sinusförmige Funktion zu beschreiben, da dieser durch die fortwährende Rotation sowohl positive Werte, den Null-Wert als auch negative Werte annehmen kann, was somit einer sinusförmigen Wechselspannung entspricht. Während dieses Vorgangs wird die Änderung der durchsetzten Fläche, die für die Berechnung der Induktionsspannung benötigt wird, mit Hilfe der effektiv durchdrungenen Fläche A_{eff} berechnet. Hierbei ist es so, dass die gesamte Fläche A_0 der Leiterschleife dann mit effektiv maximal beschrieben werden kann, wenn sie senkrecht zu den Magnetfeldlinien des Magnetfelds steht. Daraus folgend ist sie dann effektiv gleich null, wenn sie parallel zum Magnetfeld

¹⁰ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>

¹¹ https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/e_lehre_2/induktion/drehschleife.htm

vorzufinden ist. Diese Änderung der Fläche lässt sich wiederum mit der Formel $A_{eff}(t) = A_0 * \cos(\omega * t)$

oder der Formel

$$A_{eff}(\varphi) = A_0 * \cos(\varphi)$$

berechnen. Wobei die Änderung von A_{eff} bei $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 270^\circ$ am höchsten und bei $\varphi = 0$ und $\varphi = 180^\circ$ am geringsten ist, was zu entsprechenden Induktionsspannungen führt. Hierbei entsprechen φ dem Winkel zwischen dem Magnetfeld und der Flächennormalen der rotierenden Leiterschleife und ω der Winkelgeschwindigkeit der Rotation. Das in Abbildung 14 gezeigte Beispiel beschreibt des Weiteren schon eine Form eines Generators, da in diesem durch eine Bewegung in Form einer Rotation eine Wechselspannung generiert wird.

2.8 Die Magnetfeldänderung um eine Leiterschleife¹²¹³

Die Erzeugung einer Induktionsspannung kann neben der Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld auch mit der Änderung dieses um eine Leiterschleife gelingen. Eine solche wird entweder mit der Schwächung oder der Verstärkung eines eine Leiterschleife umgebenen Magnetfeldes induziert. Dieses Phänomen beruht auf der bereits erklärten Induktion durch die Veränderung der von einem B-Feld durchsetzten Fläche einer Leiterschleife. Auch bei dieser wird der sogenannte magnetische Fluss Φ verändert. Dies liegt daran, dass der magnetische Fluss eine Kombination aus dem magnetischen Feld B und der Fläche A darstellt, für den

$$\Phi = B * A$$

bzw. bei einem anderen Winkel als dem, bei dem die Magnetfeldlinien und die Fläche der Leiterspule senkrecht zueinanderstehen,

$$\Phi = B * A * \cos(\varphi)$$

gilt. Dies ist so lange der Fall, wie auch bei den anderen Beispielen, das magnetische Feld homogen ist und keine Unregelmäßigkeiten aufweist¹⁴.

¹² <https://simpleclub.com/lessons/physik-induktion-durch-anderung-des-magnetfeldes>

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

¹⁴ <https://studyflix.de/elektrotechnik/magnetischer-fluss-3141>

Durch die bereits bekannte Formel

$$U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt}$$

lässt sich somit auf die Formel für die Induktion durch die Veränderung der magnetischen Feldstärke schließen, nach der

$$U_{ind} = -N * A * \frac{dB}{dt} \text{ (für senkrecht zueinanderstehende Fälle) bzw.}$$

$$U_{ind} = -N * A * \frac{dB}{dt} * \cos(\varphi) \text{ gilt.}$$

Hieraus geht hervor, dass eine durch die Veränderung der magnetischen Flussdichte B erzeugte Induktionsspannung U bei einer Vergrößerung von B negativ (Abbildung 16) und bei einer Verkleinerung von B positiv (Abbildung 15) ist. Auch unser Generator macht sich dies zu Nutze, da sich auch bei diesem das Magnetfeld um die Spulen herum verändert, während diese unbeweglich befestigt sind.

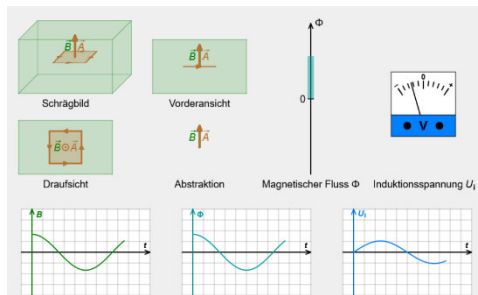


Abbildung 16: Induktion durch Vergrößerung von B

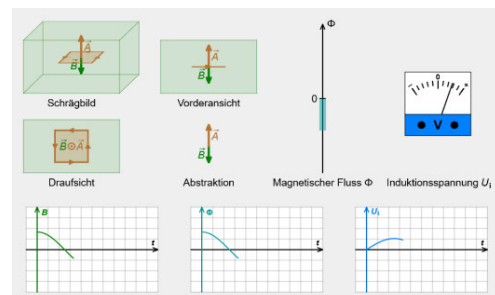


Abbildung 15: Induktion durch Verkleinerung von B

2.9 Das Faraday'sche Induktionsgesetz¹⁵

Das Faraday'sche Induktionsgesetz besagt, dass eine Spannung in einer Spule nur dann induziert werden kann, wenn sich der eben angeführte magnetische Fluss Φ entweder verkleinert oder vergrößert. Folglich ist es möglich mit Φ eine Formel für die Induktionsspannung aufzustellen, mit der beide Arten der Erzeugung einer Induktionsspannung (Änderung des Magnetfelds B und/oder Änderung der durchsetzten Fläche A) berücksichtigt werden. Diese erlangt man über das Einsetzen und Umstellen der beiden genannten Formeln für die Induktionsspannungen, die zu

$$U_{ind} = -N * \frac{d\Phi}{dt},$$

¹⁵ <https://studyflix.de/elektrotechnik/induktionsgesetz-1896>

der Faraday'schen Induktionsgesetzformel, zusammengefasst werden können. Aus dieser Formel lässt sich anschließend mit Hilfe der Bildung der Ableitung von Φ mit der Summenregel der Ausdruck

$$U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt} - N * A * \frac{dB}{dt}$$

herleiten, die gilt, da je nach Fall der Induktionsspannungserzeugung entweder der rechte Teil bei einem konstante B oder der linke Teil bei einem konstanten A wegfällt.

2.10 Die Lenz'sche Regel¹⁶¹⁷

Die sogenannte Lenz'sche Regel kommt bei der Induktion in einer Spule zum Einsatz. Sie ist der Grund, warum die Induktionsspannung auch bei ihrer Berechnung stets negativ ausgerichtet ist. Dies basiert darauf, dass nach ihr ein erzeugter Induktionsstrom prinzipiell die Ursache, durch die er entstanden ist, zu hemmen sucht. Die Erklärung hierzu lässt sich erneut in der Lorentzkraft finden.

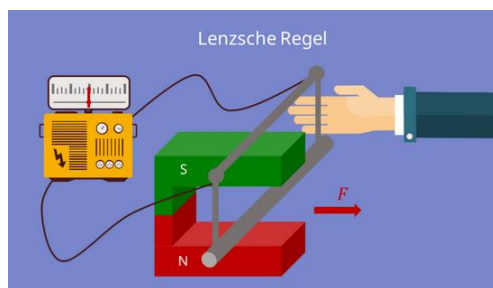


Abbildung 18: Leiterschaukel in einem Magnetfeld, an der gezogen wird

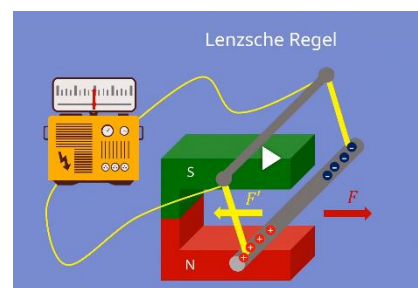


Abbildung 17: Leiterschaukel, auf die eine F_I und eine F wirkt

In dem hier gezeigten Versuch wird eine Leiterschaukel in ein Magnetfeld gehängt, mit einem Strommessgerät verbunden und anschließend senkrecht mit der hier roten Kraft F aus dem B-Feld des Magneten herausgezogen. Als Folge daraus wirkt eine Lorentzkraft nach der Linken-Hand-Regel, die eine messbare Ladungstrennung hervorruft, sodass am hinteren Ende der Leiterschaukel ein Elektronenüberschuss und am vorderen ein Elektronenmangel entsteht. Durch diese von der Lorentzkraft hervorgerufene Bewegung der Elektronen wird nach den gleichen Prinzipien erneut eine Lorentzkraft hervorgerufen, die hier als F' gekennzeichnet wird und nun im 180° Winkel zu der ursprünglichen Kraft F steht. Auf Grund dessen lässt sich darauf schließen, dass jene Kraft, die von dem Induktionsstrom erzeugt wird, versucht, den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen, also ihren Ursprung F zu hemmen. Da dies der Fall ist,

¹⁶ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel>

¹⁷ <https://studflix.de/elektrotechnik/lenzsche-regel-1811>

entspricht und befürwortet / leitet dies die Regel von Lenz her. Des Weiteren lässt sich sagen, dass auch der Energieerhaltungssatz eingehalten wird, da die Bewegung abgebremst wird. Wäre dies nicht der Fall bzw. würde die resultierende Kraft in die gleiche Richtung wie die Ursprungskraft zeigen, wäre ein den Energieerhaltungssatz verletzendes Perpetuum mobile konstruiert, das jede weitere Form von Energiegewinnung sinnlos machen würde. Infolgedessen wird bei jeder Formel für die Induktionsspannung ein minus (-) beigefügt, um den Begebenheiten gerecht zu werden.

2.11 Wechselstrom zu Gleichstrom: Der Gleichrichter¹⁸

Ein Drehstromgenerator erzeugt, wie bereits erklärt, eine Wechselspannung bzw. einen Wechselstrom durch eine Drehbewegung. Um jedoch Gerätschaften wie eine Halbleiterdiode betreiben zu können oder zum Beispiel einen Akku aufzuladen, muss dieser Wechselstrom bzw. diese Wechselspannung zu einem Gleichstrom bzw. einer Gleichspannung umgewandelt werden. Diese Aufgabe verrichtet der Gleichrichter mit Hilfe von Dioden. Der hierbei effektivste Gleichrichter ist der Brückengleichrichter, welcher auch in unserem Generator Verwendung findet. Anders als der Einweggleichrichter sperrt er nicht nur eine Richtung des Stromes, sondern polt diese sonst gesperrte auf das andere Vorzeichen um. Somit bleibt kein Strom ungenutzt.

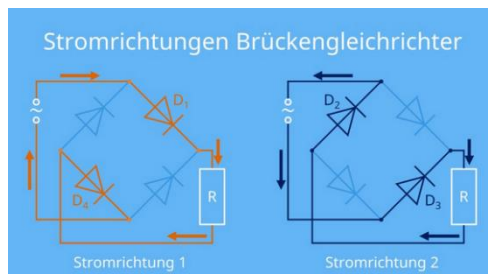


Abbildung 19: Funktion eines Brückengleichrichters

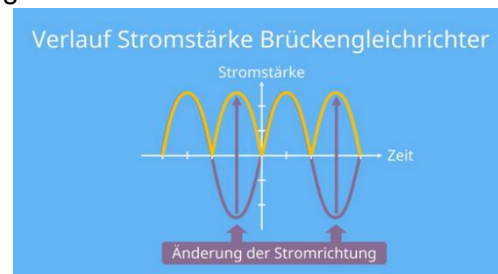


Abbildung 20: Verlauf der geänderten Stromrichtung

Der oben zu sehende Schaltplan zeigt die Funktionsweise eines Brückengleichrichters, der im Prinzip aus mehreren einzelnen Dioden besteht. Er gleicht einer Kombination aus vier Dioden, die dazu führt, dass der Strom immer durch jeweils zwei Dioden fließen kann und nie von allen blockiert wird. Auf Grund der Anordnung dieser Dioden kann der Strom jeweils nur in einer Richtung bei dem Verbraucher, hier dem Widerstand R, ankommen, da die andere Richtung von den jeweils anderen Dioden blockiert wird (siehe Abbildung 19), sodass im Endeffekt ein Plus und ein Minuspol resultieren. Daraus geht der in Abbildung 19 zu sehende Verlauf der Stromstärke hervor. Es ist festzuhalten, dass durch die Umwandlung

¹⁸ <https://studyflix.de/elektrotechnik/gleichrichter-4565>

eines Wechselstromes in einen Gleichstrom mit der Hilfe eines Brückengleichrichters, auch Zweiggleichrichter genannt, ein fortwährend pulsierender Gleichstrom entsteht.

2.12 Mögliche Effektivierungen eines Generators

Die Effektivierung eines Generators beschreibt einen Vorgang, bei dem der prozentuale Satz an umgewandelter Bewegungsenergie in elektrische Energie möglichst hoch ist. Der Generator soll also möglichst viel elektrische Energie bei einem geringstmöglichen Aufwand erzeugen. Um dies zu erreichen, kann man die einzelnen Faktoren, die zu einer Induktionsspannung führen, entsprechend der hergeleiteten Formel

$$U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt} - N * A * \frac{dB}{dt}$$

verändern. Eine der offensichtlichsten Verbesserungen stellt folglich die Vergrößerung der Windungen N einer Spule dar, die in den bisherigen Beispielen nur als alleinige Leiterschleife verwendet wurde. Auch ist die verwendete Menge an Spulen ausschlaggebend, da sich die Erzeugnisse pro hinzugefügte Spule summieren. Gleichermaßen stellt die Intensivierung des B -Feldes nach gleicher Formel eine Verbesserung des Generators dar, was zum Beispiel mit weiteren Magneten oder der Anbringung von ferromagnetischen Stoffen in der Nähe dieser möglich ist. Folglich wäre es ebenfalls möglich solch einen Stoff in der Mitte einer Spule anzubringen, sodass sich die Induktivität dieser nach

$$L = \mu_r * \mu_0 * \frac{N^2 * A}{l}$$

erhöhen würde. Dies ist darin begründet, dass auch diese in der Formel für die Induktionsspannung enthalten ist, da für die magnetische Flussdichte B gilt:

$$B = \mu_0 * \mu_r * \frac{n * I}{l},$$

sodass für die normale Formel der Induktionsspannung gelten würde:

$$U_{ind} = -N * \mu_0 * \mu_r * \frac{n * I}{l} * \frac{dA}{dt}.$$

Als Folge dessen sind so alle Faktoren und Divisoren der Induktivität in der Formel enthalten, was zu Folge hat, dass eine höhere Induktivität L , welche angibt, wie stark eine Spule auf die Änderung einer Stromstärke reagiert, zu einer höheren Induktionsspannung führt.

