

Maturarbeit

AXIAL FLUX ALTERNATOR

Verfasser Filip Meier

Betreuer Roberto Huber Fachlehrer Physik

Eingereicht an der Kantonalen Maturitätsschule für Erwachsene – Zürich 5. November 2010

A black bicycle is mounted on a stationary trainer. The bicycle has a black frame with 'VIRAGE' written on the top tube and '619' on the front fork. The seat is black with 'GT' on it. The trainer is blue and black, with a yellow foam roller on the back. The background is a light-colored wall and a wooden floor.

Kapitel 1
EINLEITUNG

1	Abstract	3
2	Technische Grundlagen	4
2.1	Permanentmagnete	5
2.2	Spannungserzeugung durch Induktion	6
3	Konstruktion	10
3.1	Axial Flux Alternator	11
3.2	Rotor	12
3.2.1	Rotorscheiben	13
3.2.2	Flanschen (Befestigung)	14
3.2.3	Zusammenbau des Rotors	15
3.3	Befestigungen	16
3.3.1	Aufbocken des Fahrrads	17
3.3.2	Befestigungspunkte für den Stator	18
3.4	Stator	20
3.4.1	Spulen	22
3.4.2	Form-Bau und Stator-Guss	23
3.4.3	Gleichrichter und Anschlüsse	24
4	Messresultate	26
5	Material und Kosten	28
6	Schlussbemerkungen und Danksagung	30
7	Anhang	32
7.1	Arbeitsbericht	33
7.1.1	Kalenderwoche 32	33
7.1.2	Kalenderwoche 33	38
7.1.3	Kalenderwoche 34	40
7.1.4	Kalenderwoche 35	43
7.1.5	Kalenderwoche 36	45
7.1.6	Kalenderwoche 37	46
7.1.7	Kalenderwoche 38	48
7.2	Glossar	50
7.3	Quellenverzeichnis	50

ABSTRACT

Im Rahmen dieser Maturarbeit wurde ein Alternator (Drehstromgenerator) konstruiert und gebaut. Als Grundlage für den Alternator ist ein umgebautes Fahrrad verwendet worden. Das Endprodukt kann sich sehen lassen, es generiert gegen 400 Watt Leistung.

Der Hauptteil dieser Arbeit besteht aus einer Abhandlung der beiden wichtigsten Phänomene, welche die Stromerzeugung mit Magneten und Spulen ermöglichen. Das Kapitel Konstruktion ist in die jeweiligen Baugruppen Rotor, Stator und Befestigungen gegliedert und beschreibt das umgesetzte Produkt.

Angaben zur Leistungsfähigkeit können dem Kapitel Messresultate entnommen werden.

Im Anhang befindet sich ein detaillierter Arbeitsbericht, der Aufschluss darüber gibt, wie bei der Konstruktion vorgegangen wurde, welche Probleme aufgetreten sind und welche Techniken und Hilfsmittel für die Fertigung angewandt wurden.

Kapitel 2

TECHNISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Phänomene beschrieben, anhand deren mit Spulen und Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor) Strom erzeugt werden kann.

Kapitel 2.1

PERMANENTMAGNETE

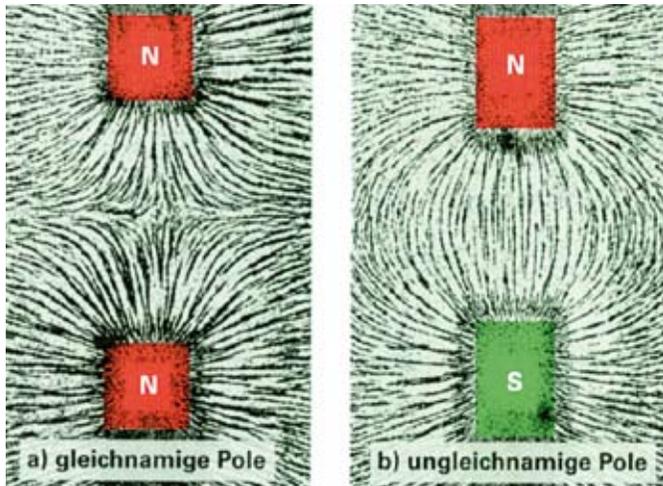


Abb. 1: anziehende und abstossende Pole

Permanentmagnete sind Stoffe, die beständige magnetische Kräfte zeigen. Eine Entmagnetisierung eines Permanentmagneten ist durch Hitze (über 80 °C), starke mechanische Erschütterung oder starke äussere Magnetfelder möglich.

Ein Magnet besitzt jeweils zwei Pole. Entsprechend der Anzeigerichtung der Magnetnadel eines Kompasses wurde der Pol, der in die geographische Nord-Richtung zeigt, Nordpol (N), der anderen Südpol (S) benannt. Dabei ziehen sich Nord- und Südpol jeweils an, bzw. N-N, S-S stossen sich ab.

Der Raum im und um einen Magneten ist durch einen Energiezustand gekennzeichnet, der magnetisches Feld genannt wird. Als Darstellungshilfe werden für das magnetische Feld Linien benutzt (magnetische Feldlinien). Sind in schematischen Darstellungen die Feldlinien nahe beieinander, dann bezeichnet dies ein starkes Feld, liegen sie weit auseinander ein schwaches.

Die Feldlinien verlaufen innerhalb des Magneten immer vom Süd- zum Nordpol und ausserhalb vom Nord- zum Südpol. Dabei sind die Feldlinien geschlossen, es gibt

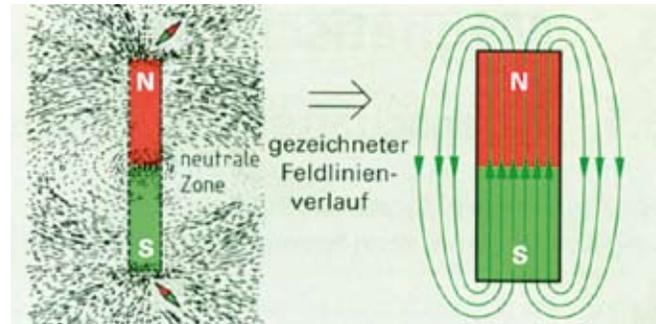


Abb. 2: Feldlinienverlauf zwischen Magnetpolen

kein Anfang und kein Ende, sondern nur einen Ein- und einen Austrittspunkt aus dem Magneten. ^{1, 2}

¹ Vgl. *Supermagnete.ch, Permanentmagnet*, URL: <http://www.supermagnete.ch/magnetismus/permanentmagnet> Stand: 05.11.2010

² Vgl. *Tkocz, Klaus et al., Elektrotechnik Grundbildung, 7. überarbeitete Auflage, Haan-Gruiten, Verlag Europa-Lehrmittel, 2009, S. 75ff*

Kapitel 2.2 SPANNUNGSERZEUGUNG DURCH INDUKTION

Wenn ein Leiter (z.B. ein Kupferdraht) durch ein Magnetfeld bewegt wird, dann erzeugt dies eine Spannung an den Enden des Leiters, was als (elektromagnetische) Induktion bezeichnet wird. Der hier beschriebene Fall soll exemplarisch zeigen, wie dies bei einem Generator (der Einfachheit halber nur mit einer Spule und einem Magnetfeld) funktioniert.

Der Aufbau (Bewegung des Leiters bzw. des Magneten) ist analog zum gebauten Axial Flux Alternator (siehe Konstruktionskapitel). Der Magnet befindet sich auf der Rotorscheibe und bewegt sich in gedachter Fahrtrichtung der Spule entgegen (siehe Pfeil 1. Abb. 3). Betrachtet man das Fahrrad von der linken Seite, dann bewegt sich der Magnet im Gegenuhrzeigersinn. Daraus resultiert eine relative Bewegungsrichtung des Leiters (d.h. der Spule bezüglich des Magnetfeldes) im Uhrzeigersinn (siehe Pfeil 2. Abb.3), er passiert den Magneten von links her.



Abb. 3: relative Bewegungsrichtung des Leiters

Zum Verständnis für die folgenden Grafiken: Wird ein Kreuz (\otimes) gezeichnet, dann bedeutet dies, dass man in Flussrichtung der Magnetfelder (Nordpol zu Südpol) oder in die technische Stromrichtung blickt (Minus- zu Pluspol). Ein Punkt (\odot) bedeutet das Gegenteil.

Der schwarz gezeichnete Magnet (Abb. 3 mit dem roten \otimes) liegt mit seiner Nordpolseite der Spule zugewandt, der magnetische Feldlinienverlauf des Magneten geht also durch die Spule.

Mithilfe der Lorenzkraft (\vec{F}) kann erklärt werden, was innerhalb der Spule passiert, wenn sie sich durch das Magnetfeld bewegt. Da die Lorenzkraft eine Kraft ist, die auf bewegte Ladungen wirkt, ist es relevant zu wissen, in welche Richtung sie zeigt, um eine Aussage darüber machen zu können, in welche Richtung z.B. die Elektronen verdrängt werden.

Die Formel dazu lautet: $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$, wobei:

q eine bewegte positive(!) Ladung ist ($q > 0$),

\vec{v} die Geschwindigkeit und Richtung der Ladungen (hier Elektronen) durch das Magnetfeld ist, bzw. des Leiters, welcher die Elektronen beinhaltet und

\vec{B} die magnetische Feldstärke sei.

\vec{F} bezeichnet die resultierende Kraft.

(Man beachte, dass \vec{v} und \vec{B} jeweils Vektoren sind, auf welche das Vektorprodukt angewandt wird.)

Da die Formel eine positive Ladung für q vorgibt, die Elektronen jedoch eine negative Ladung besitzen, muss die gerichtete Geschwindigkeit \vec{v} der Ladungen umgekehrt werden. Sie zeigt also genau in die andere Richtung (Gegenvektor) als sich die Elektronen bewegen.

Mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel kann die Kraft, welche auf die Elektronen wirkt und sie somit verdrängt, bestimmt werden. Der Daumen zeigt dabei in Flugrichtung (\vec{v}) einer gedachten positiven Ladung (in unserem Fall nehmen wir den Gegenvektor zur relativen Bewegungsrichtung des Leiters, da die Ladungen der Elektronen negativ sind), also nach links, der Zeigefinger in Richtung

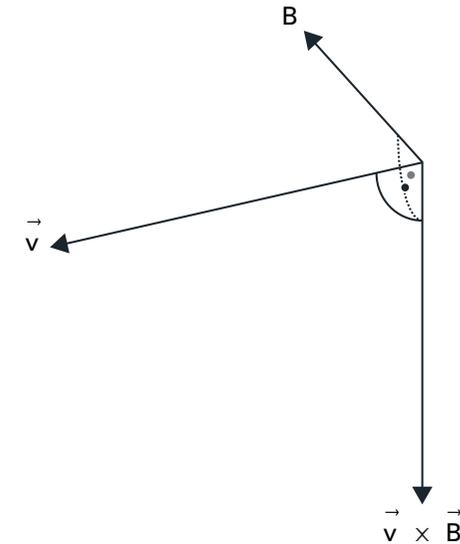


Abb. 4: Vektorprodukt, „Rechte-Hand-Regel“

des Magnetfeldes (\vec{B}). Wird nun der Mittelfinger rechtwinklig abgespreizt, so zeigt er nach unten in Richtung der Lorenzkraft, ergo werden die Elektronen nach unten abgelenkt.

