

Onderzoek naar en ontwerpen van een traag draaiende generator

Kwinten Vande Putte

Scriptie voorgedragen tot het
behalen van de graad van Bachelor
Scheepswerktuigkunde aan de
Antwerp Maritime Academy

Promotor:
Kapt. Prof. Werner Jacobs

Academiejaar: 2024-2025

Voorwoord

Beste lezer,

Met het schrijven van deze scriptie rond ik mijn bacheloropleiding Scheepswerktuigkunde af. Deze scriptie vormt het sluitstuk van een leerzame en boeiende periode waarin ik mijn technische kennis en vaardigheden heb mogen ontwikkelen. In het bijzonder richt ik mij in dit onderzoek op het ontwerpen van een generator die efficiënt werkt bij een traag draaiende snelheid, een technisch uitdagend onderwerp. Mijn eerder opgedane ervaring en interesse in elektrische systemen kwamen hierbij goed van pas en hebben mij geholpen om dit project met enthousiasme en toewijding aan te pakken.

Dit werk was echter niet mogelijk geweest zonder de steun van de mensen om mij heen. Ik wil in het bijzonder mijn familie bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en aanmoediging gedurende mijn hele studie. Ook wil ik mijn medestudent bedanken voor de samenwerking en motiverende gesprekken die vaak voor een frisse blik zorgden. Daarnaast ben ik mijn psychologe bijzonder dankbaar voor haar begeleiding, die me hielp om gefocust en gemotiveerd te blijven, ook op de moeilijkere momenten.

Tot slot wil ik mijn promotor bedanken voor zijn geduld, begrip en het vertrouwen dat hij in mij stelde tijdens dit project. Zijn begeleiding en kritische feedback waren van onschatbare waarde en hebben bijgedragen aan het tot stand komen van dit eindwerk.

Met trots presenteer ik dan ook deze scriptie, als bekroning op mijn bacheloropleiding.

Samenvatting

Deze scriptie behandelt het onderzoeks- en ontwerpproces van een generator die bij lage toerentallen een maximale opbrengst moet leveren. Het ontwerpproces van drie opeenvolgende prototypes wordt uitvoerig besproken. Elk prototype wordt geëvalueerd op ontwerp, fysieke uitwerking, opgetreden problemen, mogelijke oorzaken en voorgestelde oplossingen. Hiervoor is gebruik gemaakt van 3D-printtechnologie in het ontwikkelingsproces.

Het eerste en tweede prototype vormen belangrijke leerstappen waarin verschillende technische en praktische uitdagingen aan het licht kwamen. Deze inzichten leidden tot de ontwikkeling van een derde prototype, gebaseerd op een serpentine *coil*-ontwerp, waarin eerdere tekortkomingen werden aangepakt en verbeteringen werden geïmplementeerd.

De scriptie sluit af met een reeks metingen die de prestaties van het laatste prototype in kaart brengen en de doeltreffendheid van het uiteindelijke ontwerp weergeven.

Ondanks de uitgebreide experimentele inspanningen bleek het niet mogelijk om een generator te realiseren die bij lage snelheden voldoende elektrische energie kon opwekken voor praktische toepassingen.

Abstract

This thesis discusses the research and design process of a generator that must deliver maximum output at low rotational speeds. The design process of three successive prototypes is thoroughly examined. Each prototype is evaluated in terms of design, physical implementation, encountered issues, possible causes, and proposed solutions. 3D printing technology was used throughout the development process.

The first and second prototypes represent important learning steps in which various technical and practical challenges emerged. These insights led to the development of a third prototype, based on a serpentine *coil* design, in which previous shortcomings were addressed and improvements implemented.

The thesis concludes with a series of measurements that map the performance of the final prototype and demonstrate the effectiveness of the final design.

Despite extensive experimental efforts, it proved impossible to realize a generator that could produce sufficient electrical energy at low speeds for practical applications.

Inhoudstabel

1	<i>Inleiding</i>	1
2	<i>Generator</i>	3
2.1	Principe generator	3
2.2	Technische Keuzes.....	4
3	<i>3D printers</i>	5
4	<i>Onderzoek en ontwerpen</i>	8
4.1	Prototype 1.....	8
4.1.1	Ontwerp	8
4.1.2	Fysieke uitwerking	8
4.1.3	Problemen.....	11
4.1.4	Mogelijke oorzaken	11
4.1.5	Oplossingen	12
4.2	Prototype 2.....	13
4.2.1	Ontwerp	13
4.2.2	Fysieke uitwerking	19
4.2.3	Problemen.....	20
4.2.4	Oplossingen	21
4.3	Prototype 3 – <i>Serpentine Coil Generator</i>	22
4.3.1	Ontwerp	23
4.3.2	Fysieke uitwerking	29
4.3.3	Problemen en oplossingen.....	34
5	<i>Metingen</i>	36
5.1	Opstelling.....	36
5.2	Spanning	40
5.3	Stroom.....	41
5.4	Vermogen.....	42