Rein anschaulich lässt sich dies dadurch erklären, dass ein Eisenkern in Verbindung mit einem Magnetfeld die Magnetfeldlinien eines B-Feldes, wie in Abbildung 21 zu sehen, verdichtet. Diese Verdichtung resultiert dabei zu einer erhöhten magnetischen Leitfähigkeit, die durch das Hinzufügen des Eisens in das B-Feld

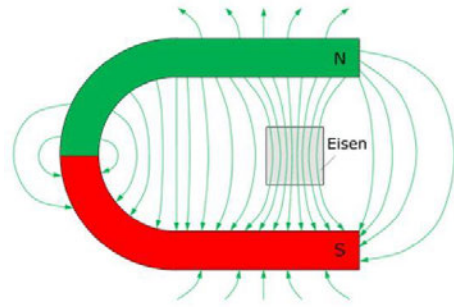
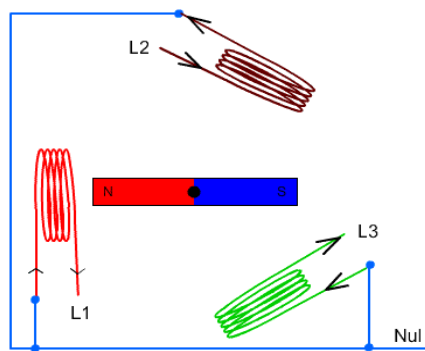


Abbildung 21: Verdichtung von Magnetfeldlinien durch Eisen

erzeugt wird. Folglich ändert sich die Leitfähigkeit durch die Hinzufügung von Materialien in ein magnetisches Feld, wobei dieses Material durch die sogenannte Permeabilitätszahl μ_r beschrieben wird und je nach Material größer und kleiner werden kann. Jener Zahl wird allerdings meist keine Beachtung geschenkt, da sie bei dem Material Luft der Zahl 1 entspricht und somit nicht beachtet werden muss, wenn sich nur diese in einem Magnetfeld befindet. Demzufolge lässt sich festhalten, dass die Induktionsspannung durch das Ergänzen von Eisenkernen in den Spulen erhöht werden kann, da die Wirkung eines Magnetfeldes durch z.B. einen solchen Stoff an einen Ort gebunden vergrößert werden kann¹⁹. Weitere mögliche Verbesserungen eines Generators sind in dessen Mechanik zu vollbringen, um einen leichten Lauf zu ermöglichen, sodass er schneller gedreht werden kann. Auch wären Zahnräder möglich, mit denen man die Geschwindigkeit der Umdrehung erhöhen könnte. Der Einsatz eines Kondensators ist darüber hinaus nach der Umwandlung der Wechselspannung zur Gleichspannung auch eine mögliche Effektivierung, da dieser für eine geglättete und konstantere Abgabe einer Spannung sorgen kann.

¹⁹ https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html

2.13 Der Drei-Phasen-Generator²⁰



Animation 2: Funktion eines Drei-Phasen-Generators

Der Drehstrom Generator, auch Drei-Phasen-Generator genannt, entspricht einer besonderen Art des Generators. Er besteht aus einem Magneten, der sich innerhalb von drei voneinander autonomen Spulen dreht, die jeweils in einem 120° Winkel zueinanderstehen. Infolgedessen erzeugt er durch Induktion, die durch die Drehung des Magneten, also der Veränderung des Magnetfeldes, erfolgt, in diesen zeitgleich drei Wechselströme sinusförmiger Art, bei denen wegen ihrer Anordnung eine Phasenverschiebung von 120° in der resultierenden Dreiphasenwechselspannung auftritt. Jene Spulen sind dabei in verschiedenster Weise zu verbinden. Die geläufigsten Arten sind die Sternschaltung und die Dreieckschaltung.

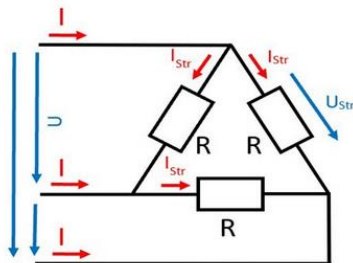


Abbildung 23: Dreieckschaltung

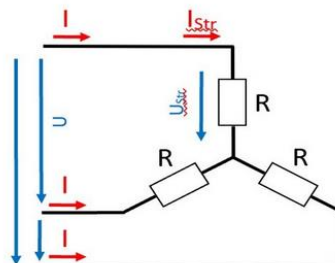


Abbildung 22: Sternschaltung

In den oberen Abbildungen verkörpern die Widerstände R die Spulen in den Schaltungen, sodass zu erkennen ist, dass in der Dreieckschaltung die drei Spulen in Reihe geschaltet sind, indem ihre Enden miteinander verbunden werden. Dies führt dazu, dass man eine Spannung an jedem der drei Endpaaren entnehmen kann. Bei der Sternschaltung ist es hingegen so, dass mit jeweils einem Ende jeder Spule ein Mittelpunktleiter gebildet wird, der anschließend geerdet wird, sodass zwischen den anderen Enden ebenfalls drei Wechselspannungen entnommen werden können und wie in Abbildung 24 verlaufen.

²⁰ <http://profi-stromgenerator.de/blog-einphasen-und-dreiphasen-generatoren/>

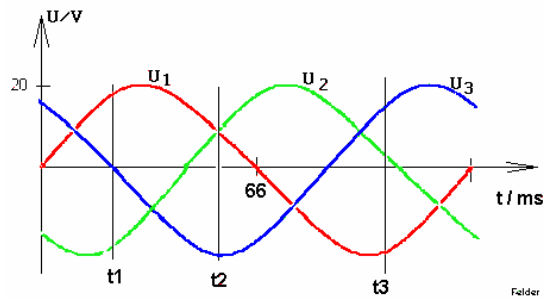


Abbildung 24: Verlauf der sinusförmigen Kurven

Unser Generator hatte sich zeitweilig auch die Dreieckschaltung zu Nutze gemacht. Dies änderte sich mit der Erstellung einer eigenen Schaltung, bei der die drei individuellen Wechselspannungen zunächst mit Hilfe eines eben erklärten Gleichrichters zu einer Gleichspannung umgewandelt werden. Erst danach werden sie in unserem Fall zusammengeschlossen, um ihre Erzeugnisse zu addieren und mit einem Kondensator gleichmäßiger werden zu lassen, sodass darauf ein Verbraucher betrieben werden kann. Ein weiterer Unterschied unseres Generators zu einem üblichen Drehstromgenerators ist die Anzahl und Position der Magneten, da wir diese nicht innerhalb der Spulen, sondern außerhalb dieser rotieren lassen und acht einzelne Magneten darstellen. Die Spulen hingegen sind auch bei dem unsrigen drei Stück und in einem 120° Winkel zueinander angebracht.

3 Experimente zur Induktion

3.1 Die Erforschung der Induktionsgesetze

3.1.1 Aufbau und Durchführung

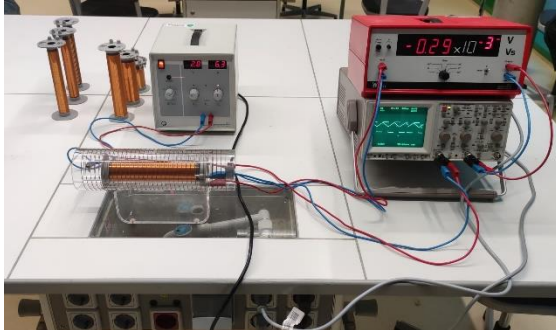


Abbildung 25: Aufbau des Versuchs zu Induktion

Im Zuge der Erforschung der Induktion in unserem Projekt führten wir sogenannte Grundversuche zur Induktion durch. Sinn dieser Experimente sollte es sein, uns die Zusammenhänge zwischen der Induktionsspannung und der Änderungsrate $\frac{dB}{dt}$, der Querschnittsfläche A einer Induktionsspule, der Windungszahl N einer Spule und der Spulenlänge l herzuleiten, zu erklären und zu veranschaulichen. Die benötigten Materialien des Versuchs belaufen sich auf ein Konvolut aus Induktions- und Feldspulen mit unterschiedlicher Länge, Querschnittsfläche bzw. Durchmesser und Windungsanzahl, ein Oszilloskop, einen Messwertverstärker und eine steuerbare Stromquelle. Wie in Abbildung 25 zu sehen, wird zunächst die steuerbare Stromquelle mit einer der Spulen (die hier größere) verbunden, die als Feldspule dienen soll und daran anschließend an den ersten Eingang eines Oszilloskops angeschlossen. In die größere Feldspule wird daraufhin eine kleinere Induktionsspule eingeführt, die über einen Messwertverstärker mit einer eingestellten Verstärkung von 10^3 an dem zweiten Eingang des Oszilloskops angebracht wird. Im Anschluss daran werden alle Geräte mit Strom versorgt. Die Durchführung des Experimentes gestaltet sich so, dass das steuerbare Messegerät zunächst auf eine Stromänderung von $1,2 \frac{di}{dt}$, dann von $1,6 \frac{di}{dt}$ und anschließend von $2,0 \frac{di}{dt}$ eingestellt wird, woraus folgt, dass die Ab- und Zunahme des Stroms in der Feldspule linear abläuft. Pro Einstellung müssen alle verfügbaren Spulen miteinander getestet, beobachtet und die entstandenen Ergebnisse festgehalten werden. Genau für diesen Schritt ist das Oszilloskop mit in den Versuch eingebaut, da es dazu in der Lage ist, die laufende Zeit zeitgleich sowohl gegen die entstehende Induktionsspannung in der Induktionsspule als auch gegen den Verlauf der Spannung in der Feldspule aufzutragen, sodass ein händisches Aufnehmen der Werte nicht erforderlich ist, sondern die im Bildschirm

des Oszilloskops entstehenden Diagramme lediglich abzufotografieren sind, um die entsprechenden Messwerte zu erhalten. Das uns zur Verfügung stehende Spulenkonvolut beziffert sich dabei auf die in der Abbildung 25 zu sehenden neun Spulen. Von diesen neun lassen sich durch unter anderem mehreres Verwenden dieser folgende Zusammenhänge in den Induktionsspulen erkennen. Diese gilt es zu untersuchen.

1. die unterschiedlichen Längen von Spulen



Abbildung 26: Spulen unterschiedlicher Größe

2. die unterschiedlichen Windungszahlen von Spulen



Abbildung 27: Spulen unterschiedlicher Wicklungszahl

3. der unterschiedliche Durchmesser von Spulen.



Abbildung 28: Spulen unterschiedlichem Durchmessers

Pro einen der drei Unterscheidungsgebiete werden also drei Messungen je Stromquelleneinstellung pro Feldspule aufgenommen. Dies führt zu einer gesamten Messmenge von $3 * 3$ Unterscheidungsgebieten, $* 3$ Stromquelleneinstellungen, $* 2$ Feldspulen, also insgesamt 54 Messwertaufnahmen. Nachfolgend ist ein in Verbindungsetzen von U_{ind} zu $\frac{dB}{dt}$ bzw. $\frac{di}{dt}$ in der Feldspule, U_{ind} zu l , U_{ind} zu A und U_{ind} zu N notwendig, um die geltenden Gesetzmäßigkeiten in Erfahrung zu bringen und folglich das Experiment auszuwerten.

3.1.2 Auswertung

Aus den aufgenommenen Bildern gilt es nun die abgebildeten Messwerte zu entnehmen und in mehrere Tabellen zu übertragen, um diese anschließend mit Hilfe von Diagrammen auszuwerten und die geltenden Proportionalitäten, die unseren Annahmen, dass die Induktionsspannung proportional zu den genannten Faktoren ist, entsprechen, nachzuweisen.

3.1.2.1 Das Verhältnis von U_{ind} zu A

Der erste Zusammenhang, den wir im Zuge der Untersuchung der Erzeugung von Induktionsspannung betrachten, ist der zwischen der Induktionsspannung U_{ind} und dem Durchmesser einer Spule. Jene Induktionsspulen dieses Versuchsteiles weisen 300 Windungen auf. Des Weiteren wird eine Feldspule mit 34 Windungen genutzt, in der der Strom mit $1,2 \frac{dI}{dt}$ steigt und abfällt. Die betrachteten entnommenen Messwerte für diese Abhängigkeit lauten

1. Eine Spule mit einem Durchmesser von 41mm,

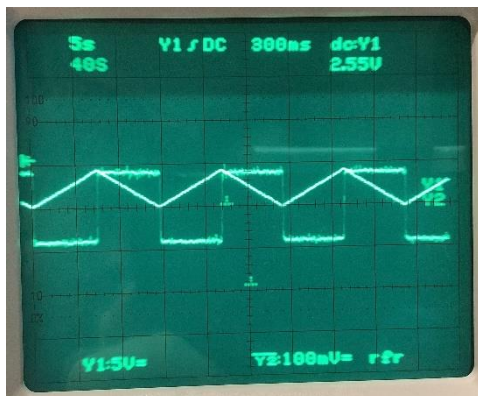


Abbildung 29: 300 Windungen, 41mm Durchmesser, 3,5Q, 1,2A, 800yH

2. Eine Spule mit einem Durchmesser von 33mm,

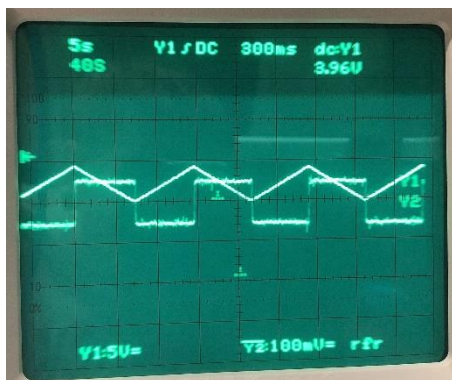


Abbildung 30: 300 Windungen, 33mm Durchmesser, 2,8Q, 530yH, 1,2A

3. Eine Spule mit einem Durchmesser von 26mm.



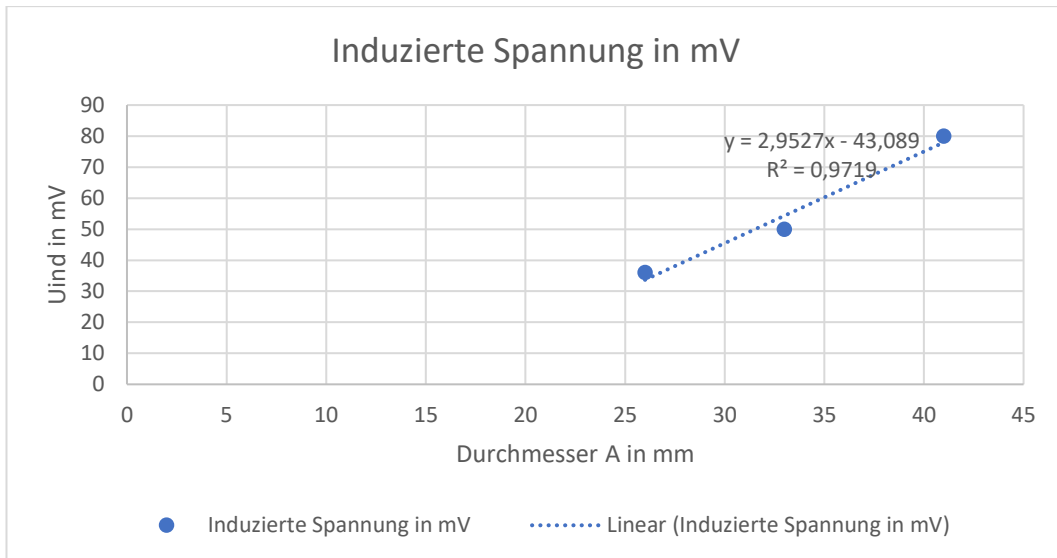
Abbildung 31: 300 Windungen, 26mm Durchmesser, 2,2Q, 330yH, 1,2A