Da wir nun wissen, in welche Richtung die Elektronen verdrängt werden, betrachten wir welche Auswirkungen dies auf den Spannungsaufbau in der Spule hat. Wir gehen wieder vom selben Fall aus, der oben beschrieben ist. Einfachheitshalber ist in den folgenden Abbildungen jeweils nur eine Wicklung der betrachteten Spule gezeichnet. Die Wickelrichtung der Spule im Uhrzeigersinn entspricht dabei dem gebauten Stator, dort sind die Spulen ebenfalls im Uhrzeigersinn gewickelt.

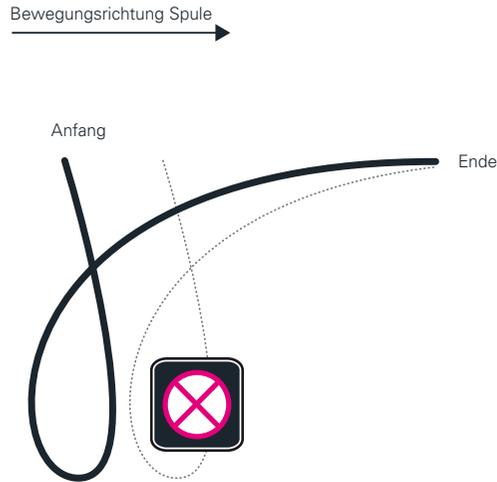


Abb. 5: Bewegungsrichtung Spule

Die Abbildung 5 zeigt eine Spule, die sich einem Magneten nähert. Anfang und Ende bezieht sich jeweils auf die Anschlüsse der Spule. In den folgenden Grafiken ist nur noch das resultierende Magnetfeld eingezeichnet (siehe \otimes oder \odot).

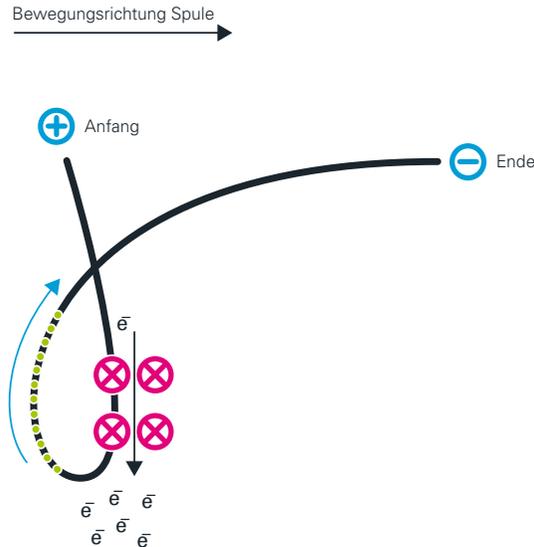


Abb. 6: „+V“

Durch das Bestimmen der Richtung der Lorentzkraft wissen wir, wohin die Elektronen gedrängt werden. Der rechte Teil der Spule (siehe Abb. 6) ist bereits im Einflussbereich des Magneten, dadurch werden die Elektronen im Leiter verdrängt. In der Grafik wird dies durch ein Elektronenüberschuss symbolisiert (unten). Da die linke Seite noch nicht im Einflussbereich des Magnetfeldes liegt, wirken dort keine Kräfte. Symbolisiert ist dies durch die grünen Punkte. (Dies ist eine Vereinfachung. In der Realität wäre dort natürlich auch ein schwaches magnetisches Feld auszumachen, siehe Permanentmagnete und Feldlinien.) Durch diese asymmetrische Kräfteausübung werden die Elektronen tendenziell in der Richtung des blauen Pfeiles wandern, da im Uhrzeigersinn eine Kraft ausgeübt wird, welche die Elektronen in Bewegung setzt, im Gegenuhrzeigersinn jedoch keine Kraft (in der Realität eine schwächere) dagegenhält. Dadurch entsteht ein Elektronenüberschuss am Ende der Spule, welche zum Minus- und der Anfang folglich zum Pluspol wird. Zwischen den Enden der Spule ist Spannung induziert worden (+V).

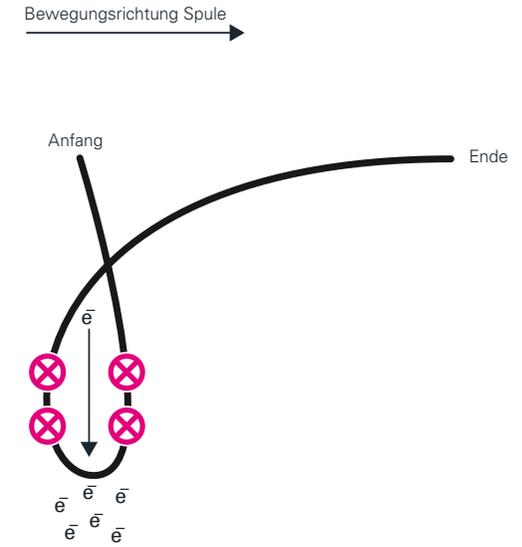


Abb. 7: „0 V“

Die Abbildung 7 soll zeigen, was passiert wenn das Magnetfeld auf die ganze Spule dieselbe Kraft ausübt. Sowohl die rechte, wie auch die linke Seite der Wicklung sind im Einflussbereich des Magnetfeldes, wobei hier angenommen wird, dass auf beiden Seiten eine gleich grosse Kraft wirkt. Der Magnet befindet sich dazu genau über der Mitte der Spule. Die Elektronen stauen sich im unteren Bereich der Wicklung und „bleiben dort“. Es gibt keine Tendenz wohin die Elektronen wandern. Dadurch wird keine Spannung induziert (0 V). Zwischen dem Anfang und dem Ende der Spule gibt es kein Potenzialunterschied.

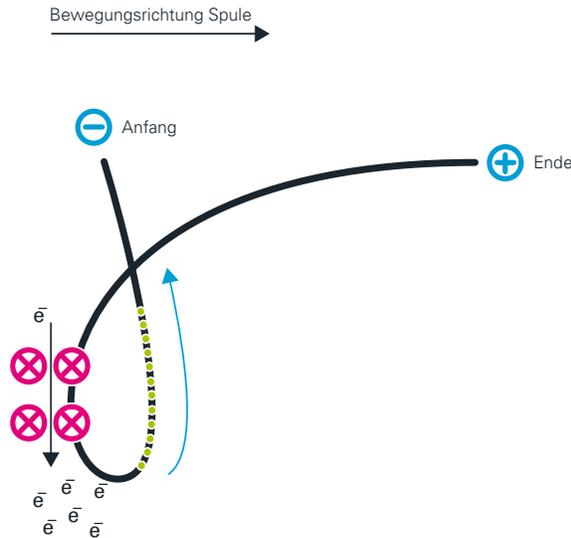


Abb. 8: „-V“

Bewegt sich die Wicklung noch weiter nach rechts, ist nur noch die linke Seite der Wicklung im Einflussbereich des Magnetfeldes (wiederum eine Vereinfachung). Analog zur ersten Magnetstellung werden die Elektronen nach unten verdrängt. Dieses Mal tendiert der Elektronenfluss jedoch Richtung Anfang der Spule, da auf der rechten Seite keine Kraftausübung stattfindet. Dies führt dazu, dass der Anfang der Wicklung zum Minus- und das Ende zum Pluspol der Spannungsquelle werden (-V).

Somit wird klar, dass die Spule eine Wechselspannungsquelle ist. Da eine Spule aus mehreren Wicklungen besteht, verstärkt sich die Induktion. Nochmals verstärkt wird sie, wenn mehrere Spulen seriell hintereinander geschaltet sind. Dieses Prinzip nutze ich beim Bau meines Alternators (zwölf Spulen). Da ich jedoch 16 Magnete pro Rotorscheibe einsetze, soll hier noch gezeigt werden, was passiert wenn zwei Magnete über derselben Spule liegen.

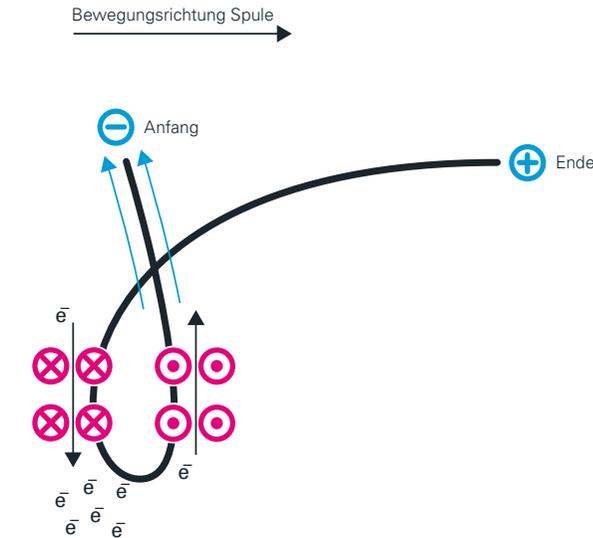


Abb.9: zwei Magnete über derselben Spule

Wiederum ist eine Wicklung einer Spule zu sehen (Abb.9). Den linken Magneten, welcher mit dem Nordpol der Wicklung zugewandt ist, kennen wir bereits und wissen daher, in welche Richtung die Elektronen abgelenkt werden (nach unten). Der rechte Magnet ist mit dem Südpol der Wicklung zugewandt, die Magnetfelder gehen daher von der Wicklung Richtung Magnet (dargestellt durch \odot). Anhand der Rechten-Hand-Regel können wiederum die Lorentzkraft und dadurch die Ablenkung der Elektronen bestimmt werden. Sie weist in diesem Fall nach oben.

Liegen zwei Magnete mit unterschiedlicher Ausrichtung (Nord- und Südpol) über einer Wicklung, so wird die Ablenkung der Elektronen in der gesamten Spule verstärkt, da sich die Kräfte addieren (symbolisiert durch die beiden blauen Pfeile).

Wird ein Alternator mit Muskelkraft angetrieben, dann bewegt sich ein Leiter durch ein Magnetfeld bzw. das Magnetfeld bewegt sich zum Leiter hin. Solange keine Verbraucher an die Spannungsquelle angeschlossen sind, spürt man praktisch keinen mechanischen Wider-

stand.

Dies ändert sich sobald z.B. eine Glühbirne angeschlossen wird. Je nach Leistungsaufnahme (Verbrauch) der angeschlossenen Glühbirne steigt auch der Widerstand, der gespürt wird. Mit anderen Worten: Je grösser die Leistungsaufnahme des Verbrauchers, desto mehr Bewegungsenergie muss eingesetzt werden um den Alternator in Betrieb zu halten. Dies ist so, da ein stromdurchflossener Leiter selber auch immer ein Magnetfeld aufbaut und dieses ist immer so ausgerichtet, dass es dem Magnetfeld der Permanentmagnete entgegenwirkt. Je grösser der Stromfluss ist, desto stärker wird dieses Feld. Der mechanische Widerstand der gespürt wird, kommt daher, dass zwei sich abstoßende Magnetfelder gegeneinander verschoben werden und dies benötigt Kraft. Die folgende Grafik soll dies illustrieren.