5.5	Bevindingen.....	42
6	<i>Toekomstig onderzoek</i>	43
7	<i>Conclusie</i>	44
8	<i>Bibliografie</i>	45

Figurenlijst

<i>Figuur 1 Opbouw Generator.....</i>	<i>3</i>
<i>Figuur 2 Magneetjes.....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 3 Koperdraad.....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 4 Lagers.....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 5 Geprinte stukken</i>	<i>5</i>
<i>Figuur 6 Printdefect</i>	<i>7</i>
<i>Figuur 7 Prototype 1</i>	<i>8</i>
<i>Figuur 8 Magneetjes in de rotor</i>	<i>8</i>
<i>Figuur 9 Gewikkelde stator.....</i>	<i>9</i>
<i>Figuur 10 Volgorde van wikkelen</i>	<i>10</i>
<i>Figuur 11 Prototype 2.....</i>	<i>13</i>
<i>Figuur 12 Statorring in twee delen</i>	<i>13</i>
<i>Figuur 13 Rotorlichaam</i>	<i>15</i>
<i>Figuur 14 Partial</i>	<i>15</i>
<i>Figuur 15 Rotordeksel</i>	<i>16</i>
<i>Figuur 16 Statorring.....</i>	<i>17</i>
<i>Figuur 17 Statorkern A</i>	<i>18</i>
<i>Figuur 18 Statorkern B</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 19 Prototype 3.....</i>	<i>22</i>
<i>Figuur 20 Rotor.....</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 21 Statorring.....</i>	<i>25</i>
<i>Figuur 22 Linker houder</i>	<i>26</i>
<i>Figuur 23 Rechter houder.....</i>	<i>27</i>
<i>Figuur 24 Basis.....</i>	<i>28</i>
<i>Figuur 25 Wikkelopstelling</i>	<i>29</i>
<i>Figuur 26 Wikkelen.....</i>	<i>29</i>
<i>Figuur 27 Plakband rond lus</i>	<i>30</i>
<i>Figuur 28 Gewikkelde lus</i>	<i>30</i>
<i>Figuur 29 Geplooid lus</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 30 Lus op statorring</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 31 Vastplakken lus op statorring.....</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 32 Gewikkelde statorring.....</i>	<i>32</i>
<i>Figuur 33 26 wikkelingen.....</i>	<i>32</i>
<i>Figuur 34 50 wikkelingen.....</i>	<i>32</i>
<i>Figuur 35 Afgewerkte generator.....</i>	<i>33</i>
<i>Figuur 36 Luchtspleet.....</i>	<i>34</i>
<i>Figuur 37 Vijsjes op de as</i>	<i>35</i>

<i>Figuur 38 Testopstelling</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 39 Brandend lampje</i>	<i>37</i>
<i>Figuur 40 Spanningsgrafiek</i>	<i>40</i>
<i>Figuur 41 Stroomgrafiek</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 42 Vermogensgrafiek</i>	<i>42</i>

Tabellenlijst

<i>Tabel 1 Meting met lampje</i>	<i>38</i>
<i>Tabel 2 Metingen Generator</i>	<i>39</i>

Verklarende woordenlijst

Afkorting	Engels woord	Uitleg
	Printbed	Het oppervlak waarop een 3D-printer print
	Coil	Spoel
	Feature	Een opvallende of nuttige eigenschap van iets
	Nozzle	De spuitmond van de 3D-printer waar het filament gesmolten wordt en vervolgens print
	Main body	Het hoofdgedeelte
	Slots	Sleuven of aansluitplaatsen waar onderdelen in passen
	Partial	Iets dat niet volledig is
	Design	Ontwerp, de manier waarop iets is vormgegeven
	Render	Het omzetten van digitale informatie naar een zichtbaar beeld
ABS		Acrylonitril-butadien-styreen

1 Inleiding

De wereld heeft vandaag meer dan ooit nood aan hernieuwbare energie. De opwarming van de aarde, veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen uit fossiele brandstoffen zoals olie, steenkool en gas, vormt een ernstige bedreiging voor het klimaat. Hernieuwbare energiebronnen zoals zon, wind en waterkracht stoten nauwelijks tot geen CO₂ uit en zijn daardoor essentieel in de strijd tegen klimaatverandering. Bovendien raken fossiele brandstoffen stilaan uitgeput, terwijl hernieuwbare bronnen onuitputtelijk zijn en continu beschikbaar blijven. Ten slotte biedt hernieuwbare energie ook meer energiezekerheid: landen kunnen hun afhankelijkheid van buitenlandse energiebronnen verkleinen door lokaal duurzame energie op te wekken. Om deze redenen is de omschakeling naar hernieuwbare energie van cruciaal belang voor een duurzame en stabiele toekomst. (*How Climate Change Impacts Renewable Energy – State of the Planet*, 2024; United Nations, z.d.)