Die auf dem Oszilloskop entstandenen Abbildungen weisen jeweils zwei unterschiedliche Graphen auf, wobei der eine den Verlauf der Spannung, die durch die sich ändernde Stromstärke entsteht (Selbstinduktion), in der Feldspule aufzeichnet und der andere die Induktionsspannung darstellt. Diese sind daran zu identifizieren, dass die Spannung in der Feldspule kontinuierlich linear ab- und zunimmt, sodass diese dem Graphen 1 mit einer y-Achsenkalierung von 5V gleichkommt und die Induktionsspannung in der Induktionsspule vom Minus- in den Plusbereich springt, was zur Folge hat, dass sie dem zweiten Graphen mit der Skalierung von 100mV pro y-Einheit (Kästchen) gleicht. Beide Spannungen sind gegen die Zeit t aufgetragen, welche auf der x-Achse mit 300ms pro Einheit erfasst ist. Die induzierten Spannungen sind von den Abbildungen abzulesen und anschließend in eine Tabelle einzutragen, sodass für die Werte des Teilversuches gilt:

Tabelle 1: Messergebnisse unterschiedlicher Durchmesser

Gleiche Windungszahl, unterschiedlicher Durchmesser Feldspule mit 34 Windungen, 1,2 dl/dt	
Durchmesser in mm	Induzierte Spannung in mV
26	36
33	50
41	80

Wenn man jene Werte nun in einem weiteren Diagramm gegeneinander aufträgt, erhält man folgende Illustration, bei der die Induktionsspannung gegen A aufgetragen wird:



An dieser ist eine Linearität von U_{ind} zu A festzustellen, da eine durch die Punkte hindurchgelegte Trendlinie einem R-Wert von 0,9719 entspricht, welcher angibt, wie genau ein Messwertverlauf ist. Das Verhältnis ist sowohl hier als auch in den folgenden Versuchsteilen nur linear und nicht proportional, auch wenn man durch die Linearitäten auf die geltenden Proportionalitäten schließen kann. Dies geht daraus hervor, dass Messwerte aus Experimenten auf Grund äußerer Einflüsse niemals hundertprozentig mit der Theorie übereinstimmen.

3.1.2.2 Das Verhältnis von U_{ind} zu N

Auf gleiche Art und Weise ist auch das Verhältnis von U_{ind} zu N unter gleichen Umständen in Erfahrung zu bringen. Die untersuchten Spulen unterscheiden sich hier im Zuge der Betrachtung jenes Zusammenhanges in ihren Windungszahlen. Folgende Messwerte sind ablesbar:

1. Eine Spule mit einer Windungszahl von 75 Windungen:

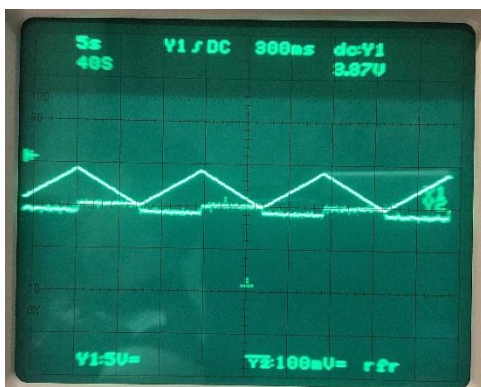


Abbildung 32: 75 Windungen, 26mm Durchmesser, 0,15Q, 24yH, 4A

2. Eine Spule mit einer Windungszahl von 150 Windungen:

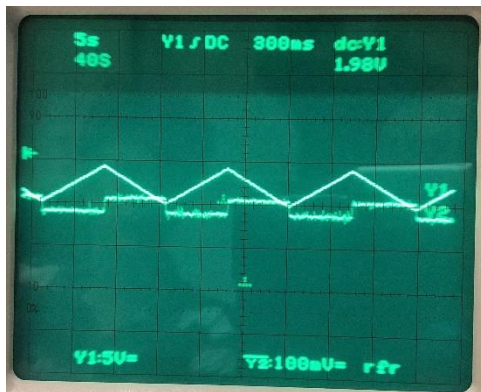


Abbildung 33: 150 Windungen, 26mm, 0,3Q, 90yH, 4A

3. Eine Spule mit einer Windungszahl von 300:



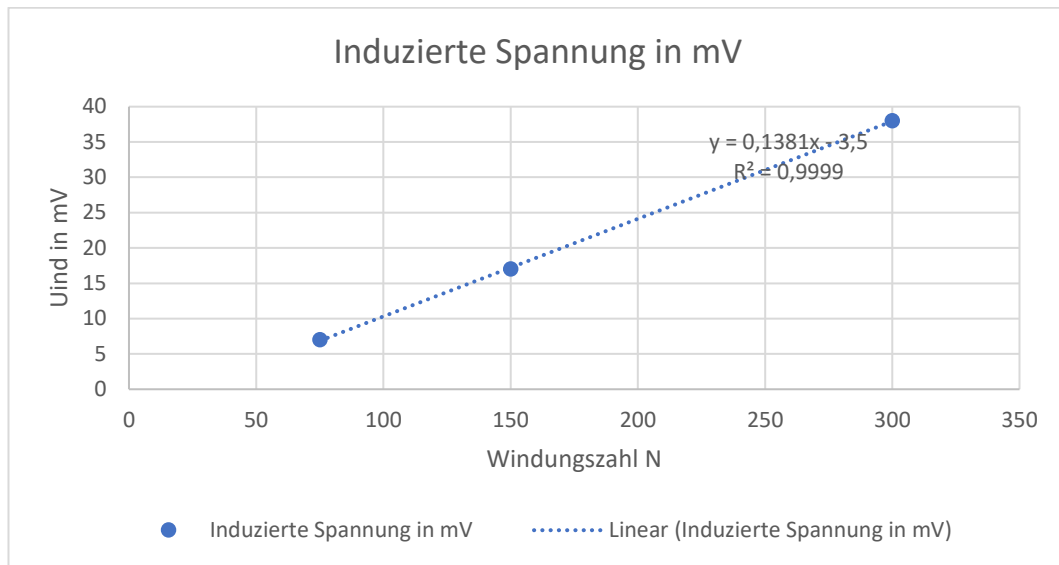
Abbildung 34: Gleiche Durchmesser (26mm), untersch. Windungszahl

Nach einem Ablesen dieser Werte sind auch diese in eine Tabelle einzufügen.

Tabelle 2: Messergebnisse unterschiedliche Windungszahl

Gleicher Durchmesser, unterschiedliche Windungszahl, Feldspule mit 34 Windungen, 1,2 dl/dt		
Windungszahl N	Induzierte Spannung in mV	
75		7
150		17
300		38

Trägt man jene Werte in einem Diagramm (x-Achse = Windungen, y-Achse = Induktionsspannung) gegeneinander auf, erhält man die Darstellung,



mit welcher der Zusammenhang deutlich wird, dass U_{ind} linear zu der Windungszahl N verläuft, da auch diese aufgenommenen Werte mit einer Trendlinie des hohen R-Wertes 0,9999 verbunden werden können.

3.1.2.3 Das Verhältnis von U_{ind} zu I

Ein weiteres zu untersuchendes Verhältnis stellt das von U_{ind} zu I unter der Bedingung einer gleichen Windungsdichte dar. Wenn man die Messwerte, die unter gleichen Bedingungen aufgenommen werden, von

1. einer Spule der Länge von 5,5cm,

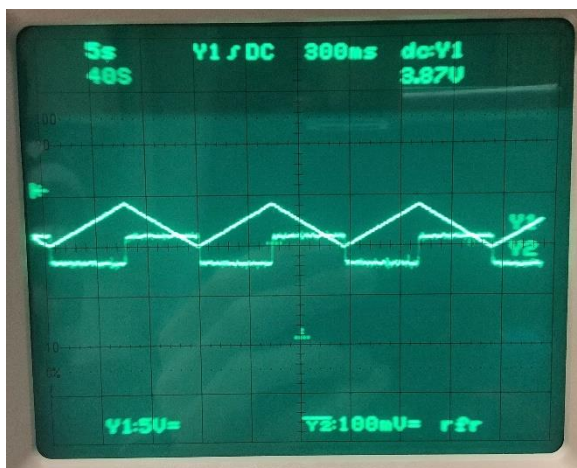


Abbildung 35: 100 Windungen, 41mm Durchmesser, 1,1Q, 200yH, 1,2A, 5,5cm Länge

2. einer Spule der Länge von 10,7cm,

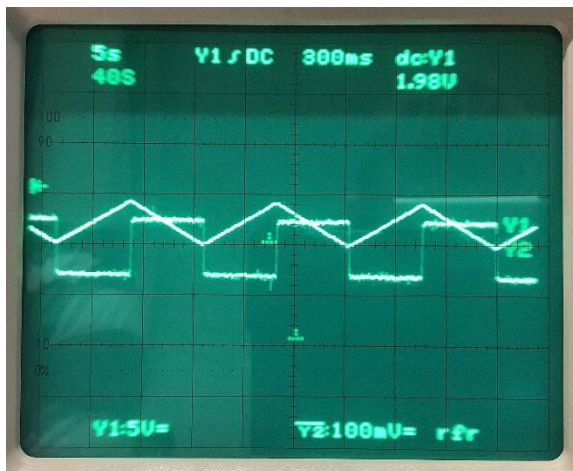


Abbildung 36: 200 Windungen, 41mm Durchmesser, 2,2Q, 500yH, 1,2A, 10,7cm Länge

3. einer Spule der Länge von 16,2cm

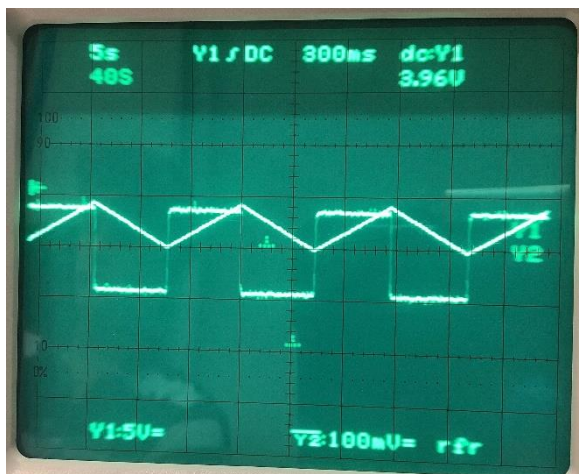
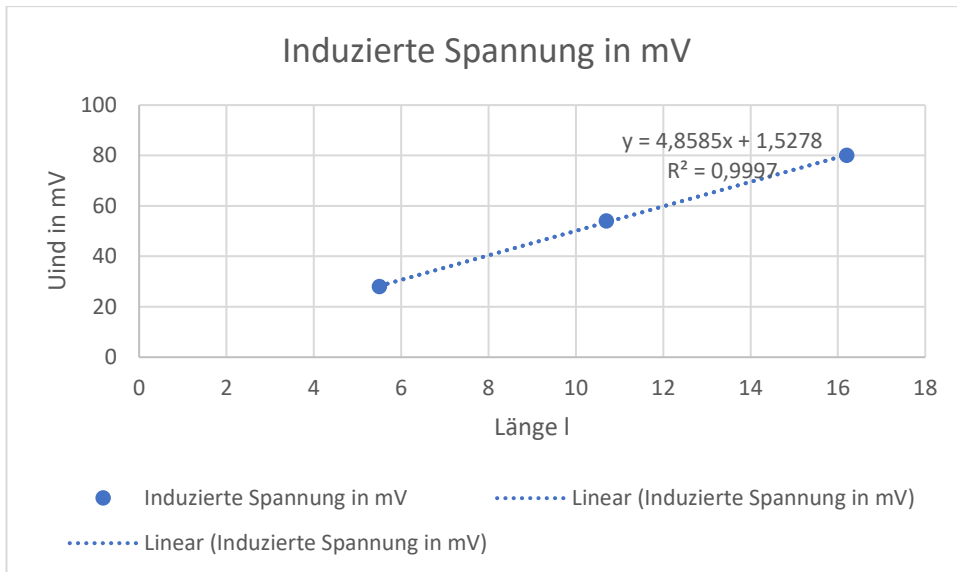


Abbildung 37: 300 Windungen, 41mm Durchmesser, 3,5Q, 800yH, 1,2A, 16,2cm Länge

betrachtet, ebenfalls in eine Tabelle überträgt und in ein Diagramm einzeichnet,

Tabelle 3: Messergebnisse unterschiedliche Länge

Gleiche Windungsdichte, unterschiedliche Länge, Feldspule mit 34 Windungen, 1,2 dl/dt	
Länge in cm	Induzierte Spannung in mV
5,5	28
10,7	54
16,2	80



lässt sich auch hier die Linearität von U_{ind} (y-Achse) zu der Länge l (x-Achse) aus gleichen schon genannten Gründen feststellen. Dies gilt für die später angeführte Endproportionalität aller Größen nur bedingt, da die Länge l durch die schon zuvor gezeigte Herleitung der Induktionsspannung in einer Spule in der Querschnittsfläche A mitinbegriffen ist.