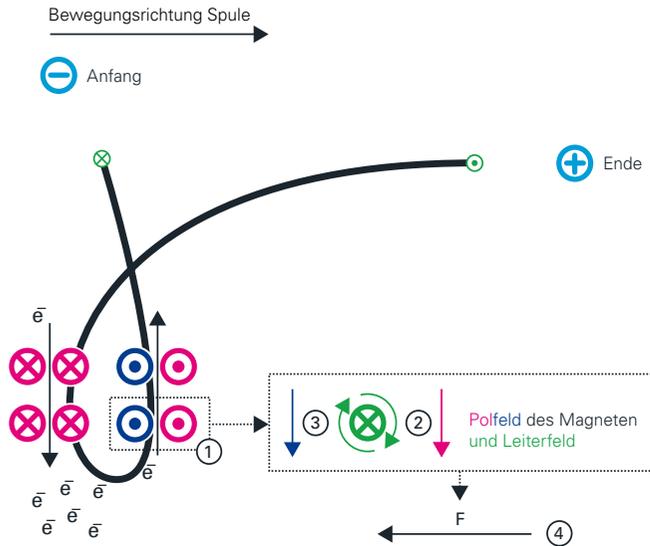


Abb. 10: Polfeld des Magneten und Leiterfeld

Die technische Stromrichtung (minus zu plus) ist grün dargestellt. Das Kreuz (⊗) am Anfang der Wicklung bedeutet, dass der technische Strom dort eintritt, und beim Ende (⊙) austritt.

Anhand der Schraubenregel kann die Richtung des Magnetfeldes bestimmt werden, welches um einen stromdurchflossenen Leiter aufgebaut wird. Blickt man in Richtung des technischen Stromes dem Leiter entlang, so baut sich ein Feld im Uhrzeigersinn um den Leiter auf (siehe grüne Darstellung). Werden nun die Magnetfelder beim rechten Magneten analysiert (siehe 1, Abb. 10), dann merkt man, dass auf der rechten Seite des Drahtes (siehe 2) die Felder in dieselbe Richtung zeigen, auf der linken Seite (siehe 3) hingegen gegeneinander.

Dadurch wird eine Kraft erzeugt (siehe 4), die der Bewegungsrichtung der Spule entgegenwirkt. Diese Kraft gilt es zu überwinden, sie ist für den spürbaren mechanischen Widerstand verantwortlich. (Vgl. Lenzsche Regel: Der durch eine Induktionsspannung hervorgerufene Strom ist stets so gerichtet, dass er der Ursache der Induktion entgegenwirkt.)³



Kapitel 3

KONSTRUKTION

Als Basis für die Konstruktion des Alternators wird ein handelsübliches 24-Gang-Fahrrad verwendet. Damit Stator und Doppelrotor am Fahrrad angebracht werden können, wird es aufgebockt und das Hinterrad von Speichen und Felge befreit, mit anderen Worten auf die Nabe reduziert.

Kapitel 3.1 AXIAL FLUX ALTERNATOR

Die gewählte Bauart des Alternators besteht aus einem Stator mit zwölf Spulen und zwei Rotoren (=Doppelrotor) mit jeweils 16 Magneten. Die Magnete sind paarweise an beiden Rotoren und mit abwechselnder Ausrichtung (alternierend) N-S-N-S usw. angeordnet. Der Doppelrotor verstärkt dabei das resultierende Magnetfeld, indem sich jeweils ein Nord- und ein Südpol gegenüberstehen. Mit dem stärkeren Magnetfeld wird sogleich eine grössere Spannung induziert.

Der Doppelrotor bewegt sich parallel zum Stator, welcher fest am Fahrradrahmen angebracht ist. Die Spulen des Stators sind symmetrisch um die Rotationsachse der Rotoren angeordnet. Der Abstand von der Nabe (der Radius) ist dabei derselbe wie derjenige der Magneten der Rotoren und damit des Magnetfeldes. Dadurch wird eine ständige und gleichmässige Induktion ermöglicht.

Die zwölf Spulen des Stators sind in drei Phasen angeordnet, wobei jeweils die identisch gewickelten Spulen 1,4,7,10; 2,5,8,11 und 3,6,9,12 seriell miteinander verbunden sind.

Aufgrund der alternierenden Anordnung der Magneten kehrt sich die Orientierung des Magnetfeldes, welches auf eine Spule einwirkt ständig, dadurch liefert jede Phase ein um 120° verschobenes sinusförmiges Ausgangssignal. Diese Art von Generator wird Drehstromgenerator oder Alternator genannt.

Dank dieser Anordnung liefert der Alternator bereits bei sehr tiefen Umdrehungszahlen Wechselstrom. Bei 1 Umdrehung des Rotors pro Sekunde liefert der Alternator zum Beispiel bereits 8 Hz pro Phase. Beim gewählten Fahrradmodell beträgt die Übersetzung im tiefsten Gang (der strengste) 4:1. Wird das Pedal mit 1 Umdrehung pro Sekunde angetrieben, rotiert der Rotor bereits 4 Mal pro Sekunde und erreicht somit 32 Hz pro Phase.

Mithilfe eines Brückengleichrichters (B6) kann der gewonnene Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt werden.