3.1.2.4 Das Verhältnis von U_{ind} zu $\frac{dB}{dt}$ bzw. $\frac{dl}{dt}$ ²¹

Die Aufarbeitung der letzten Beziehung von U_{ind} zu $\frac{dB}{dt}$ läuft zwar im Prinzip gleich ab, doch beruht sie auf der Wechselwirkung zwischen dem angelegten steuerbaren Strom an der Feldspule, der Feldspule selbst und der Induktionsspule. Wie bereits beschrieben, sieht der Aufbau der Spulen unseres Experiments wie folgt aus:

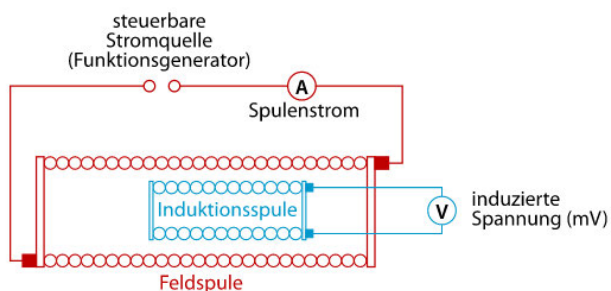


Abbildung 38: Aufbau der Spulen im Zusammenhangsversuch

Das Besondere an diesem Aufbau ist, dass das sich verändernde Magnetfeld um die Induktionsspule herum durch die in der Abbildung dargestellte Feldspule

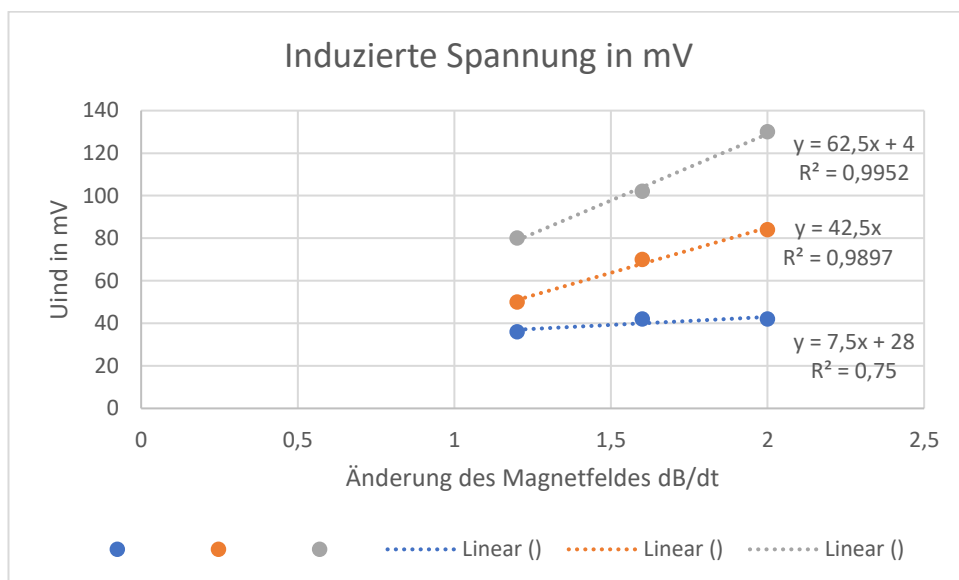
²¹ <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/versuche/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte-demonstrationsversuch>

entsteht. Der Grund hierfür liegt darin, dass an jene eine linear ab- und zunehmende Stromquelle angeschlossen ist, was dazu führt, dass sie ein variierendes Magnetfeld erzeugt, da ein solches durch Elektronenbewegung entsteht. Schaut man sich jenen Zusammenhang an, ist es ebenfalls möglich, statt $\frac{dB}{dt}$ die sich ändernde Stromstärke $\frac{di}{dt}$ zu betrachten, weshalb mehrere Versuchsergebnisse, die im Anhang anzutreffen sind und durch die Betrachtung von Induktionsspulen in der Feldspule mit verschiedenen angelegten variierenden Stromstärken entstehen, zu einer folgenden Wertetabelle führen,

Tabelle 4: Messergebnisse di/dt

Variierende di/dt , rest konstant, Feldspule mit 34 Windungen				
di/dt				
1,2	36	50	80	Induzierte Spannung 1
1,6	42	70	102	Induzierte Spannung 2
2	42	84	130	Induzierte Spannung 3

die in ein Diagramm eingezeichnet, folgende Illustration ergeben:



Demzufolge lässt sich sagen, dass die Induktionsspannung U_{ind} ebenfalls linear zu $\frac{dB}{dt}$ verläuft. Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen bzw. den linearen Verhältnissen die Proportionalität von U_{ind} zu $A * N * \frac{dB}{dt}$ festhalten, die auf die bereits hergeleitete Formel $U_{ind} = -N * B * \frac{dA}{dt}$ schließen lässt, da eine errechnete Proportionalitätskonstante durch Einsetzen 1 gleich ist. Dies bedeutet, dass je größer jene Werte sind, desto höher auch die Induktionsspannung ausfällt, sodass sich unsere Annahmen als richtig erweisen. Darüber hinaus lässt sich über die Feldspulen sagen, dass man bei beiden auf die gleichen Proportionalitäten schließen kann, sodass ein Zufall für diese in Verbindung mit der verwendeten Feldspule ausgeschlossen werden kann.

3.2 Die Untersuchung verschiedener Kerne von Spulen

3.2.1 Aufbau und Durchführung

Ein weiteres durchgeführtes Experiment beinhaltet die Betrachtung der Veränderung der Induktivität durch das Hinzufügen von Materialien in das Innere von Spulen. Hier ist unsere Annahme, dass das Hinzufügen von verschiedenen Materialien in das Innere einer Spule eine Änderung ihrer Induktivität hervorruft.



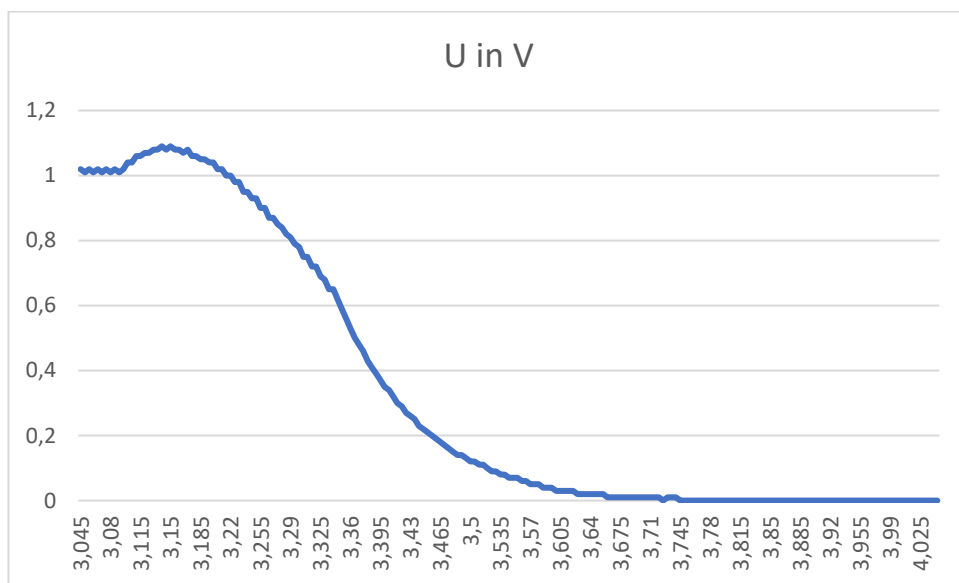
Abbildung 39: Aufbau des Induktivität Experiments

Wie in Abbildung 39 zu sehen, werden für dieses Experiment eine Stromquelle, ein Spannungsmessgerät, eine Spule, ein 100Ω Widerstand, Stäbe aus unterschiedlichen Materialien, die in das innere der Spule eingeführt werden können, und Verbindungskabel benötigt. Alle genannten Komponenten werden in Reihe geschaltet. Für das Messgerät gilt dabei, dass dieses noch mit dem oben zu sehenden I-Pad verbunden werden muss, da dieses die gemessenen Werte gegen die Zeit auftragen und darstellen kann, sodass auch hier keine direkte Zeitmessung benötigt wird. Das Experiment wird nun so durchgeführt, dass die Spule zunächst durch das Anschalten der Stromquelle aufgeladen wird und darauf der Stromkreis von diesem getrennt wird. Den daraus resultierenden Verlauf der Spannung gilt es mit dem I-Pad aufzunehmen und festzuhalten. Dieses Vorgehen muss sowohl mit Luft, Ferrit und Eisen innerhalb der Spule durchgeführt werden. Die entstehenden Ergebnisse werden anschließend miteinander verglichen, um eine potenzielle Veränderung der Induktivität der Spule festzustellen. Darüber hinaus kann festgehalten werden, dass dieses Experiment auf Grund der sogenannten Selbstinduktion eines Leiters funktioniert, da diese in Kombination mit der Induktivität einer Spule zu dem Versuch der Aufrechterhaltung der Spannung bzw. des Stroms in einem Stromkreis führt. Auch dies hängt mit der bereits bekannten Induktion durch die Änderung eines Magnetfeldes zusammen, da durch ein Unterbrechen des Stromkreises sofort kein Strom mehr in der Spule

fließt und somit zu einer Veränderung des aus dem fließenden Strom resultierenden Magnetfeldes führt, sodass die Spule folglich in sich selbst eine Spannung und einen Strom induziert.

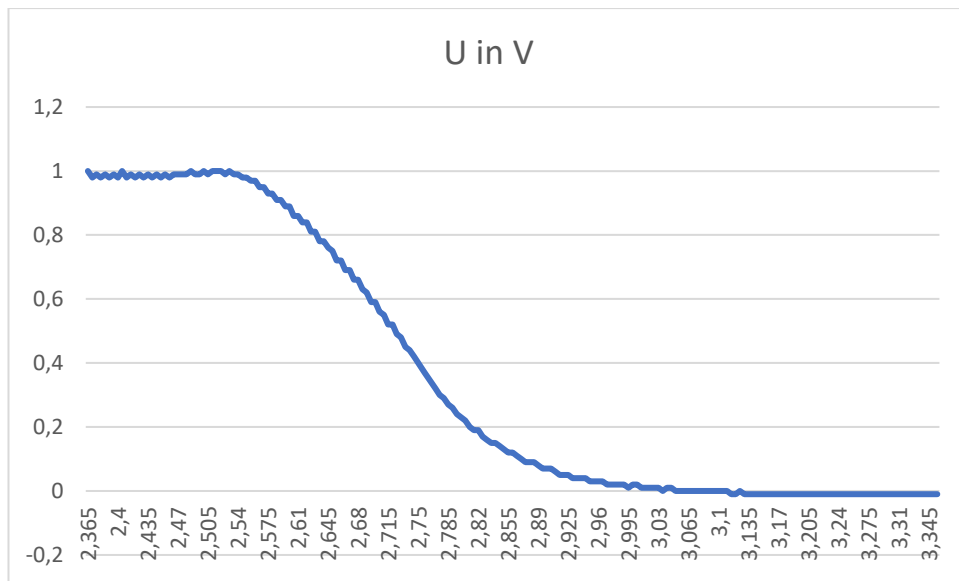
3.2.2 Auswertung

Insgesamt sind vier verschiedene Entladungskurven zu betrachten, da insgesamt drei verschiedene Kerne vorhanden sind und die Spule auch mit Luft als Kern beobachtet wird. In allen folgenden Diagrammen ist dabei die Spannung auf der y-Achse gegen die Zeit auf der x-Achse aufgetragen. Der erste bzw. Basisversuch gleicht dem, in dem die reine Spule betrachtet wird. Die Aufnahme der Ergebnisse führt zur folgenden Ansicht:

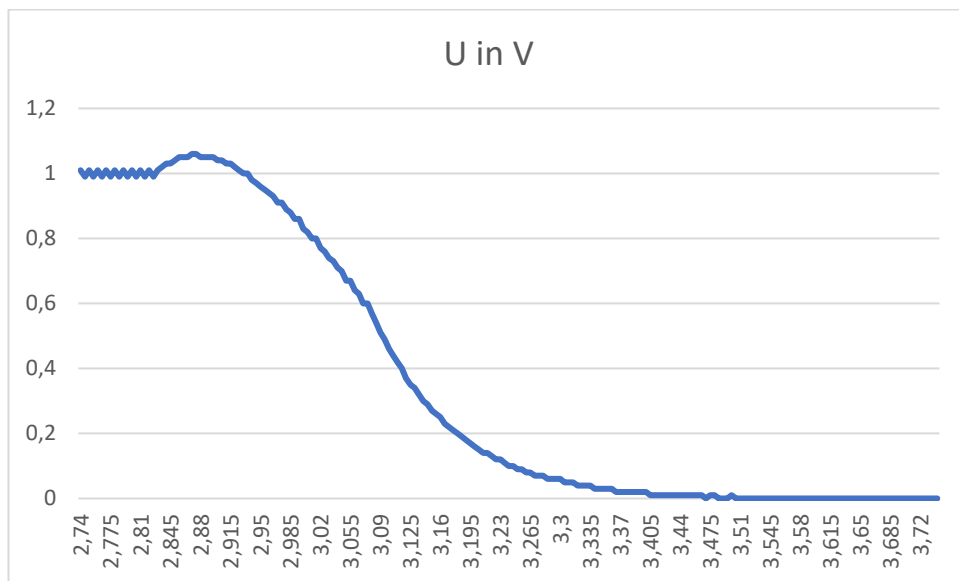


Die Entladungskurve ist an ihrem asymptotischen Verhalten in Richtung der x-Achse zu erkennen. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Spule bei einer angeschlossenen Stromquelle eine Spannung von einem Volt aufweist, da jene auf genau diesen Wert eingestellt wurde. Die anderen Versuche ergaben:

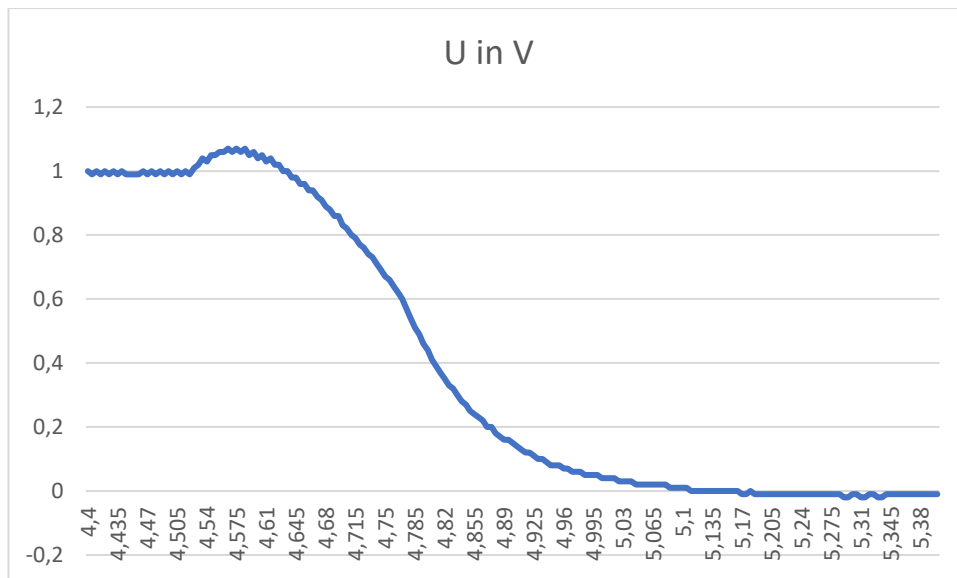
1. ein Diagramm in Bezug auf einen Eisenkern:



2. ein Diagramm in Bezug auf einen dünnen Ferritkern:



3. ein Diagramm in Bezug auf einen dicken Ferritkern:



Grundsätzlich lässt sich sagen, dass sich die Spannung mit dem jeweiligen Kern besser bzw. länger gehalten hat als ohne. Der Grund hierfür liegt in der sogenannten Induktivität, die durch das Hinzufügen der Materialien nach der Formel für die Induktivität einer langen Spule $L = \mu_r * \mu_0 * \frac{N^2 * A}{l}$ vergrößert wurde, da das entsprechende Material durch die sogenannte bereits erwähnte magnetische Permeabilität μ_r berücksichtigt wird. Wie bereits beschrieben entspricht μ_r bei Luft der Zahl 1, sodass die Zahl in Rechnungen oft vernachlässigt werden kann. Allerdings beträgt μ_r bei Eisen einer Permeabilität von 300 bis 10000 und Ferrit einer möglichen Permeabilität von 4 bis 15000, sodass diese eine Erhöhung der Induktivität hervorrufen. Weitere mögliche Stoffe, die dies noch effektiver erreichen könnten, wären unter anderem Mumetalle (50000 – 140000), amorphe Metalle (700 – 500000) und nanokristalline Metalle (20000 – 150000)²². Jedes dieser Materialien führt jedoch schließlich nach der Formel für die Selbstinduktion in einem Leiter $U_{ind} = -L * \frac{dI}{dt}$ zu einer höheren Induktionsspannung. Ebenfalls gibt es jedoch auch Stoffe, die die Induktivität einer Spule verringern können. Beispiele für solche wären unter anderem Kupfer, Wasser oder Stickstoff. Hieraus geht hervor, dass sich unsere Hypothese bestätigt hat. Eine genaue Bestimmung der jeweiligen Induktivität der Spule in den jeweiligen Zuständen wird im folgenden Verlauf des Projektes mit noch weiteren Experimenten erfolgen, ist jedoch kein Bestandteil dieser Arbeit.

²² <https://www.chemie.de/lexikon/Permeabilit%C3%A4ttszahl.html>

4 Der Bau des Generators

4.1 Planung

Die Errichtung des Generators startete zunächst bei der Planung. Wir hatten uns bereits das notwendige oben beschriebene Wissen zu einem erforderlichen Teil angeeignet. Uns war somit klar, dass für die Stromerzeugung durch die Bewegung von Magneten um Spulen herum viele unterschiedliche Materialien erforderlich werden würden. Wir entschieden uns für den Bau eines Drehstromgenerators, spezifischer für einen Drei-Phasen-Generator, da dieser auch in beinahe allen Turbinen, Biokraftanlagen, Wasserkraft- und Windkraftanlagen etc. Verwendung findet. Daraus folgend wussten wir, dass wir für einen wirksamen Generator sowohl mindestens drei Spulen, mehrere Magnete, einen Stator und einen Rotor und somit auch Kugellager, Schrauben und eine Achse, als auch entsprechendes Arbeitsgerät wie z.B. Akkuschrauber, Bandschleifer, Schraubenschlüssel, Schraubendreher etc. benötigen. Manche Materialien besaßen wir bereits, manche waren jedoch so spezifisch, dass eine Recherche zur Beschaffung notwendig war.

Zunächst entwickelten wir eine Skizze, nach der wir den Generator konstruieren konnten. Den sogenannten Stator als auch den Rotor legten wir auf möglichst runde und drehbare Körper fest. Diese mussten in Scheibenform hergestellt werden, um einerseits eine möglichst wirksame Strom- und Spannungserzeugung durch Übereinstimmung der Platten zu erzielen und andererseits den Rotor auch drehen zu können, da ergonomisch gesehen ein Viereck recht wenig Sinn gemacht hätte.

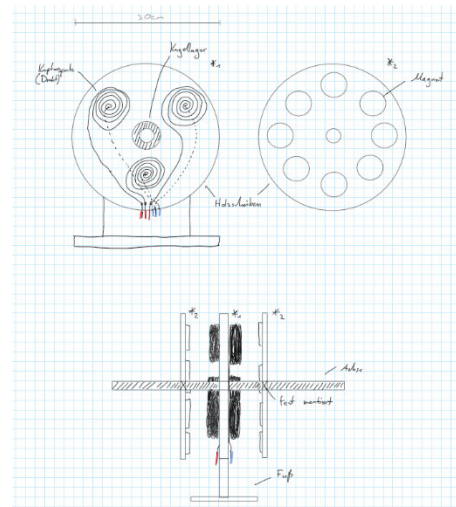


Abbildung 40: erste angefertigte Skizze unseres Generators

Der Rotor sollte aus zwei Platten bestehen, die jeweils mit Magneten bestückt werden sollten, um das erforderliche Magnetfeld erzeugen zu können. Wir entschieden uns dazu, die Magnete um die Spulen herum zu bewegen, da wir uns einig waren, dass Schleifkontakte, die bei sich drehenden Spulen benötigt werden würden, keine gut umsetzbare Möglichkeit darstellten. Der Stator sollte somit die Spulen enthalten und in der Mitte der beiden Rotorplatten platziert werden. Wir entschieden uns hierzu zunächst für drei Spulen, die jeweils im 120° Abstand zueinander angebracht werden sollten. Für beide Komponenten entschieden wir

uns jeweils für dickes, stabiles aber recht leichtes Nadelholz. Dick sollten sie deswegen sein, da in die Rotorplatten die Magnete eingelassen werden sollten, genauso wie die Spulen in den Stator. Des Weiteren sollte es stabil sein, um die entsprechenden Magnete auch bei hoher Beschleunigung gut halten zu können. Die Leichtigkeit des Holzes wurde dazu gewählt, um die Konstruktion ohne allzu große Kraftaufwendung in Bewegung versetzen zu können.

4.2 Rotorplatten

Wir definierten die beiden Rotor Holzplatten auf einen Durchmesser von 30cm. Folglich zeichneten wir mit der Hilfe eines Zirkels, den wir auf einen 15cm Radius einstellten, den Umriss zweier Kreise auf das entsprechende



Abbildung 41: Rotorplatten ohne Magnete

Nadelholzbrett. Anschließend sägten wir diese aus. Zur Begradigung der dabei entstandenen Holzsplitter und Unebenheiten nutzten wir zunächst einen Bandschleifer und Feilen für die gröberen und darauf Schleifschwämme sowie herkömmliches Schleifpapier für die feineren Glättungen.

4.2.1 Befestigungsformen

Die rohe Form des Stators war somit geben, doch benötigte dieser noch weitere Komponenten. Als erstes beschäftigten wir uns mit dem Befestigungspunkt des Rotors an der Achse des Konstruktes. Diese bestimmten wir als eine M12 Gewindestange, da diese leicht mit befestigenden Muttern bestückt werden konnte und kann, sodass es uns möglich sein würde, die Rotorplatten mit Hilfe von



Abbildung 44: M12 Gewindestange



Abbildung 43:
Beispielunterlegscheiben

großen Unterlegscheiben und entsprechenden M12 Muttern an der Gewindestange zu befestigen. Demzufolge war im späteren Verlauf das Bohren von 12 Millimeter dicken Löchern mittig in unsere beiden Rotorplatten und eine Begradigung dieser Löcher notwendig, sodass die Gewindestange in diese nach mehrmaligen Versuchen und Anpassungen hineinpassen würde.



Abbildung 42:
Beispielmutter (M12)

4.2.2 Die Magneten in den Rotorplatten

Als zweite Komponente standen nun die Magnete an, die in die Rotorplatten eingelassen werden sollten. Jene Magnete weisen einen äußeren Durchmesser von 8cm, einen inneren von 4cm, eine Breite von 15mm und eine Hubkraft von etwa 9,5kg auf. Hierzu hatten wir uns schon vor dem Bau der Rotorplatten mehrere

Ideen einfallen lassen. Wir spielten mit dem Gedanken, die Platten auf die passgenaue Größe der Magneten auszuschälen und anschließend von einer Seite nach Einlassung der Magneten teils zu verschließen. Allerdings stellte sich dies als nicht sehr sinnvoll heraus. Auch hatten wir die Idee, die Magneten auf eine Erhöhung aufstecken zu können und anschließend dort zu befestigen, weshalb wir uns auf Ringmagnete einigten, da man diese anschließend noch ausfüllen könnte, falls wir uns noch unentschieden hätten, was wir auch taten. Zudem brachte uns dies Spielraum zur Forschung mit dem Generator selbst ein. Wir gingen unserer ursprünglichen Idee, die Magneten in die Platten einzulassen, erneut nach und entschlossen uns nach reichlicher Überdenkung dazu, vollständige Löcher in die Rotorplatten einzusägen, darauf eine Seite völlig zu verschließen und anschließend die andere übrig gebliebene Seite ebenfalls überall abgesehen von manchen Stellen, an denen die Magnete dann sitzen würden, mit Sperrholz zu überziehen. Dies bedeutete also, dass die Magnete erstens noch gesehen, und zweitens die Löcher der Magnete weiterhin gefüllt werden konnten.



Abbildung 45: Ringmagneten auf den Rotorplatten, Vorgang der Abzeichnung

Die angesprochenen Ringmagnete haben den genannten äußeren Durchmesser von 8cm und einen inneren Durchmesser von 4cm. Des Weiteren liegen sie zu acht vor, da wir die Möglichkeit hatten, zwei gegensätzliche Magnetfelder auf zwei Seiten auf die Spulen einwirken zu lassen. Dementsprechend nahmen wir uns erneut die Rotorplatten und zeichneten mit einem Zirkel 4 Kreise pro Scheibe mit etwas mehr als 8cm Durchmesser

auf die Holzoberflächen. Dabei wurden deren oberste Kante mit jeweils 2cm Abstand bis zum Rand der Holzscheiben und mit jeweils 90 Grad Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt aufgezeichnet.

Anschließend wurden diese Kreise aus den Platten mit einer Stichsäge herausgesägt und darauf die Löcher ausgefeilt und ausgeschliffen, sodass keine Unebenheiten mehr zu erkennen waren und die Magnete größtenteils mühelos hineinpassten.



Abbildung 46: Rotorplatten mit Magneteinlassungen

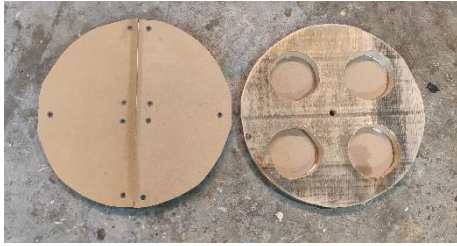


Abbildung 47: einseitig verschlossene Rotorplatten

Da beide Platten von einer Seite verschlossen werden sollten, musste ein weiteres Material her, das zwar sehr dünn war, jedoch die Magneten halten konnte. Im Endeffekt entschieden wir uns für Sperrholz. Um dieses genau an die Platten anzupassen, bildeten wir zunächst 4 gleichgroße Platten,

die auf diese heraufpassten. Hierfür war es notwendig, teilweise drei verschiedene Platten zu einer zusammenzuformen. Darauf verschlossen wir mit zwei dieser Platten jeweils eine der Seiten der Rotorplatten. Die einzelnen Teile bestrichen wir erst mit Holzleim und pressten anschließend die Platten und das Sperrholz mit Zwingen zusammen. Im Anschluss daran verschraubten wir das Sperrholz mit den Rotorplatten.



Abbildung 48: Vorgang der Verschraubung

Im Anschluss widmeten wir uns der Versiegelung der jeweils anderen Seite der Rotorplatten. Bevor wir jene Seite versiegelten, legten wir die nun zu verschließende Seite von den Rotorplatten auf weitere Sperrholzplatten auf und zeichneten die Umrisse der Magneteinlassungen auf diese ab. Anschließend zogen wir von jeder Einlassung zur Mitte hin noch einen Zentimeter ab, sodass sich an vier Stellen pro Sperrholzabdeckung ein Kreis mit einem Durchmesser von 6cm bildete. So wussten wir, welchen Teil wir von dem Sperrholz herausschneiden mussten, sodass wir dies im Anschluss daran taten.



Abbildung 51: zurechtgeschnittene Abdeckung der Rotorplatte

Hierzu benutzten wir einen Akkuschauber mit einem Lochkreissägenaufsatz von einem Durchmesser von drei Zentimetern. Nach dem Aussägen konnten wir auch diese Löcher glattschleifen. Zur Stabilisierung der Magnete in den Rotorplatten, brachten wir außerdem Schaumstoff in



Abbildung 49: Schaumstoff in den Rotorplatten

den Löchern für die Magnete auf der nicht zu den Spulen zeigenden Seite an, sodass eine Beschädigung dieser und eine zu hohe Geräuschkulisse durch die Dämpfung vermieden werden würden.