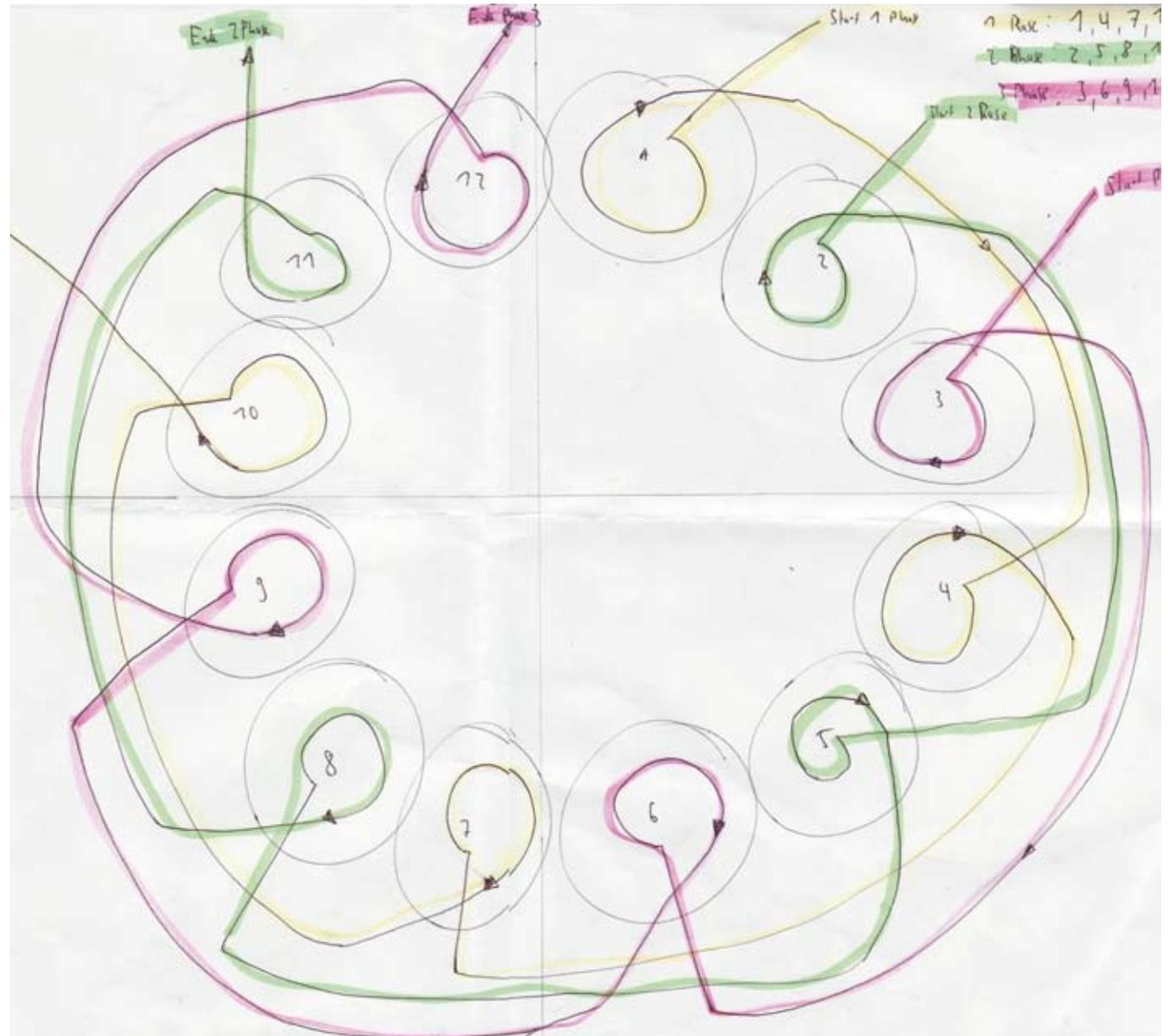


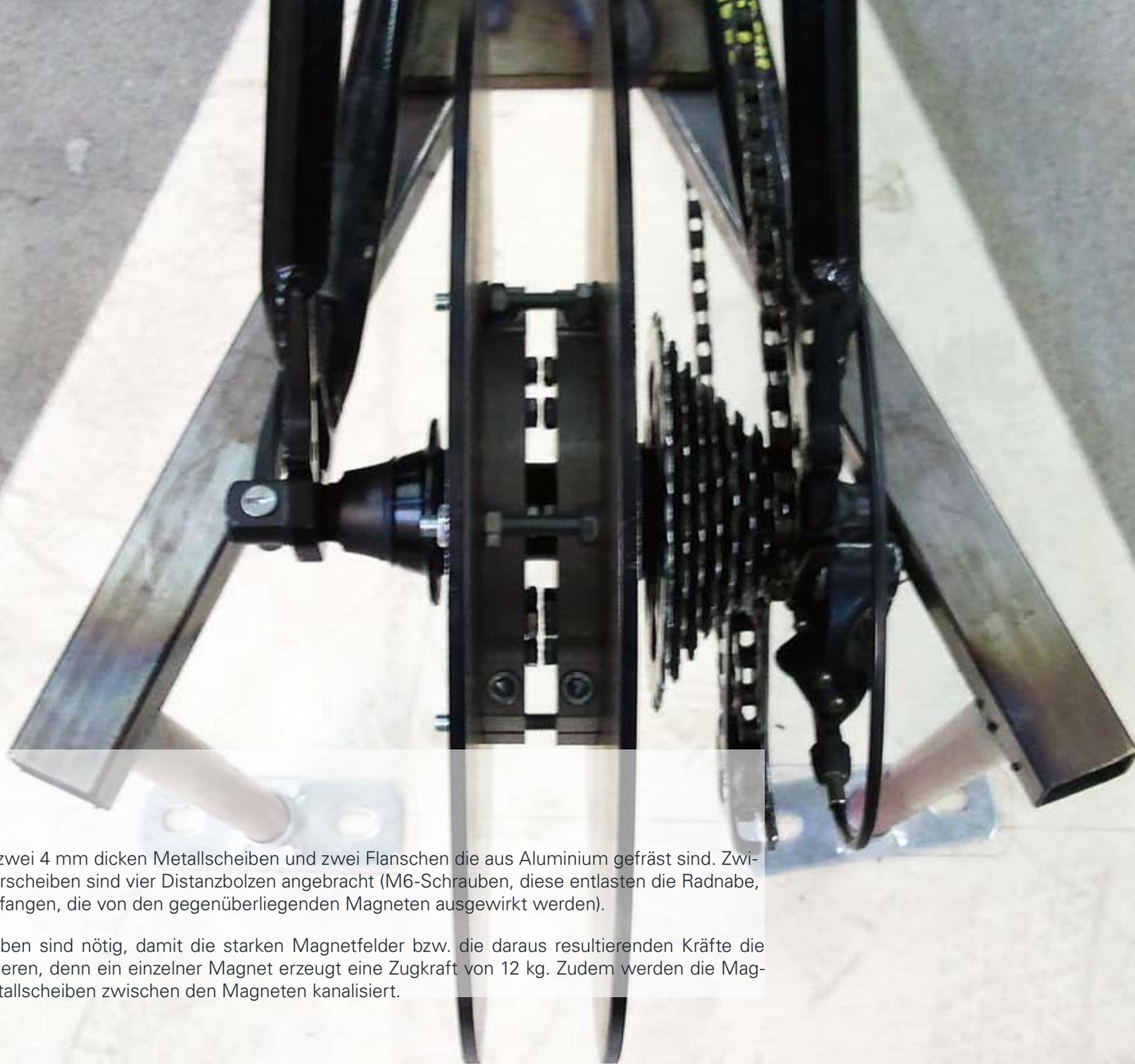
Abb. 11: Spulenverkabelung

Kapitel 3.2

ROTOR

Der Rotor besteht aus zwei 4 mm dicken Metallscheiben und zwei Flanschen die aus Aluminium gefräst sind. Zwischen den beiden Rotorscheiben sind vier Distanzbolzen angebracht (M6-Schrauben, diese entlasten die Radnabe, indem sie die Kräfte abfangen, die von den gegenüberliegenden Magneten ausgewirkt werden).

Die dicken Metallscheiben sind nötig, damit die starken Magnetfelder bzw. die daraus resultierenden Kräfte die Scheiben nicht deformieren, denn ein einzelner Magnet erzeugt eine Zugkraft von 12 kg. Zudem werden die Magnetfelder durch die Metallscheiben zwischen den Magneten kanalisiert.



Kapitel 3.2.1 ROTORSCHIEBEN

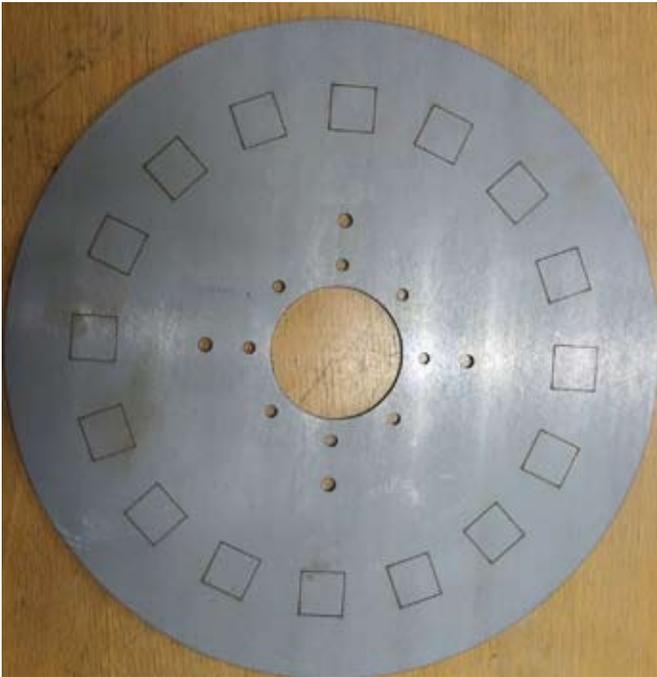


Abb. 12: Rotorscheibe

Die beiden Rotorscheiben sind identisch konstruiert. Der Aussendurchmesser beträgt 300 mm, der Innendurchmesser 60 mm und die Materialdicke ist 4 mm. Das Loch in der Mitte ist nötig, damit die Rotorscheiben über die Radnabe gestreift werden können.

Wie bereits angesprochen, sind die Magnete auf den Rotorscheiben abwechselungsweise mit dem Nord- bzw. Südpol nach oben angeordnet. Die gegenüberliegenden Rotorscheiben werden so eingebaut, dass sich wiederum ein Nord- und ein Südpol gegenüberstehen. Das Resultierende Magnetfeld sieht dann wie auf Abbildung 13 aus.

Damit die Magnete durch die Fliehkräfte bei der Drehung

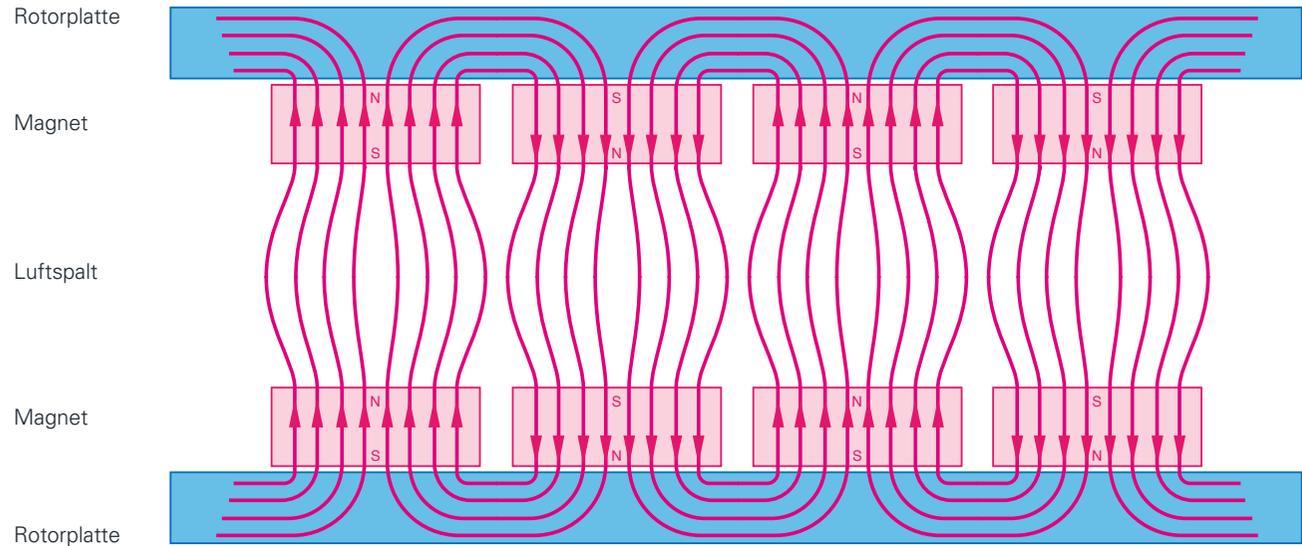


Abb. 13: magnetischer Feldlinienverlauf zwischen den Rotorscheiben

nicht nach aussen rutschen, sind sie mit Zweikomponenten-Kleber auf den Metallscheiben fixiert.

Durch die acht M5-Löcher im Zentrum, wird der Rotor mit dem Flansch verbunden. An den vier M6-Löchern werden die Distanzbolzen angebracht. Neben Stabilitätsgründen sind diese Distanzbolzen auch aus ganz praktischen Gründen vorhanden. Nähern sich die beiden Rotorscheiben auf wenige Zentimeter resultieren sehr starke magnetische Anziehungskräfte (32 Magnete à 12 kg Zugkraft), die es ohne die Distanzbolzen unmöglich machen würden, den Rotor am Flansch und schliesslich an der Radnabe zu befestigen.

Die 16 Magnete sind in einem Winkel von je $22,5^\circ$ um den Mittelpunkt angeordnet (siehe dazu auch Kapitel 3.4, Magnet- Spulenstellung). Auf einem Radius von 11 cm sind die Positionen der Magnete eingraviert (20 x 20 mm), was das Anbringen der Magnete vereinfacht. Ausgeschnitten und graviert wird dieses Teil mit einer Laserschnittmaschine. Somit kann garantiert werden, dass die Scheiben auch wirklich rund werden.

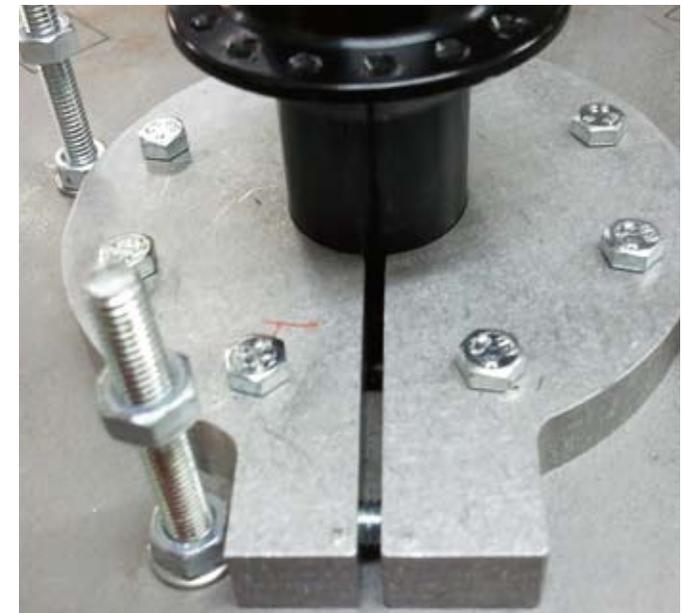


Abb. 14: Rotorscheibe, Flansch und Distanzbolzen

Kapitel 3.2.2 FLANSCHEN (BEFESTIGUNG)

Ein Flansch besteht aus einem Stück Aluminium und hat in der Mitte ein Bohrloch, das auf den hundertstel Millimeter genau auf die Radnabe passt. Mit einer 3 mm



Abb. 15: Vorderseite des Flansches mit Fase und acht M5-Schrauben

breiten Fräse wird der Flansch in zwei Teile getrennt. Auf jeder Seite ist jeweils eine Senkkopfschraube angebracht. Durch diese wird der Flansch zusammengedrückt und somit die Nabe fest eingeklemmt. Wird die Radnabe über die Ritzel angetrieben, bewegen sich die Flanschen und somit auch die beiden Rotorscheiben mit ihr.