Abbildung 50: Lochkreissägenaufsatz



Anschließend befestigten wir auch diese Platten Teilstücke mit Hilfe von Leim, Zwingen und Schrauben an der jeweiligen Rotorplatte.

Abbildung 52: fertige Rotorplatte

4.3 Der Stator

Mit jener Abhandlung war der Rotor fertig, sodass nun der Erbau des Stators folgen konnte. Auch dieser sollte eine ähnliche Form wie der Rotor erhalten. Dieses wohl zunächst eher aus ästhetischen, aber auch aus praktischen Gründen, da es uns so leichter möglich war, die Spulen in passender Höhe zu den sich ändernden Magnetfeldern bzw. den Magneten selbst zu positionieren. Da also der Stator eine ähnliche Form erhalten sollte, wie die Rotorplatten, skizzierten wir den



Abbildung 53: Grundform des Stators

gleichen Kreis mit den gleichen 30 Zentimetern Durchmesser auf ein gleiches Stück Holz. Jedoch setzten wir eine Art trapezförmiges Konstrukt an den Kreis heran, das dazu dienen sollte eine Stütze für den Generator zu sein und gleichzeitig den Stator zu fixieren. Dieses Trapezstück brachte dabei einen Abstand zum Boden von etwa 15 Zentimetern ein und wurde mit einem Winkel zur unteren Kante von ca. 70 Grad aufgezeichnet. Nach der Beendigung dieser Skizze schnitten wir auch dieses Teil aus. Dazu nutzten wir eine Kreissäge bei den Geraden und eine Stichsäge bei den Rundungen. Auch hiernach wurden alle Unebenheiten mit entsprechenden Materialien behoben, sodass das Grundgerüst des Stators nun vorhanden war.

4.3.1 Spulen

Nun stellte sich die Frage, wie wir die Spulen und vor allem welche Spulen wir in den Stator einlassen wollten. Wie bereits erwähnt, waren manche Teile schwieriger zu besorgen als andere. Die Spulen waren ein Teil davon. Als wir im Internet und in Fachgeschäften nach Spulen suchten, die auf unsere Ansprüche zutrafen, stießen wir auf große Schwierigkeiten. Wir hatten uns nach drei Spulen gleicher Art mit dünnem Draht, möglichst vielen Windungen und großem Durchmesser aber dafür schmaler Breite erkundigt. Egal wo wir suchten, solche

Spulen waren nicht zu beschaffen. Es blieb die Möglichkeit offen, die Spulen selbst herzustellen. Wir legten uns auf die Größe der Spulen fest. Sie sollten einen äußeren Durchmesser von 4cm, einen inneren Durchmesser von 3cm, eine Breite von 1cm und einen Drahtdurchmesser von 0,1mm erhalten. Die Kriterien, nach denen wir dies entschieden, waren die Materialkosten, die Umsetzbarkeit und die Materialien, die uns zur Verfügung standen. Die Dicke des Drahtes wurde dabei unter Beratung mit den Fachkräften festgelegt, da durch die dünne Dicke des Drahtes besonders viele Windungen erzielt werden konnten, um einen möglichst effizienten Generator herstellen zu können.

4.3.1.1 Die Spulengehäuse

Zur Konstruktion einer Spule benötigten wir einen Kern und zwei äußere Begrenzungen, damit es möglich war, den Draht, den wir im Anschluss noch käuflich erwerben mussten, dort herumzuwickeln. Mit einer von uns erstellten Formel, die teils aus dem Internet übernommen war, berechneten wir, dass wir etwa 700 Meter brauchen würden, um unsere Spulen zu befüllen. Später stellte sich jedoch heraus, dass dies nicht mit der Realität übereinstimmte, sondern deutlich zu wenig war, weshalb wir später unsere Spulen noch vergrößerten, doch fuhren wir zunächst mit dieser Menge an isoliertem Kupferdraht fort. Für beide aufgezählten Komponenten nutzten wir Holz. Aus einem Rundholz, mit einem Durchmesser von 3cm, bildeten wir die Kerne der Spulen. Wir schnitten hierzu mit einer Säge drei je 1cm lange Stücke ab. Für die Begrenzungen verwendeten wir erneut das bereits verwendete Sperrholz. Mit einem Zirkel zeichneten wir insgesamt sechs Kreise mit einem Radius von



Abbildung 54:
fertiges
Spulengehäuse

2,5 Zentimetern auf das Sperrholz und schnitten diese darauf erneut mit dem Lochkreissägenaufsatz und einer Bohrmaschine aus. 2,5 Zentimeter sollten es deswegen sein, damit wir einen Sicherheitsrand hatten, der den Kupferdraht in Grenzen halten würde. Anschließend begradigten wir alle Komponenten. Wir fügten die Teile aneinander, indem wir an die Außenseiten aller Holzkerne Holzleim aufbrachten und dann die Sperrholzscheiben mit Zwingen mittig dagegen pressten.



Abbildung 55: Pressung
der Spulengehäuse

4.3.1.2 Das Aufwickeln der Spulen

Als alles getrocknet war, ging es nun darum, unsere Spulengehäuse aufzuwickeln. Unser gekaufter Kupferdraht wurde auf einer einzelnen langen Spule geliefert.

Schon zu Beginn wurde uns klar, dass ein händisches Aufwickeln eher weniger in Frage kam. Stattdessen nutzten wir unsere Bohrmaschine für ein schnelles gezieltes Aufwickeln. Wir führten eine lange Schraube durch die gekaufte Spule und spannten anschließend diese in einen Schraubstock ein. Schon zuvor statteten wir unsere selbst hergestellten Spulengehäuse mit einer Möglichkeit zur Anbringung aus, indem wir ein 4mm dickes Loch durch die Mitte jener bohrten und eine entsprechende M4 Schraube



Abbildung 56: gekaufter Draht / gekaufte Spule

hindurchsteckten, welche wir darauf mit einer Mutter auf der anderen Seite befestigten. Zufälligerweise erwies sich diese Befestigung als Möglichkeit, unsere leere Spule in unseren Akkuschauber einzuspannen. Anfangs wickelten wir noch



Abbildung 57: Aufwicklungsvorgang der Spulen

ein wenig mit der Hand den Kupferdraht vor, damit er fest auf dem Kern saß. Anschließend begannen wir damit, die Bohrmaschine zu starten und so den Draht zunehmend schneller bis hin zur Höchstgeschwindigkeit auf den Holzkern aufzuwickeln.

Hierzu benötigten wir alle Anwesenden: eine Person, die den Akkuschauber bediente, eine Person, die auf die sich abrollende Spule achtete, damit sich nicht von



Abbildung 58: alle Involvierten bei der Aufwicklung der Spulen

der Schraube sprang und eine Person, die den Draht in seiner

Bewegung führte und stützte. Die erste Spule befüllten wir noch auf die geplanten 4cm auf, als wir jedoch auf gleiche Art und Weise mit der zweiten und dritten Spule fortfuhren, viel uns der Mangel an isoliertem Kupferdraht auf, sodass diese anschließend kleiner als die erste ausfielen. Um zu überprüfen, dass unsere Spulen auch eine Funktion vorzuweisen hatten, löteten wir jeweils die beiden Enden der Spulen an, was uns deshalb gelang, weil wir zu Beginn des Aufwickelns ausreichend viel Draht im unteren Bereich der Windungen herauslegten. Dann prüften wir mit der Hilfe eines Durchgangprüfers, ob der Draht zu Schäden gekommen war. Dies war besonders wichtig, da wir erstens sonst keinen Strom und keine Spannung hätten erzeugen können und zweitens der Draht beim Aufwickeln der dritten Spule gerissen war, sodass wir uns so davon überzeugen konnten, dass unsere Reparatur funktioniert hatte. Der Draht war auf Grund von

Riffeln auf dem Spulenkern der abzurollenden Spule gerissen, da er wohl durch diese gebogen und überspannt wurde. Sobald wir in der Aufwicklungsphase diesen Riss bemerkten, stoppten wir die Bohrmaschine und spannten alles aus ihren Vorrichtungen aus.

Da wir beide Drahtenden wieder miteinander verlöten mussten, nahmen wir einen LötKolben zur Hand, versorgten diesen mit Strom, isolierten beide Enden darauf mit diesem ab, spannten beide Drahtenden in Haltvorrichtungen ein, verhakten diese ineinander und verlöteten sie darauf mit Lötzinn. Nach der Lötung isolierten wir die Lötstelle darauf mit durchsichtigem Isolierband, bauten alles wie zuvor wieder auf und fuhren mit dem Aufwickeln fort. Als im Zuge dessen auch die letzte Spule erfolgreich bestückt wurde, waren unsere Spulen nun einsatzbereit.



Abbildung 60: Reparatur des gerissenen Drahtes



Abbildung 59: fertig aufgewickelte Spulen

4.3.1.3 Die Anbringung der Spulen im Stator

Da wir bereits die Anbringungsstelle der Spulen gefertigt hatten, stellte sich nun die Frage, wie wir sie an den Stator befestigten sollten. Das Einlassen der Teile in den Rotor hatte bereits gut funktioniert, folglich entschieden wir uns dazu, auch bei dem Stator ähnlich zu verfahren. Demzufolge war es notwendig, erneut Löcher aus einer Holzplatte herauszusägen. Dieses Mal waren es allerdings drei statt vier Löcher, die wir mit 120 Grad Abstand zueinander und 4cm Abstand zum Rand zunächst



Abbildung 61: Stator mit Löchern, Kugellager und Holzplatten zur Befestigung der Spulen auf einer Seite

mit einem Zirkel aufzeichneten und darauf mit einer Stichsäge aussägten. Hierbei waren diese im Durchmesser 6cm lang, damit wir genug Platz für die Montage der 5cm Spulen hatten. Wir erhielten durch die Anordnung die Form eines Dreiecks, dessen Hypotenuse nach unten gerichtet wurde. Hiernach schnitten wir uns zwei dünne Nadelholz Bretter zurecht, die dazu dienen sollten, die Spulen an diesen festzuschrauben. Dies bedeutete, dass wir eine Seite bestimmten und auf diese zwei recht dünne, aber breite Bretter anbrachten, die über die Löcher führten. Dies taten wir, indem wir sie waagrecht zur Unterseite des Stators mit Leim anbrachten

und anschließend verschraubten. In der Mitte des so abgedeckten Loches wurde dann ein 4mm dickes Loch gebohrt, in das dann die Spulen mit ihren M4 Schrauben aufgesteckt werden konnten. Wir führten dies aus, indem wir zuerst die bereits zusammengeschaubten Spulen, also die Gewindestangen im Inneren dieser auseinanderschraubten, auf beide Seiten der Spulen entsprechende Unterlegscheiben steckten, die Schraube wieder hindurchführten und zuletzt auch durch die gebohrten Löcher steckten. Auf der anderen Seite der Holzbretter, durch die wir die Spulen einführten, legten wir erst eine weitere Unterlegscheibe auf und verschraubten dann alle Spulen fest mit entsprechenden M4-Muttern mit dem Stator. In der Mitte der runden Komponente des Stators sollte sodann ein Kugellager eingelassen werden, um die Rotorplatten frei bewegen zu können. Wir entschieden uns zuvor für ein Kugellager von einem äußeren Durchmesser von 3,1 Zentimetern, weil dieses eines der breitesten war, das uns angeboten wurde, während wir uns auf eine Mindestbreite von einem Zentimeter geeinigt hatten, da sonst die Anbringung dieser nicht möglich gewesen wäre. Im Anschluss daran bohrten wir ein 3,1cm großes Loch in die Mitte der runden Komponente des Stators und schoben das Kugellager dort hinein.

4.4 Die seitlichen Stützen

Nun galt es, zwei Stützen zu entwerfen, die die Achse als zusätzlichen Halt halten würden. Da diese viel Gewicht halten sollten, da die bisherigen Komponenten doch recht schwer geworden waren, fertigten wir sie aus Eichenholz. Zudem sollten auch diese ein Kugellager erhalten, um ein leichtes Drehen zu ermöglichen. Insgesamt bestellten wir drei der bestmöglichen Kugellager. Die Form der Stützen



Abbildung 63: Grundform der Stützen

war grundsätzlich von keiner großen Bedeutung, doch wollten wir sie im gleichen Stil wie die anderen Komponenten gestalten. Daher bekamen auch diese im oberen Bereich eine kleine Rundung und im unteren eine dreieckige Konstruktion.



Abbildung 62: Stützen mit Gewindelagerlöchern

Wir legten die Rundung auf die Höhe, in der es möglich war, ihre Mitte als Kugellagerplatz zu bestimmen. Wir mussten darauf achten, dass diese in gleicher Höhe waren, da sonst keine Drehung des Generators möglich gewesen wäre. Nachdem die Zeichnungen dieser Figuren beendet, ausgeschnitten und begradigt waren, bohrten wir auch in diese Löcher auf der zuvor passend abgemessenen Höhe in

die Stützen und steckten in diese zunächst geglätteten Löcher die Kugellager mittig hinein. Sowohl hier als auch bei dem Stator nutzen wir hierzu einen Zollstock.

4.5 Die Grundplatte

Unsere einzelnen Bauteile brauchten jetzt lediglich eine Bodenplatte. Wir wussten, dass unsere Gewindestangenachse etwa 30 Zentimeter lang war, sodass wir uns eine Platte mit einer Kreissäge zurechtschnitten, auf der es möglich war, alles zu montieren und zusätzlich die noch folgende Verkabelung unterzubringen. Infolgedessen wurde die Platte auf eine Größe von 41,2cm * 26,9cm zugeschnitten. Auch diese



Abbildung 64: Bodenplatte mit Stützen

wurde nachfolgend entgratet und geschliffen. Die Anbringung der einzelnen Komponenten stellte sich als schwierig heraus. Es war von Nöten, die äußeren zwei angefertigten Stützen mit einem maximalen Abstand von 25 Zentimetern waagrecht zu positionieren, da wir später noch eine Möglichkeit brauchten, um den Generator in Bewegung zu setzen, weshalb alles recht eng zueinanderstehend sein musste. Die Magnetplatten sollten zudem mit einem möglichst geringen Abstand an die Spulen herangeführt werden, um möglichst viel Strom erzeugen zu können. Aus diesen Gründen mussten wir Winkel als Befestigungsmittel ausschließen. Stattdessen entschlossen wir uns zur Befestigung der Komponenten an der Grundplatte durch Schrauben, die wir von unterhalb der Platte hinein in die Stützen und den Rotor drehen wollten. Hierzu benötigten wir mehrere Hände und Zwingen, um die einzelnen Teile erst mit Leim an Ort und Stelle zu fixieren, sie dann zu durchbohren und schließlich festzuziehen. Daraufhin steckten wir provisorisch die Achse, die wir ebenfalls als Richtlinie für die Montage verwendeten, mitsamt an den entsprechenden Stellen durch die Rotorplatten und die Kugellager der inneren Durchmessergröße von 1,2cm hindurch. Somit war der Generator nun insgesamt 42,5cm hoch. War dies getan, sahen wir die Grundkonstruktion des Generators erstmals vor uns. Allerdings hatte er zu diesem Zeitpunkt noch keine Funktion.

4.6 Die Schaltung

Damit er funktionsfähig werden konnte, war es notwendig, die Spulen so zu verkabeln, dass wir ihnen den Strom, der in diesen induziert werden würde, entnehmen konnten. Wie bereits zuvor erwähnt, werden bei einem Dreiphasenwechselfeldgenerator sehr oft entweder die Stern- oder die Dreieckschaltung verwendet. Zu Beginn entschieden wir uns für die

Dreieckschaltung und löteten dementsprechend die Spulen im Dreieck aneinander. Erfolge bei einer messbaren Stromproduktion blieben jedoch größtenteils aus, da immer nur eine Spule ohne weitere Maßnahmen angesteuert werden konnte. Aus diesem Grund verwarfen wir die Idee und versuchten anfänglich erst einmal aus jeder einzelnen Spule einen Strom zu



Abbildung 65: Versuch einer Dreieckschaltung

entnehmen bzw. eine Spannung zu messen. Als dies funktionierte, überlegten wir uns selbst eine Schaltung, mit der wir den Generator betreiben konnten. Wir wollten nicht riskieren, dass die Wechselströme, die wir erzeugten, sich auf Grund von Produktionsungenauigkeiten gegenseitig aufhoben. Folglich transformierten wir die erzeugten Wechselströme erst je mit einem Gleichrichter zu drei Gleichströmen, indem wir die jeweils zwei Kabel der einzelnen Spulen an den Wechselspannungskontakten anlöteten. Anschließend schalteten wir die Plus-

und Minuspole der einzelnen drei Spulen aneinander. Darauf folgte eine in Reihe Schaltung eines Kondensators mit den einer Kapazität von $220\mu\text{F}$ (Mikrofarad) und einer Arbeitsspannung von 50V, der dafür sorgen sollte, die entstandene Spannung zu glätten bzw. die Welligkeit der Spannung zu verringern. Darüber hinaus ermöglichten wir es, die jeweiligen Spulen auch einzeln zu messen, indem wir sie anschließend mit abnehmbaren Leitern verbanden. Die Lötungen erfolgten auf einer recht großen Leiterplatte, nachdem wir die einzelnen Drähte der Spulen mit

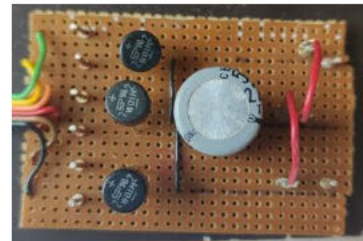


Abbildung 66: Schaltung unseres Generators

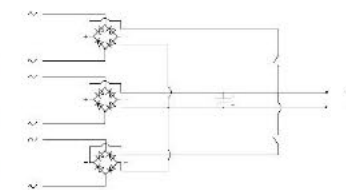


Abbildung 67: Schaltplan unseres Generators

Kabeln durch Verlötung verlängerten und nach unten zu einer Seite der Grundplatte führten, um die einzelnen Bestandteile der Schaltung sauber verlöten zu können. Nun lag uns eine funktionierende Schaltung (siehe Schaltplan) vor, mit der wir unserem Generator eine Leistung entnehmen konnten.

4.7 Die Kurbel

Das Letzte, dass jetzt noch fehlte, war eine Art Kurbel, mit der wir den Generator in Bewegung versetzen konnten. Am Anfang planten wir noch mit einer Zahnradübersetzung, um eine möglichst hohe Umdrehungsgeschwindigkeit erzeugen zu können. Allerdings gaben wir uns vorläufig mit einer einfacheren Kurbel zufrieden, da Zahnräder zu diesem



Abbildung 68: angebrachte Kurbel

Zeitpunkt des Fortschritts noch nicht zur Verfügung standen. Wir fertigten diese aus einem Rundholz und einem kleinem Stück Eiche. Das Rundholz sägten wir auf Handbreitengröße ab und befestigten es mit einer Schraube und Leim senkrecht an einem Ende des Eichenholzes. Auf der anderen Seite bohrten wir ein 1,2cm großes Loch, um die Kurbel mit Hilfe von Muttern an der Gewindestange befestigen zu können.

4.8 Der Zusammenbau

Mit zahlreichen (selbstsichernden) Muttern und Unterlegscheiben galt es nun, die Rotorplatten, den Stator, die Stützen, also das Gestell, und die Gewindestange miteinander zu verbinden. Hierzu war es notwendig, nacheinander Muttern und Unterlegscheiben so zwischen den Rotorplatten und den Kugellagern aufzuschrauben, dass alles fest miteinander verbunden war. Dies gelang durch ein stetiges Weiterschrauben aller Komponenten auf der Gewindestange,

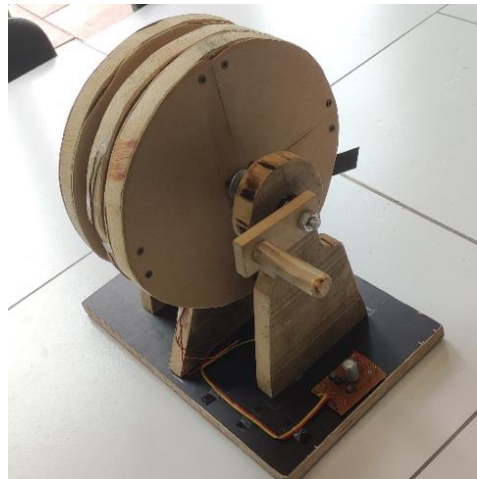


Abbildung 69: fertig zusammengebauter Generator

nachdem man die darauf positioniert hatte. Mit Schraubenschlüsseln wurden anschließend die Muttern fest angezogen und darauf auch die Kurbel an die Achse mit zwei weiteren Muttern angebracht. Die erste Version des Generators war somit fertig. Jedoch erhielt er im weiteren Verlauf noch manche Verbesserungen, die dazu führen sollten, den Wirkungsgrad des Generators zu erhöhen.

5 Auswertung des Generators - Problembehebungen und Verbesserungen

Die soeben beschriebene erste fertige Version unseres Generators konnte in den Versuchen, die wir durchführten, nicht die erhoffte Leistung, wenigstens eine Lampe leuchten zu lassen, erbringen. Demzufolge waren Verbesserungen nötig, da für uns 3 Volt bei 0,01 mA unter höchstmöglicher Drehgeschwindigkeit nicht ausreichten. Die erste mögliche Verbesserung, die uns in den Sinn kam, um die Leistung zu erhöhen, war es unsere Spulen bzw. deren Umwicklungen zu vervielfachen, da diese, wie auf einem vorherigen Bild zu sehen, zu diesem Zeitpunkt weder gleichmäßig noch voll aufgefüllt waren. Dies bedeutete ein weiteres Beschaffen von Kupferdraht, da unser bisheriger Vorrat definitiv nicht mehr ausreichen würde. Wir bestellten insgesamt einen weiteren kilometerlangen

Draht einer Dicke von 0,1mm, sodass wir uns sicher sein konnten, dass wir alle Spulen voll aufwickeln konnten. Um dies zu erreichen, mussten wir zunächst die bereits eingebauten Spulen aus unserem Stromkreis herauslöten, von ihrem festen Platz abmontieren und anschließend nacheinander aufwickeln. Hierfür löteten wir anfangs das Ende einer Spule an unseren neugekauften Kupferdraht, spannten die aufzuwickelnde Spule erneut in einen Akkuschrauber ein, steckten die kupferdrahtspendende Spule auf eine Schraube, die wir an einem Tisch befestigten, wickelten die erste Spule danach vorsichtig auf und trennten dann ihre Verbindung zu dem neugekauften Kupferdraht. Nachdem wir mit den anderen Spulen genauso verfahren waren, löteten wir sie wieder in ihren ursprünglichen Stromkreis ein und befestigten sie erneut an ihren vorherigen Plätzen.

Des Weiteren beschafften wir uns Eisenkerne, um die Magnetfelder, die unsere Spulen umgeben, erhöhen zu können. Hierfür führten wir sie in unsere Ringmagneten ein, da diese zu einer Bündelung von Magnetfeldlinien in der Lage sind. Da der innere Durchmesser unserer Magneten 4cm beträgt, bestellten wir Eisenkerne mit einem äußeren Durchmesser von 3,9cm, damit wir noch Spielraum für Veränderungen bzw. Passungengenauigkeiten hatten. Bei dem Versuch, diese in die Magnete einzulassen, stellten wir fest, dass ein erneutes Herausholen beinahe unmöglich war, weshalb wir auf der Rückseite der Rotorplatten jeweils vier Löcher auf Höhe der Ringmagnetlöcher bohrten. Dies ermöglichte uns von da an, die Eisenkerne durch das Hindurchführen eines dünnen starren Objektes durch diese Löcher entfernen zu können. Da uns dies nun möglich war, führten wir Versuche durch, um die jeweiligen Erzeugnisse unseres Generators mit einer oder zwei Rotorplatten bzw. mit und ohne Eisenkernen zu testen.



Abbildung 71:
Rotorplatten mit
Magneten



Abbildung 70: Hinzufügung der Löcher für die
Eisenkernentfernung

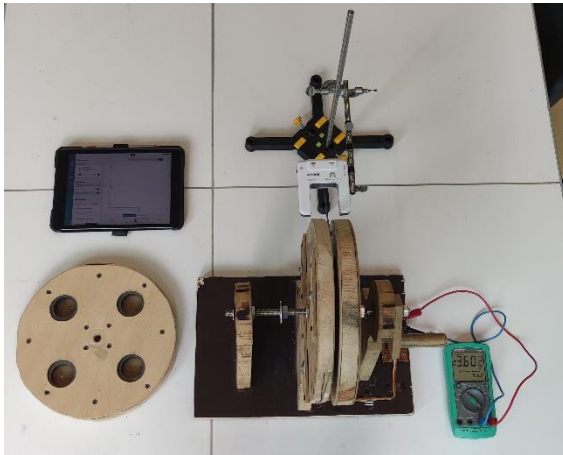


Abbildung 72: Aufbau der Auswertung der Generators

Für die Versuche haben wir verschiedenste Kombinationen sowohl in ihrer erzeugten Spannung als auch in ihrer Stromstärke untersucht bzw. haben diese gemessen. Jedes dieser Ergebnisse der Teilerperimente wurde mit einer annähernd gleichen Umdrehungsgeschwindigkeit von 150 Umdrehungen pro Minute aufgenommen.

Jene Umdrehungsgeschwindigkeit ist mit Hilfe einer Lichtschranke zu messen, die auch mit dem I-Pad als Auswertungsgerät verbunden wird. Die Drehung wird mit eigener möglichst gleichmäßiger Körperkraft erzeugt. Die generierte Stromstärke und die Spannung werden während dieser Drehung mit dem in der Abbildung unten rechts zu sehenden Messgerät gemessen und anschließend alle so durchgeführten Teilversuche in folgende Tabelle übertragen.

Tabelle 5: Auswertungsergebnisse Generator

Spannung in V	Strom in mA	Umdrehungen pro Minute	Anzahl der Platten	Anzahl der Eisenkerne insgesamt	Magneten Stellung	Eisenkerne Stellung
3,981	2,4	150	1	1	0 Keine	Keine
8	4,1	150	2	2	0 Versetzt	Keine
1,312	0,34	150	2	2	0 Gleichpolig	Keine
5,8	0,6	150	2	2	0 Ungleichpolig	Keine
6,35	1,65	150	1	1	4 Keine	Alle ausgefüllt
6,8	3,6	150	2	2	8 Versetzt	Alle ausgefüllt
5,56	0,54	150	2	2	8 Gleichpolig	Alle ausgefüllt
7	5,1	150	2	2	8 Ungleichpolig	Alle ausgefüllt
7,3	3,8	150	2	2	4 Versetzt	Eine gefüllt andere Leer
4,1	1,2	150	2	2	4 Gleichpolig	Eine gefüllt andere Leer
7,3	4,9	150	2	2	4 Ungleichpolig	Eine gefüllt andere Leer