Die beiden Flansche sind so konstruiert, dass sie auf der Nabe verschoben werden können. Da die Nabe auf der einen Seite dicker wird, ist das Loch im Flansch auf einer Seite abgeschrägt (in der Fachsprache Fase genannt), damit der Flansch weiter an den Rand verschoben werden kann. Dadurch kann zwischen den Rotorscheiben (mit angebrachten Magneten) ein Abstand von 0 bis 20 mm eingestellt werden.

Dank dieser Konstruktionsweise kann der Abstand zwischen gegenüberliegenden Magneten optimal eingestellt werden und es ist somit irrelevant, wie dick der produzierte Stator schlussendlich wird.

Zudem wird erst bei der Fertigstellung des Alternators klar, wie sauber der Rotor rotiert und ob der Stator fix an Ort und Stelle bleibt oder anfängt zu schwingen und

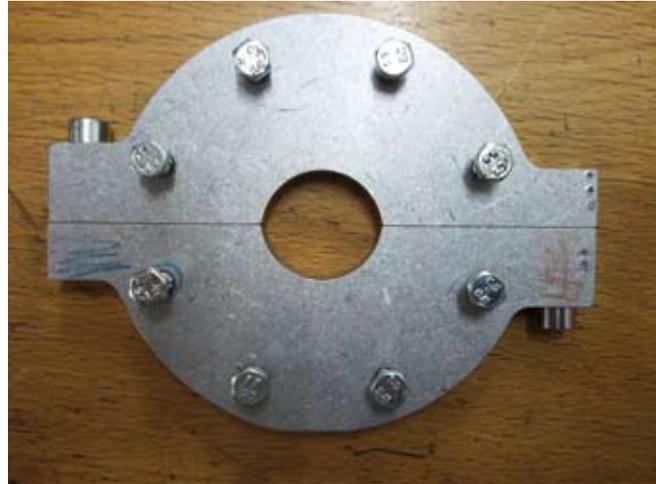


Abb. 16: Rückseite des Flansches mit seitlich angebrachten Senkkopfschrauben

somit ein breiterer Luftspalt nötig wird. Durch Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Abstandes der beiden Flansche können fertigungstechnische Ungenauigkeiten abgefangen werden.

Kapitel 3.2.3

ZUSAMMENBAU DES ROTORS

Aufgrund des sehr begrenzten Platzes ist der Zusammenbau des Rotors mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Ich habe mich für folgendes Vorgehen entschieden:

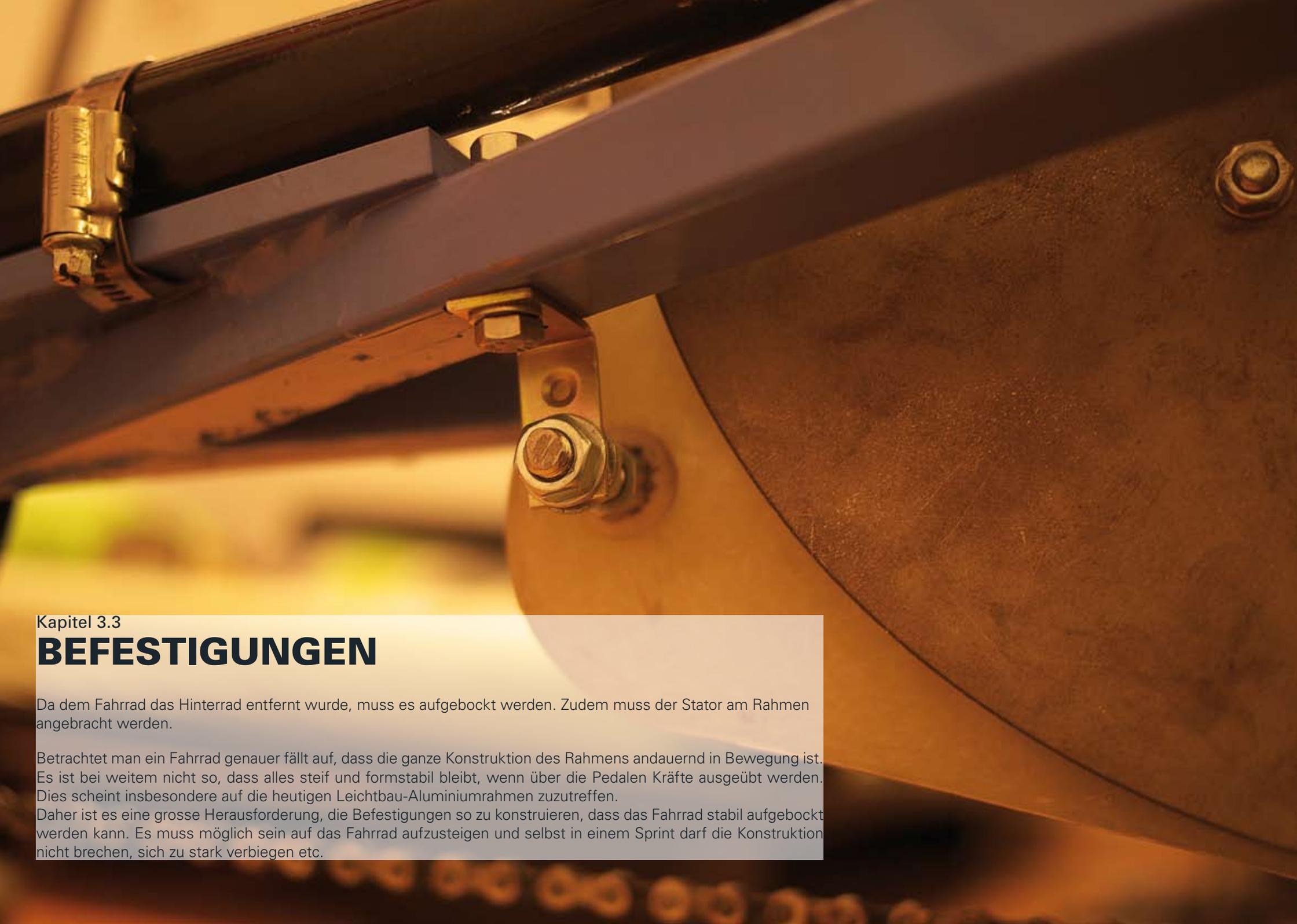
Zuerst wird nur eine Rotorscheibe über die Radnabe eingefahren und mit den acht M5-Schrauben ein Flansch angebracht. Diese Schrauben dürfen aber nur von Hand bzw. nur locker angezogen werden, denn zuerst müssen die beiden Senkkopfschrauben der Flansche festgezogen werden. Dadurch wird erreicht, dass der Flansch auf die ganze Nabe denselben Anpressdruck ausübt. Anschliessend werden die acht Schrauben bzw. die Muttern festgezogen. (Würden zuerst die acht Schrauben zwischen dem Rotor und dem Flansch angezogen, dann bewirkte das Zusammenziehen des Flansches durch die Senkkopfschrauben im schlimmsten Fall, dass sich der Flansch lediglich auf der Seite verbiegen würde und kein Anpressdruck auf die Nabe ausgeübt würde.)

Ist die erste Rotorscheibe angebracht, können die Distanzbolzen, bzw. deren Muttern auf den gewünschten Abstand eingestellt werden, beispielsweise mit einer Schiebelehre. Wird nun die zweite Scheibe angebracht, dann kann sie von den Magneten nicht näher als auf den mit den Muttern eingestellten Abstand gezogen werden

Die zweite Rotorscheibe wird wie folgt eingebaut: Flansche an der Nabe anbringen (nicht festziehen), zweite Rotorscheibe einfädeln und wiederum die acht Schrauben von Hand anziehen, dadurch liegt der Flansch und die Rotorscheibe nebeneinander und im richtigen Abstand zur davor angebrachten Rotorscheibe. Dann wird der Flansch mit den Senkkopfschrauben fest angezogen. Anschliessend wird die zweite Rotorscheibe wieder entfernt und der Stator eingefädelt. Der zweite Rotor wird erneut eingefädelt und alle Muttern werden angebracht und festgezogen.

Nun ist alles richtig eingestellt und bereit für den Einbau

in den Fahrradrahmen. Dies geschieht wie bei einem normalen Fahrrad durch das Anziehen des Schnellspanners. Zudem wird der Stator an seinen drei Befestigungspunkten angebracht (siehe Kapitel Befestigungspunkte für den Stator).

A close-up photograph of a bicycle frame joint. A silver metal bracket is bolted to a dark frame tube. The background is a blurred, warm-toned surface, possibly a workshop floor or a wall.

Kapitel 3.3

BEFESTIGUNGEN

Da dem Fahrrad das Hinterrad entfernt wurde, muss es aufgebockt werden. Zudem muss der Stator am Rahmen angebracht werden.

Betrachtet man ein Fahrrad genauer fällt auf, dass die ganze Konstruktion des Rahmens andauernd in Bewegung ist. Es ist bei weitem nicht so, dass alles steif und formstabil bleibt, wenn über die Pedalen Kräfte ausgeübt werden. Dies scheint insbesondere auf die heutigen Leichtbau-Aluminiumrahmen zuzutreffen.

Daher ist es eine grosse Herausforderung, die Befestigungen so zu konstruieren, dass das Fahrrad stabil aufgebockt werden kann. Es muss möglich sein auf das Fahrrad aufzusteigen und selbst in einem Sprint darf die Konstruktion nicht brechen, sich zu stark verbiegen etc.

Kapitel 3.3.1

AUFBOCKEN DES FAHRRADS

Da es mir nicht möglich ist, etwas an den Aluminiumrahmen zu schweißen, bringe ich eine 8 mm dicke Stahlplatte mithilfe von fünf Briden am Rahmen an. An dieses Stahlstück werden die benötigten Beine angeschweisst.

Ein Standbein wird direkt an die Stahlplatte angeschweisst, dieses fängt primär die Stösse auf, die senkrecht zum Boden wirken. Zwei weitere Beine sorgen dafür, dass das Fahrrad nicht auf die Seite kippt. Diese werden an den Hilfsstreben befestigt.

Um die Stabilität zu erhöhen, werden die drei Beine auf einer massiven Holzplatte fixiert.



Abb. 17 : Stahlplatte mit 5 Briden

Kapitel 3.3.2

BEFESTIGUNGSPUNKTE FÜR DEN STATOR

Die Befestigungspunkte für den Stator sind so gewählt, dass sie sich synchron mit dem Rahmen mitbewegen. Dies ist wichtig, da der Rotor, der an der Radnabe angebracht ist, sich ebenfalls seitlich bewegt, wenn in die Pedale getreten wird. Im Extremfall sind dies gut 5 mm, um welche sich der Rotor gegenüber einem Fixpunkt verschiebt. Wenn man bedenkt, dass zwischen dem Stator und einer Rotorscheibe bzw. den Magneten nur ein Luftspalt von 3 mm besteht, dann muss der Stator ebenfalls diese seitlichen Bewegungen mitmachen. Ansonsten streifen die Magnete den Stator und der Luftspalt muss vergrößert werden, was zur Folge hat, dass der Alternator schneller betrieben werden muss, um dieselbe Leistung zu generieren.

Die drei Befestigungspunkte am Fahrrad sind jeweils um 120° verschoben und insofern identisch konstruiert, dass mit Hilfe von Gewindestangen und den beiden Muttern um den Stator, eine beliebige Position eingestellt werden kann. (Vgl. dazu Kapitelbilder: Einleitung und Befestigungen)

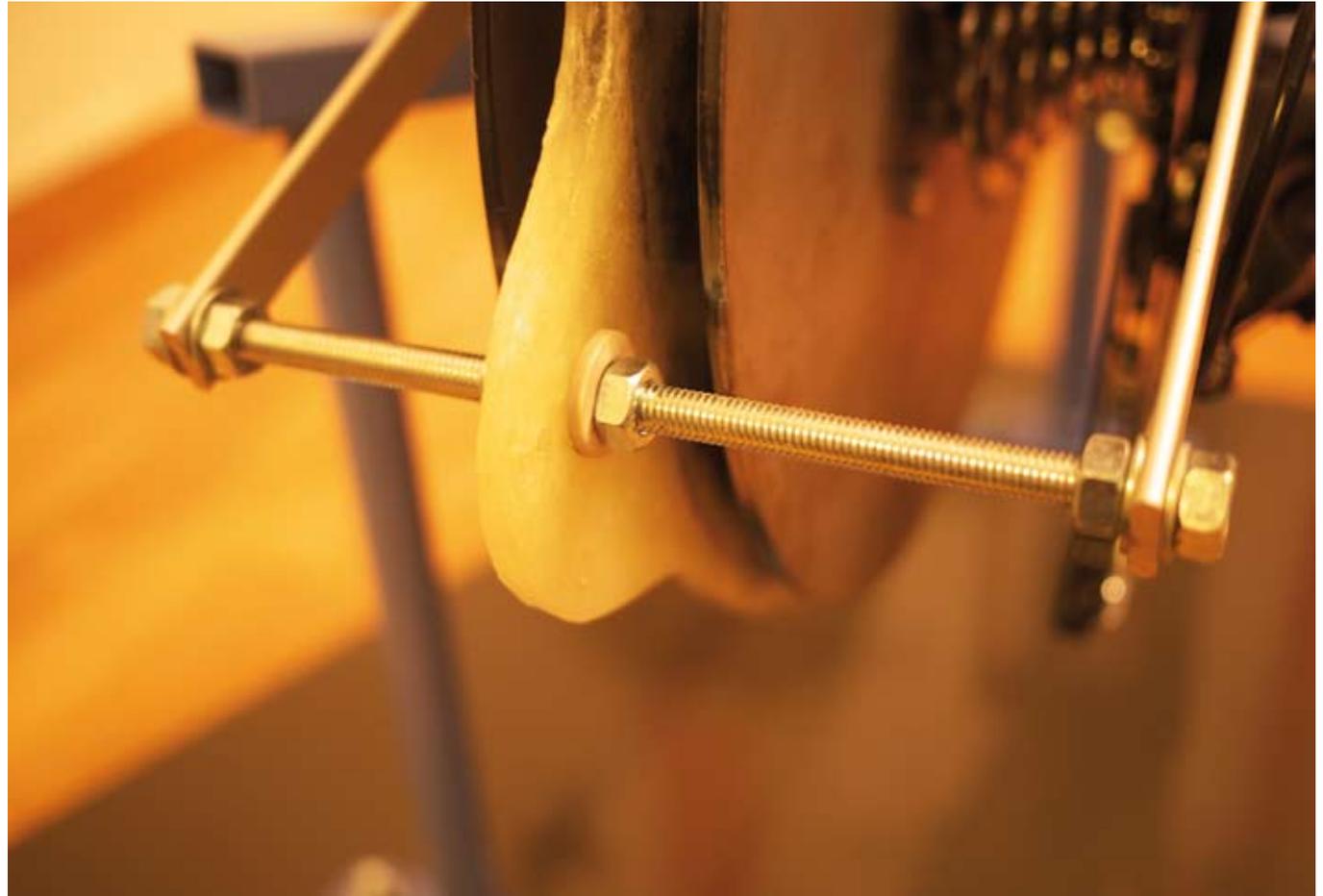


Abb. 18: hinterer Befestigungspunkt mit Gewindestange und Muttern

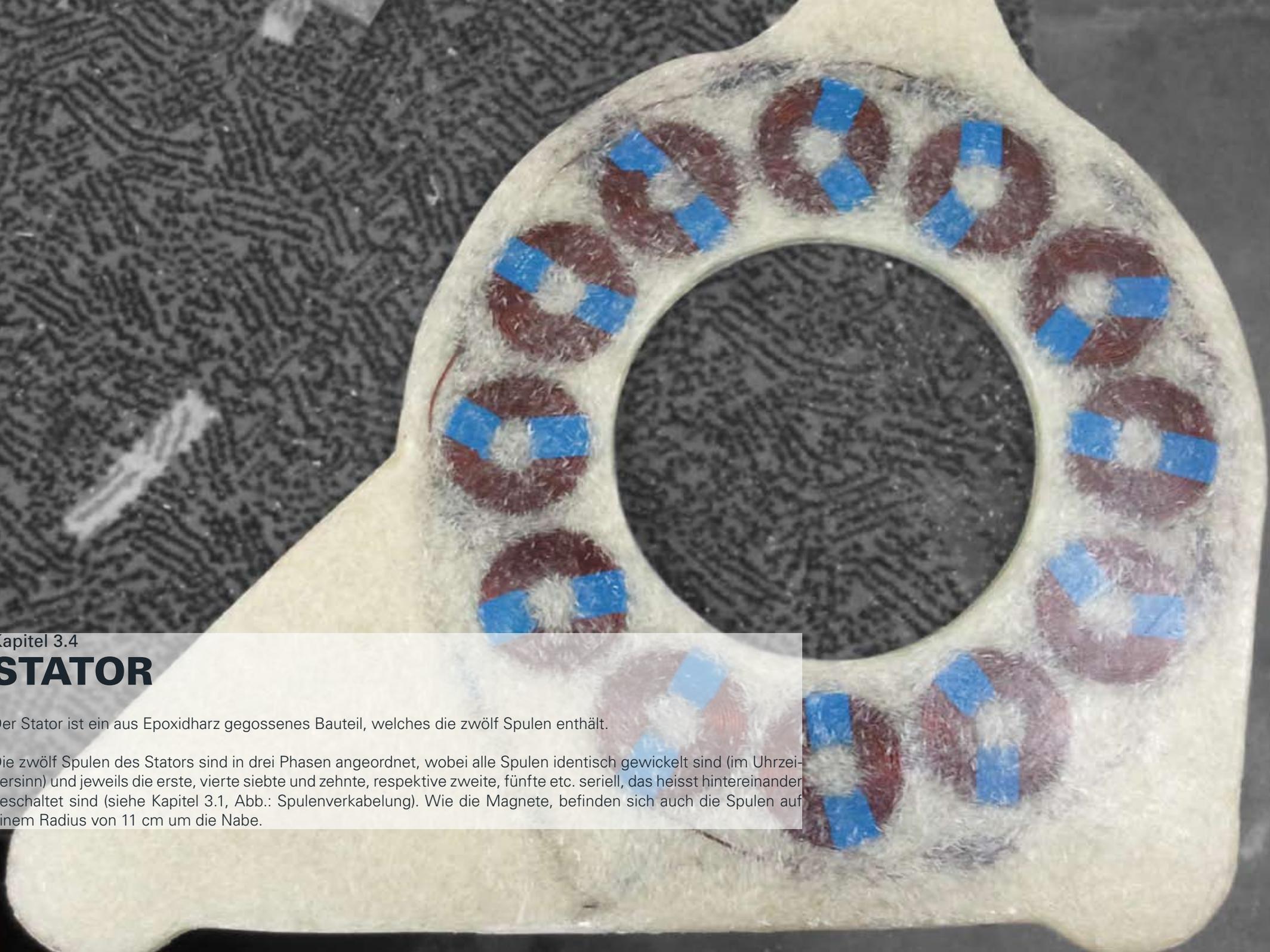


Kapitel 3.4

STATOR

Der Stator ist ein aus Epoxidharz gegossenes Bauteil, welches die zwölf Spulen enthält.

Die zwölf Spulen des Stators sind in drei Phasen angeordnet, wobei alle Spulen identisch gewickelt sind (im Uhrzeigersinn) und jeweils die erste, vierte, siebte und zehnte, respektive zweite, fünfte etc. seriell, das heißt hintereinander geschaltet sind (siehe Kapitel 3.1, Abb.: Spulenverkabelung). Wie die Magnete, befinden sich auch die Spulen auf einem Radius von 11 cm um die Nabe.



Betrachtet man die Rotorscheibe, so sind dort 16 Magnete mit einem Zwischenwinkel von jeweils $22,5^\circ$ angebracht. Der Stator weist zwölf Spulen auf die jeweils einen Abstand von 30° zueinander haben. Die benachbarten Spulen einer Phase (z.B. Spule 1 und 4, 4 und 7 etc.) liegen jeweils 90° auseinander. Die Magnete welche ebenfalls 90° auseinanderliegen sind gleich ausgerichtet. Somit ist die Magnetstellung (Ausrichtung des Magnetfeldes) einer Phase immer über all ihren Spulen gleich. Da alle Magnete identisch sind, wirkt auf jede Spule einer Phase die gleiche magnetische Kraft und somit wird in jeder Spule gleichviel Spannung induziert. Bei der gewählten Anordnung von 16:12 (Magnete zu Spulen) ist dies für jeden beliebigen Viertelkreis (also 90° -Abschnitt) mit einem Verhältnis von 4:3 und somit für alle drei Phasen jederzeit der Fall.