Aus dieser Tabelle lassen sich mehrere Zusammenhänge feststellen. Allerdings wirft sich auch eine Frage auf, da ein Ergebnis nicht unseren Erwartungen entspricht. Wenn man eine einzelne Platte ohne Eisenkerne mit einer Platte vergleicht, die mit Eisenkernen gefüllt ist, lässt sich feststellen, dass sich die Leistung des Generators durch die Eisenkerne nach der Formel $P = U * I$ von 0,0095544W auf 0,0104775W erhöht. Ein Hinzufügen einer zweiten Platte ohne Eisenkerne zu der einzelnen Platte ohne Kerne führt des Weiteren bei einer

versetzten Stellung der Magneten der beiden Platten zueinander zu einer Erhöhung auf 0,0328W. Bei einer gleichpoligen Stellung (also Nord und Nordpol bzw. Süd und Südpol auf einer Höhe) führt es jedoch zu einer Reduzierung auf 0,00044608W und bei einer ungleichpoligen Stellung (also Nord und Südpol auf einer Höhe) zu einer leichten Absenkung auf 0,00348W. Hieraus wird deutlich, dass die versetzte Stellung der Magneten am effektivsten zu sein scheint, was darauf zurückzuführen ist, dass so eine schnellere Veränderung des Magnetfeldes hervorgerufen wird, sodass nach der bereits bekannten Formel für die Induktionsspannung eine höhere Spannung induziert wird. Aus den ersten geschilderten Ergebnissen wird ebenfalls deutlich, dass ein Hinzufügen von Eisenkernen gleichermaßen einen Anstieg der Leistung erbringt. Wenn man allerdings die Ergebnisse betrachtet, die entstehen, wenn man beide Rotorplatten mit Eisenkernen bestückt, fällt einem der Unterschied zwischen den jeweiligen prozentualen Anstiegen auf. Dieser beträgt bei der einzelnen Platte $(0,0024A \cdot 3,981V) / (0,00156A \cdot 6,35V) - 100\% = 9,66\%$, bei zwei gleichpolig ausgerichteten Platten $(0,00054A \cdot 5,56V) / (0,00034A \cdot 1,312V) - 100\% = 673\%$, bei zwei ungleichpolig ausgerichteten Platten $(0,0051A \cdot 7V) / (0,0006A \cdot 5,8V) - 100\% = 1025\%$ und bei zwei versetzt ausgerichteten Platten $(0,0038A \cdot 7,3V) / (0,0041A \cdot 8V) - 100\% = -15,427\%$. Grundsätzlich lässt sich zwar festhalten, dass die Eisenkerne eine Erhöhung der Leistung bewirkt haben, jedoch nicht im Fall der versetzt ausgerichteten Platten, obwohl diese zunächst die stärkste Ausrichtung darstellte. Dieser Zusammenhang ist wohl auf sich aufhebende Magnetfelder zurückzuführen, was im Weiteren hier noch nicht dargestellten Verlauf künftig untersucht werden wird, um dies Erzeugnisse des Generators zu maximieren. Solch ein Aufheben der magnetischen Felder kann genauso auch bei den anderen Fällen der Fall sein, sodass in Zukunft auch noch weiter betrachtet werden können. Ebenso versuchten wir eine höhere Leistung durch nur ein einseitiges Befüllen der Rotorplatten zu erzeugen. Zu unserem Erstaunen sorgte dies bei ungleichpoliger Stellung zu einer Leistung von 0,03577W, was unsere Annahme, dass die Magnetfelder sich gegenseitig aufheben könnten, bekräftigt, da die Verringerung des B-Feldes einer Seite zu einer höheren Leistung führt. Für den Moment lässt sich folglich sagen, dass unser Generator dazu in der Lage ist, eine Leistung von $0,0049A \cdot 7,3V = 0,0357W$ bei 150 Umdrehungen pro Minute in ungleichpoliger Stellung der Magneten der Rotorplatten mit einseitiger Befüllung dieser mit Eisenkernen durch Drehung zu erzeugen. Folglich ist es uns gelungen, eine Lampe zum Leuchten zu bringen und so unser Ziel zu erreichen.

6 Diskussion

Das gesamte hier dargelegte Projekt lässt sich zusammenfassend als geglückt und lehrreich bezeichnen. Zwar gab es teilweise Probleme bei der Umsetzung unseres Zieles einen eigenen Generator zu bauen und der Erfassung all der benötigten bzw. geltenden Theorie eines Generators, doch ist es uns letztendlich gelungen, es umzusetzen.

Bei der Betrachtung jener Komplikationen, kann man sowohl einen Blick auf den reinen Bau, die dazugehörigen Experimente als auch das Verständnis für die Theorie werfen, um Gleiches bei zukünftigen Projekten zu vermeiden. Der wahrscheinlich größte Punkt ist hierbei das Verhältnis von dem zur Verfügung stehenden Material und dem eigentlich benötigten Material. Es kam vor allem in Verbindung mit den Spulen zu Engpässen, welche auf eine fehlerhafte Kalkulation zurückzuführen sind. Folglich wäre eine intensivere Planung für ein nächstes Projekt ratsam. Des Weiteren sind einige Schwierigkeiten bei den aufgeführten Experimenten aufgetreten, wobei diese teils auf fehlendes Verständnis als auch auf technische Komplikationen zurückzuführen sind. Allerdings ist es uns gelungen, sie dennoch durchzuführen und Schlüsse aus diesen zu ziehen. Das dabei am häufigsten auftretende Problem hing stets mit dem erwähnten Oszilloskop zusammen, da dieses oft wegen zurückgesetzten Einstellungen den Dienst verweigerte.

Ebenfalls werfen die Ergebnisse der Auswertung des Generators noch teils Fragen auf, welchen wir noch weiter auf den Grund gehen werden. Wir vermuten einen Zusammenhang mit den unterschiedlichen Magnetfeldern der Rotorplatten, da diese sich möglicherweise selbst aufheben und so die Leistung verringern könnten. Darüber hinaus war es teils notwendig, mehrere Versuche mehrmals durchzuführen, da entweder das entsprechende Messgerät falsche Ergebnisse aufzeichnete oder uns manche essenzielle Messwerte z.B. im Bereich der Auswertung des Generators fehlten.

Um jedoch auf den eigentlichen Sinn dieses Projektes zu sprechen zu kommen, lässt sich größtenteils sagen, dass der Entwurf eines Generators der Marke Eigenbau durchaus möglich ist. Dennoch ist es so, dass ein effektiver und erzeugungsstarker Generator deutlich mehr erfordert, als es bei unserem Generator der Fall ist, auch wenn es uns letztendlich gelungen ist, mit ihm eine Lampe zum Leuchten zu bringen und somit unser Ziel zu erreichen. Bei einer weiteren Bearbeitung bzw. Verbesserung unseres Generators wäre Vieles möglich. Zum einem im Bereich der Spulen, zum anderen im Bereich des

Magnetfelds. Bei den Spulen wäre eine Verdopplung der Anzahl möglich, indem im Stator weitere Spulen eingelassen und in die Schaltung des Dreiphasengenerators integriert werden würden. Ebenso könnten weitere Magneten oder eine bessere Füllung der bereits vorhandenen eine Verbesserung herbeiführen. Um Klarheit bei den Messwerten für das Hinzufügen von Eisenkernen zu schaffen, könnte man mit Hilfe eines Magnetfeldstärkemessers eine mögliche Aufhebung dieser in Erfahrung bringen, um entsprechende Maßnahmen wie z.B. eine Verschiebung der Magneten unter anderem auf der Gewindestange zu ergreifen. Zudem wäre eine Übersetzung für das Drehen des Generators mit Hilfe von Zahnrädern möglich. Zum jetzigen Zeitpunkt sind solche jedoch nicht zu beschaffen, da metallische widerstandsfähige Zahnräder bisher nicht für uns zu besorgen waren.

Überdies wäre eine Bestimmung der Induktivität unserer Spulen sehr interessant, da wir bisher nur wissen, dass etwa 1,7 Kilometer Kupferdraht auf sie verteilt wurden und die im Bau beschriebenen Größen aufweisen. Möglich wäre dies z.B. durch das Einbauen dieser in einen Schwingkreis und einer darauffolgenden Betrachtung des Schwingverhaltens. Unter gleichem Verfahren wäre es ebenfalls möglich, unseren Induktionsversuch abzuschließen, da eine in Erfahrung Bringung der Veränderung der Induktivität einer Spule durch Kerne aktuell wegen fehlender Grundangaben der verwendeten Spule nicht möglich ist.

Insgesamt lässt sich unser Projekt für uns jedoch bisher als voller Erfolg und lehrreiche Erfahrung bezeichnen.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Inhalt

- Inhalt 1: Definition Generator: Fischer, Der Generator <https://www.fischerfutureheat.de/generator/>, 23.04.2023, S. 5-6
- Inhalt 2: Die Historie / Entdeckung der Induktion: Duden Learnattack GmbH / Lern Helfer, Entdeckung der elektromagnetischen Induktion, <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/entdeckung-der-elektromagnetischen-induktion#>, 23.04.2023, S.6-7
- Inhalt 3: Informationen über Michael Faraday: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion – Michael Faraday, <https://www.leiflphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/geschichte/michael-faraday-1791-1867>, 23.04.2023, S. 6
- Inhalt 4: Definition / Wirkung Influenz: Duden Learnattack GmbH / Lern Helfer, Influenz, <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/influenz>, 30.04.2023, S. 6
- Inhalt 5: Das Phänomen der Induktion, Duden Learnattack GmbH / Lern Helfer, Grundversuche zur elektromagnetischen Induktion, <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/grundversuche-zur-elektromagnetischen-induktion>, 30.04.2023, S. 7
- Inhalt 6: Induktion durch die Bewegung eines separaten Leiters durch ein Magnetfeld: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion - Induktion und Lorentzkraft, <https://www.leiflphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 30.04.2023, S. 8-9
- Inhalt 7: Die Linke-Hand-Regel: Studyflix, Linke Hand Regel, <https://studyflix.de/elektrotechnik/linke-hand-regel-6330>, 30.04.2023, S. 8
- Inhalt 8: Die bewegte Leiterschleife im Magnetfeld: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion - Induktion und Lorentzkraft, <https://www.leiflphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 01.05.2023, S. 9-13
- Inhalt 9: Induktion durch Änderung der Spulengröße: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion - Induktion und Lorentzkraft, <https://www.leiflphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 01.05.2023, S. 13
- Inhalt 10: Induktion durch Änderung des Winkels zwischen einer Leiterschleife und einem Magnetfeld: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion - Induktion

- und Lorentzkraft,
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 01.05.2023, S. 14-15
- Inhalt 11: Induktion durch Änderung des Winkels zwischen einer Leiterschleife und einem Magnetfeld: IBBW, Induktion durch Drehen einer Spule, https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/e_lehre_2/induktion/drehspule.htm, 01.05.2023, S. 14-15
 - Inhalt 12: Induktion durch Magnetfeldänderung: simpleclub, Induktion durch Änderung des Magnetfeldes, <https://simpleclub.com/lessons/physik-induktion-durch-anderung-des-magnetfeldes>, 06.05.2023, S. 15-16
 - Inhalt 13: Induktion durch Magnetfeldänderung: LEIFiphysik, elektromagnetische Induktion – Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte, <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte>, 06.05.2023, S.15-16
 - Inhalt 14: Magnetischer Fluss: Studyflix, Magnetischer Fluss, <https://studyflix.de/elektrotechnik/magnetischer-fluss-3141>, 06.05.2023, S. 15-16
 - Inhalt 15: Das Faraday'sche Induktionsgesetz: Studyflix, Induktionsgesetz, <https://studyflix.de/elektrotechnik/induktionsgesetz-1896>, 06.05.2023, S.16
 - Inhalt 16: Die Lenz'sche Regel: LEIFiphysik, LENZsche Regel, <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel>, 06.05.2023, S.17
 - Inhalt 17: Die Lenz'sche Regel: Studyflix, Lenzsche Regel, <https://studyflix.de/elektrotechnik/lenzsche-regel-1811>, 06.05.2023, S. 17
 - Inhalt 18: Wechselstrom zu Gleichstrom: Der Gleichrichter: Studyflix, Gleichrichter, <https://studyflix.de/elektrotechnik/gleichrichter-4565>, 06.05.2023, S. 18
 - Inhalt 19: Veränderung von Induktivität: Elektronik Fachbuch, Grundlagen der Elektronik, https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html, 13.05.2023, S. 20
 - Inhalt 20: Der Drei-Phasen-generator: Frueh123, Drehstromgenerator, <http://profi-stromgenerator.de/blog-einphasen-und-dreiphasen-generatoren/>, 07.05.2023, S. 21-22

- Inhalt 21: Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte: LEIFlphysik, Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte (Demonstrationsversuch),
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/versuche/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte-demonstrationsversuch>, 12.05.2023, S. 31-32 (auch gesamte Grundidee vom Versuch, sprich 22-32)
- Inhalt 22: verschiedene Permeabilitäten: LUMITOS, Permeabilitätszahl,
<https://www.chemie.de/lexikon/Permeabilit%C3%A4tszahl.html>, 14.05.2023, S. 35
- Formeln: Bernd Mirow, Physik-Formeln / Sekundarstufe II, Elfte Auflage. 32 Abbildungen
- Alle weiteren Inhalte sind entweder frei bzw. selbst erarbeitet, oder durch Lehrkräfte in Erfahrung gebracht

7.2 Animationen

- Animation 1: eigene in Blender erstellte Animation (hier Gif), S.1
- Animation 2: Frueh123, Drehstromgenerator, <http://profistromgenerator.de/blog-einphasen-und-dreiphasen-generatoren/>, 07.05.2023, S. 21

7.3 Abbildungen

- Abbildung 1: eigene Aufnahme, S.5
- Abbildung 2: Fred Reed C., Model of Faradays Dynamo of 1831, https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_709848, 08.05.2023, S.7
- Abbildung 3: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion – Induktion und Lorentzkraft,
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 30.04.2023, S.8
- Abbildung 4: Studyflix, Linke Hand Regel, <https://studyflix.de/elektrotechnik/linke-hand-regel-6330>, 30.04.2023, S. 8
- Abbildung 5 - 13: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion – Induktion und Lorentzkraft,
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>, 01.05.2023, S. 9-13
- Abbildung 14: hu-Berlin, 4. Elektromechanik, https://www.physik.hu-berlin.de/de/nano/lehre/folder_pk2/4edyn5, 01.05.2023, S. 14

- Abbildung 15 - 16: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion – Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte, <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte>, 06.05.2023, S. 16
- Abbildung 17 - 18: Studyflix, Lenzsche Regel, <https://studyflix.de/elektrotechnik/lenzsche-regel-1811>, 06.05.2023, S. 17
- Abbildung 19 - 20: Studyflix, Gleichrichter, <https://studyflix.de/elektrotechnik/gleichrichter-4565>, 06.05.2023, S. 18
- Abbildung 21: Gerhard Klähn, Grundlagen der Elektrotechnik, https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html, 13.05.2023, S. 20
- Abbildung 22 - 23: Frueh123, Drehstromgenerator, <http://profistromgenerator.de/blog-einphasen-und-dreiphasen-generatoren/>, 07.05.2023, S. 21
- Abbildung 24: fahrzeug-elektrik, Autoelektrik, <https://www.fahrzeug-elektrik.de/Test/Generator.htm>, 07.05.2023, S. 22
- Abbildung 25 – 37: eigene Aufnahmen, S. 23-30
- Abbildung 38: LEIFlphysik, Elektromagnetische Induktion – Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte (Demonstrationsversuch), <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/versuche/induktion-durch-aenderung-der-magnetischen-flussdichte-demonstrationsversuch>, 12.05.2023, S. 31
- Abbildung 39 – 72: eigene Aufnahmen, S. 37-50

7.4 Diagramme

- Alle hier gezeigten Diagramme bzw. Graphen sind durch eigene Werte entstanden und wurden selbst angefertigt, 2022-2023

7.5 Tabellen

- Alle hier gezeigten Tabellen enthalten eigene Messwerte und wurden selbst angefertigt, 2022 - 2023