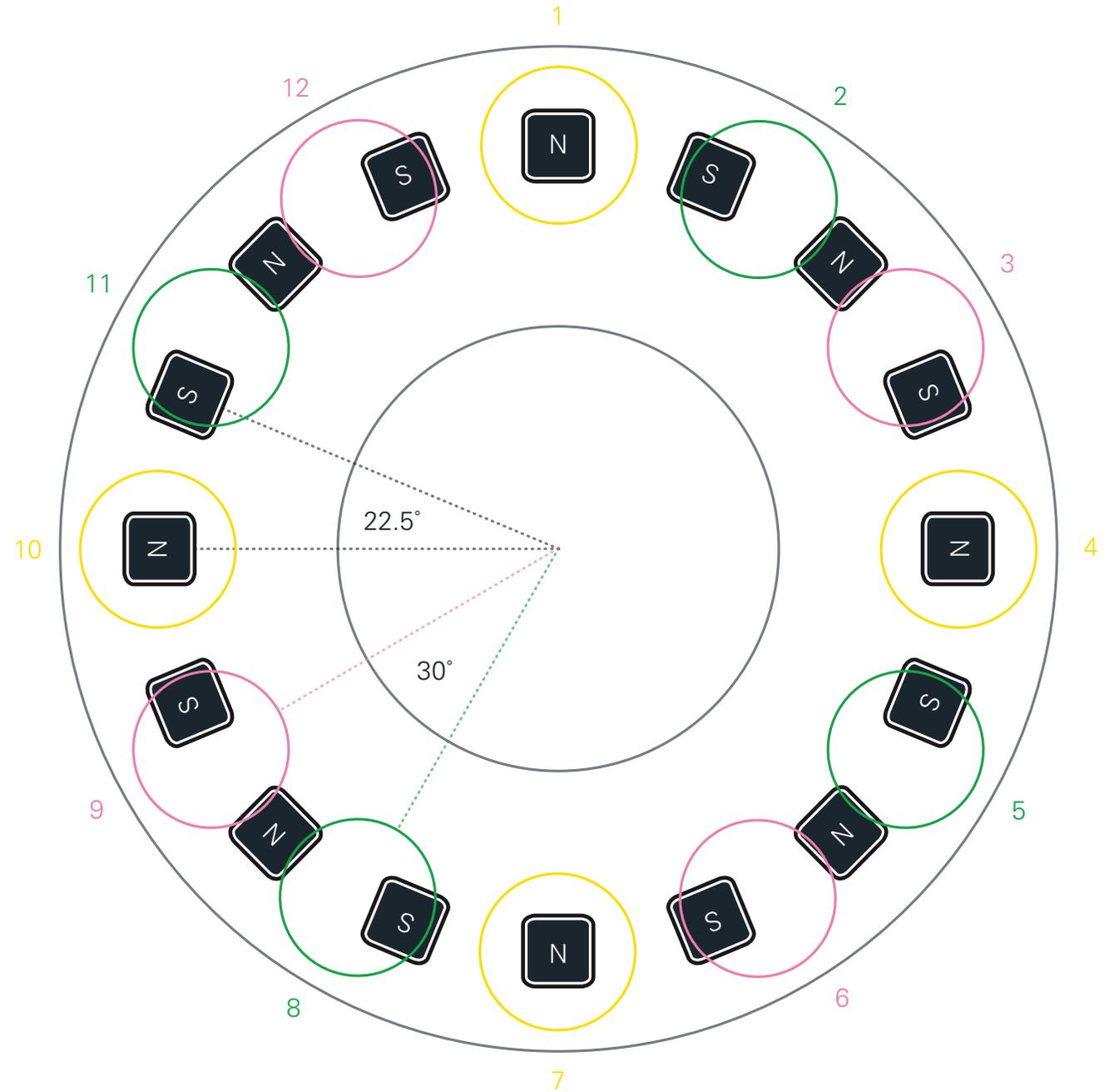


Abb. 19: Magnet- und Spulenstellung

Kapitel 3.4.1 SPULEN



Abb. 20: Spule aus Kupferlackdraht und Kabelbinder

Die Spulen sind aus Kupferlackdraht gewickelt. Die Lackierung isoliert dabei die einzelnen Leiter, so dass kein Kurzschluss resultiert.

Durch das vorgegebene Design des Rotors und des Stators mit seinen zwölf Spulen auf einem 11 cm Radius kann der maximale Durchmesser einer Spule berechnet werden. Dieser liegt etwas über 55 mm. Da der fertig gegossene Stator 9 mm dick ist, werden die Spulen 8 mm tief gewickelt.

Mit dem verwendeten Kupferlackdraht (1,2 mm Durchmesser) sind so 70 Wicklungen pro Spule möglich. Eine komplette Phase besteht demnach aus 280 Wicklungen (Wird ein dickerer Draht verwendet, dann kann dieser mehr Strom transportieren. Jedoch sind mit einem solchen Draht weniger Wicklungen möglich, da er mehr Platz einnimmt. Da die Wicklungen relevant sind für den Spannungsaufbau (mehr Wicklungen, längerer Leiter, mehr Induktion) ist dies ein Zielkonflikt.)

Gefertigt werden die Spulen mit einem selbstgebauten



Abb. 21: Spulenwickelapparat

Spulenwickelapparat. Die 8 mm Tiefe der Spule ergibt sich durch den Abstand der Plexiglasplatten. Die Kabelbinder stabilisieren die Spule, während man sie von der Wickelapparatur loslöst. Anschliessend können die Kabelbinder durch Klebeband ersetzt werden (das macht die Spule dünner).

FORM-BAU UND STATOR-GUSS

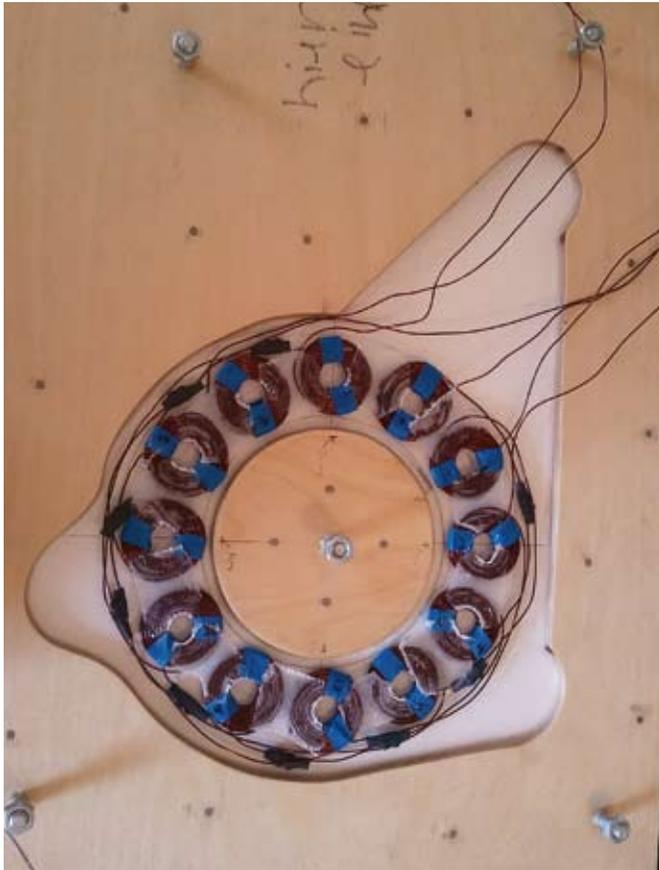


Abb. 22: Gussform und verbundene Spulen

Die Gussform für den Stator besteht aus drei Teilen. Je eine massive MDF-Platte dient als Boden und als Deckel der Form. Die dazwischenliegende Naturholzplatte gibt die Form und die Dicke (9 mm) des zu giessenden Teiles vor.

Die Form des Stators orientiert sich an den gegebenen Platzverhältnissen im und um den Rotor. Aufgrund



Abb. 23: in Epoxidharz gegossene Spulen

dessen, dass die Distanzbolzen des Rotors auf einem Radius von 6 cm angebracht sind, hat der Stator in der Mitte ein Loch, mit einem Durchmesser von 14 cm. Bei den Befestigungspunkten für den Stator gibt es jeweils Auswölbungen um das Material an dieser Stelle zu verstärken bzw. ein Brechen des Stators zu verhindern.

Damit die Spulen in der Form am richtigen Ort platziert

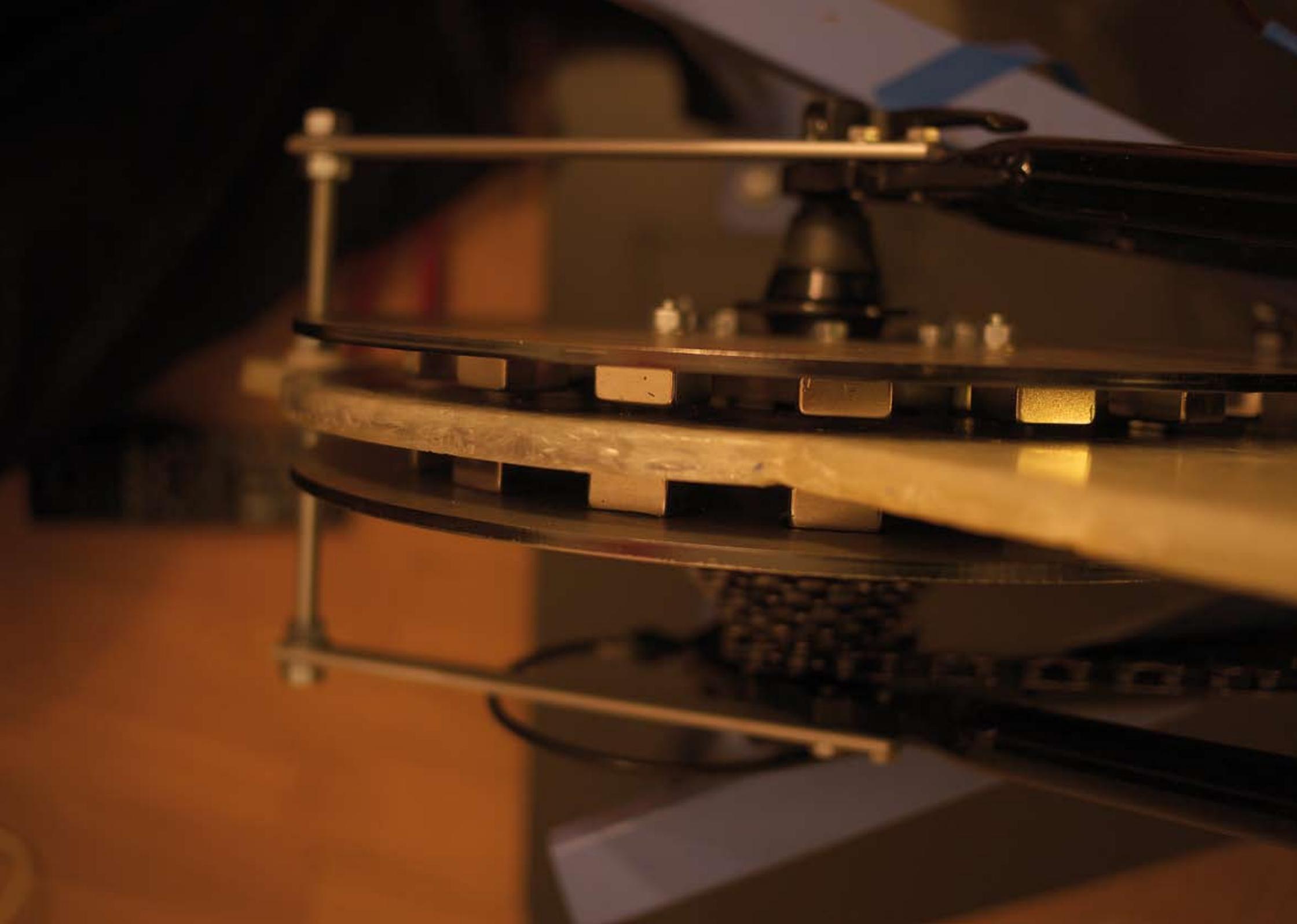
werden können, wurden sie im Vorhinein durch Glasfaserstücke und Sekundenkleber miteinander verbunden. Die zusammengeklebten Spulen werden in der Form ausgerichtet und mit Epoxidharz übergossen. Um die Stabilität des Stators zu erhöhen, sind dem Epoxidharz Glasfaserschnipsel zugemischt.

Kapitel 3.4.3

GLEICHRICHTER UND ANSCHLÜSSE

Die zwölf Spulen sind innerhalb des Stators seriell in drei Phasen angeordnet und verdrahtet. Dies ist fix und kann nicht geändert werden. Die sechs Drähte, die nach aussen führen, sind jeweils die Anfangs- bzw. Endpunkte der einzelnen Phasen (siehe dazu Spulenverkabelung S.11).

Mit Hilfe eines Gleichrichters kann der vom Alternator gelieferte Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt werden. Aktuell sind alle Endpunkte der drei Phasen miteinander verbunden (Sternverkabelung), die Anfangspunkte sind an den Brückengleichrichter (B6) angeschlossen, welcher die jeweils um 120° verschobenen Phasen gleichrichtet. Somit erhält man eine Gleichspannungsquelle bzw. Gleichstrom.



Kapitel 4

MESSRESULTATE

Um die Leistungsfähigkeit des Alternators zu testen, werden diverse Verbraucher angeschlossen; Im ersten Test eine 2 W und eine 5 W Lampe, welche bei einer kleinen Krafteinwirkung von Hand durchbrennen. In einem weiteren Test ist ein 60 W / 12 V Autoscheinwerferlampe angeschlossen. Auch diese brennt bei einem kräftigen Antritt durch.

Diese ersten Tests weisen darauf hin, dass der Alternator weit mehr Leistung erzeugen kann, als die ursprünglich angestrebten 30 Watt. Um die Grenzen des Alternators auszureizen, werden in mehreren Testserien zunehmend stärkere Verbraucher angeschlossen.

Kapitel 4.1 TEST MIT 150 WATT

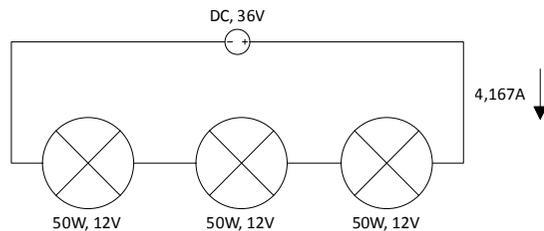


Abb. 24: drei seriell verbundene 50 W / 12 V Lampen

In dieser Testserie sind drei 50 Watt Halogenlampen bei einer Spannung von 12 Volt seriell hintereinander geschaltet. Daraus resultiert ein Gesamtwiderstand von 8.64 Ohm. Wird eine Spannung von 36 V erzeugt, ergibt dies ein Stromfluss von 4,167 A.

Um auf die nötigen 36 V zu kommen, muss der Alternator jedoch sehr schnell angetrieben werden, was auch möglich ist, da der mechanische Widerstand noch sehr gering ist.

Noch höhere Spannungen können aber nicht ohne weiteres erreicht werden, da für höhere Spannungen mehr Umdrehungen pro Minute nötig sind. Hier stossen die Übersetzung des Antriebes bzw. der Mensch als Antriebsquelle, für welchen hohe Kadenzen (z.B. 100 Umdrehungen der Pedale pro Minute) länger als ein paar Sekunden nicht möglich sind, an eine Grenze. Ein Spannungswandler wird nötig.

Kapitel 4.2 TEST MIT 180 WATT

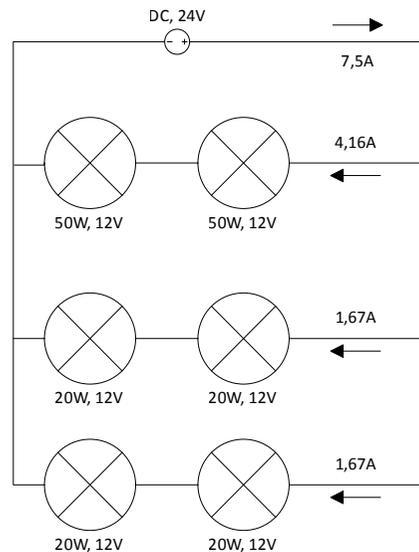


Abb. 25: seriell und parallel verbundene 50 W / 12 V und 20 W / 12 V Lampen

In diesem Test sind zwei 50 Watt und jeweils zwei 20 Watt Halogenlampen bei einer Spannung von 12 Volt seriell hintereinander und parallel zu den anderen beiden Paaren geschaltet. Daraus resultiert ein Gesamtwiderstand von 3,2 Ohm. Wird eine Spannung von 24 V erzeugt, ergibt dies ein Stromfluss von 7,5 A.

Dadurch, dass bei diesem Test nur 24 Volt erzeugt werden müssen (parallel angeschlossene Verbraucher), muss auch der Generator nicht so schnell angetrieben werden. Dies ist für den Menschen als Antriebsquelle angenehmer. Mit anderen Worten, es fühlt sich weniger anstrengend an die 180 W bei 24 V zu generieren, als die 150 W bei 36 V des ersten Tests. Dies trifft natürlich rein rechnerisch nicht zu, da hier 30 Watt mehr produziert werden.

Kapitel 4.3 TEST MIT 400 WATT

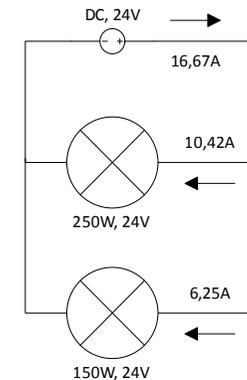


Abb. 26: parallel verbundene 150 W / 24 V und 250 W / 24 V Lampen

Hier ist eine 150 Watt und eine 250 Watt Halogenlampen bei einer Spannung von 24 Volt parallel geschaltet. Daraus resultiert ein Gesamtwiderstand von 5,504 Ohm. Wird eine Spannung von 24 V erzeugt, ergibt dies ein Stromfluss von 16,67 A.

Ich habe mit diesem Aufbau kurzzeitig und unter ziemlicher Anstrengung 400 Watt erreicht. Allgemein kann gesagt werden, dass der Mensch (die Antriebsquelle) der limitierende Faktor ist. Seine Leistungsfähigkeit dürfte nur wenig über 400 Watt liegen und dies nicht für lange Zeit.

Mit den Resultaten bin ich sehr zufrieden, je nach Testaufbau können direkt (ohne Umwandlung) bis zu 36 V und 25 A generiert werden, dies bei tiefen Umdrehungen vom 250rpm.



Kapitel 5

MATERIAL UND KOSTEN

Zur Herstellung dieses Axial Flux Alternators ist viel Material eingesetzt worden.

Eine Übersicht sämtlicher gekauften Materialien und der Spenden:

Bezugsquelle	Artikel	Preis	Verwendungszweck
Supermagnete.ch	32 Quader N42 Magnete (Neodym-Eisen-Bor), vernickelt, 20 x 20 x 10 mm	105.00 CHF	-
Distrelect	2x Kupferlackdraht 1,2 mm x 100 m	99.80 CHF	Spulenbau
	2x Kupferlackdraht 1,4 mm x 75 m	99.80 CHF	Spulenbau; jedoch nicht gebraucht, da zu dick (Fehlbestellung)
Suter-Kunststoffe AG	2x R&G Giessharz wasserklar	69.80 CHF	Stator-Guss
	Glasgewebe	13.40 CHF	Stabilität Stator, Spulenfixierung
	Glasfaserschnitzel 6 mm	9.65 CHF	Stabilität Stator, Spulenfixierung
	SCS-Trennmittelpaste	25.80 CHF	Trennmittel für Stator-Guss
Neuenschwander Mechanics	Fertigung 2x Rotorscheiben, 2x Flansch (Laserschnitt, CNC)	400.00 CHF	-
Coop Bau + Hobby	M5 + M6 Unterlagsscheiben, Muttern, Sechskantschrauben, Senkkopfschrauben	26.50 CHF	Rotor, Flansch
HR. Meier Partner AG	div. Kleinmaterial, Gewindestangen, Heizungsrohre	-	-
Haba	Stahlplatte K-52	10.00 CHF	Aufbocken des Fahrrads
metall-laden	Stahlprofile	15.00 CHF	Befestigung
Velo Elsener	Fahrrad	-	-
Schreineria	div. Holz	35.00 CHF	Form-Bau, Grundplatte Fahrrad
Pusterla	3 Magnete	11.70 CHF	Spulentests
Jumbo	div. Schleifpapier	20.00 CHF	Form-Bau Stator, Grundplatte
	Malerzubehör (Abdeckfolie, HK-Walzen..)	44.90 CHF	Halterungen Streichen
	Kunstharzlack	8.50 CHF	Stator Lackierung
	UHU Zweikomponentenkleber (1x schnellfest, 2x endfest)	32.50 CHF	Form-Bau, Stator Reparatur, Magnetbefestigung
	Tesa Isolierband (600 V)	11.40 CHF	Spulenfixierung und Ausrichtung
	div. Kleinmaterial	50.00 CHF	div.
	Conrad	div. Stiftsockellampen 12 V , 24 V / 50 W, 100 W, 150 W, 250 W	40.10 CHF
	div. Fahrradlampen und LED	8.20 CHF	Spulentests
	Kupferlackdraht in verschiedenen Durchmessern	21.75 CHF	Spulentests
	Lötendraht	13.95 CHF	Löten
	analoge Lötstation	19.95 CHF	Löten
	Voltmeter	99.95 CHF	Messungen
Total		1'292.65 CHF	

Kapitel 6

SCHLUSSBEMERKUNGEN UND DANKSAGUNG

Eine lehrreiche und sehr intensive Zeit geht für mich mit der Fertigstellung des Axial Flux Alternators und der Abgabe dieses Dokumentes zu Ende.

Mit dem Entschluss eine solche Maschine zu konstruieren und zu bauen, habe ich in vielerlei Hinsicht Neuland betreten. Wo zu Beginn nur Fragen in meinem Kopf umherschwirrten, entwickelte sich mit der Zeit eine genaue Vorstellung darüber, wie das Endprodukt konstruiert sein sollte.

Ich habe mir die nötigen technischen Grundlagen angeeignet, Fertigungstechniken ausgearbeitet und verfeinert und mir Gedanken zu den eingesetzten Materialien gemacht. Schliesslich habe ich alles umgesetzt und meine erste Maschine gebaut. Als ich die erste Messung mit dem fertig gestellten Alternator vornahm, fiel mir ein Stein vom Herzen. Alle meine getroffenen Entscheidungen haben zu einem funktionierenden Endprodukt geführt.

Folgenden Personen und Firmen möchte ich für die Unterstützung bei dieser Arbeit danken:

Der Firma HR. Meier Partner AG für die Benützung der Werkstatt, der Arbeitsgeräte und dem zur Verfügung gestellten Kleinmaterial.

Velo Elsener, für das gesponserte Fahrrad und Neuenchwander Mechanics, für die Herstellung der Metallteile.

Ein besonderer Dank kommt meinem Bruder zu, der mir immer wieder mit guten Ratschlägen weiterhalf, insbesondere im Bereich der Elektronik.

Markus Schmet und Stefan Fischer möchte ich für die Hilfe bei der Ausgestaltung des Dokumentes bzw. für das Korrekturlesen recht herzlich danken.