Een van de onuitputtelijke energiebronnen is de golfenergie (OES | *What is Ocean Energy | Waves*, z.d.). Kapt. dr W. Jacobs is een project gestart om te onderzoeken of de instabiliteit van een voorwerp op het water, zoals bijvoorbeeld een schip, gebruikt kan worden voor het opwekken van elektriciteit.

Om de beweging van de golven te kunnen gebruiken om energie op te wekken, is er een generator nodig. De golven laten het ontwerp rollen in een heen en weer beweging en deze beweging is ontzettend traag. Dit heeft als gevolg dat wanneer de generator rechtstreeks aangedreven wordt, deze geen volledige rotaties gaat maken en zeer traag beweegt (Kuijpers, 2023). Dit is een probleem. Om veel opbrengst uit de generator te halen moeten de koperen wikkelingen voldoende snel het magnetische veld snijden. Indien dit traag gebeurt wordt er minder spanning opgewekt.

De rotatiesnelheid kan verhoogd worden met tandwielen of een andere overbrenging maar dit geeft verliezen (Wang, 2024). Deze verliezen maken dat dit geen optie is voor dit project.

Vanwege de zeer specifieke toepassing van deze generator was er onderzoek nodig of deze iets ging opbrengen. Om een test opstelling te maken om het principe te testen is er een schaalmodel nodig. Dit schaalmodel moet een kleine generator

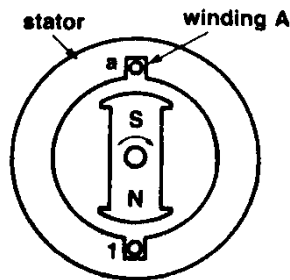
bevatten die geschikt is voor lage toerentallen oftewel lage rotatiesnelheid. Een eerste test is gebeurd door een collega student waaruit bleek dat de lage rotatiesnelheden niet voldoende waren om voldoende vermogen te genereren met courant verkrijgbare generatoren.

Generatoren voor deze toepassingen, van deze afmetingen zijn lastig te vinden. Daarom is de beslissing genomen om zelf een generator te ontwerpen en te bouwen. Deze scriptie focust zich op het onderdeel van dit project omtrent het ontwerpen van deze generator.

2 Generator

Bij het begin van het project werden verschillende mogelijkheden voor het ontwerpen van een generator bekeken.

2.1 Principe generator



Figuur 1 Opbouw Generator

Bron: (Theodore Wildi, 2014)

Wanneer een magneet ronddraait in de omgeving van een elektrische geleider, dan wordt er in de geleider een spanning geïnduceerd (Theodore Wildi, 2014). De geïnduceerde spanning van de generator wordt bepaald met de volgende formule:

$$E_{al} = Blv$$

Hierin:

- E_{al} = de spanning geïnduceerd in de spoel
- B = de flux dichtheid van het magnetisch veld waar de spoel door beweegt
- l = de lengte van de geleider die door het magnetisch veld beweegt
- v = de snelheid van de koperdraad door het magnetisch veld

Vanwege het lage toerental is er een generator nodig die goed werkt bij zeer trage snelheid. Dit beïnvloedt de keuze in het aantal magnetische veldlijnen en de keuze in de lengte van de geleider die door het magnetisch veld passeert. Deze karakteristieken moeten zo groot mogelijk zijn om toch voldoende opbrengst te hebben.

2.2 Technische Keuzes

Een eerste beslissing die genomen werd voor het eerste prototype was om het aantal magneetjes te maximaliseren. Als er meer magneten zijn, zijn er meer poolparen. Meer magneten betekent ook dat er meer veldlijnen gesneden worden, waardoor de opbrengst verhoogt. Er werd gekozen voor kleine neodymium magneetjes. Dit zijn zeer sterke permanente magneten (Shewane et al., z.d.). Ze zijn courant verkrijgbaar en goedkoop.



Figuur 3 Magneetjes

Bron: Eigen werk



Figuur 2 Koperdraad

Bron: Eigen werk

De wikkelingen worden gemaakt uit geëmailleerd koperdraad. Dit is een koperdraad met een isolerende vernislaag op. De vernislaag voorkomt kortsluiting tussen de wikkelingen (*What Are Wire Enamels | Electrical Insulation | Axalta Energy Solutions*, z.d.). De draad die gebruikt is heeft een diameter van 0.45mm. Voordat de koperdraad elektrisch aangesloten kan worden, moet eerst de vernislaag verwijderd worden. Dit wordt gedaan met behulp van schuurpapier.

Er zijn lagers gebruikt om de vlotte beweging te garanderen, zonder wrijving tussen de gemaakte stukken te introduceren. De gebruikte lagers zijn kogellagers. Kogellagers ondersteunen en geleiden, met minimale wrijving, roterende of heen-en-weer gaande machineonderdelen (*Bearing basics | SKF*, z.d.).



Figuur 4 Lagers

Bron: Eigen werk

Een laatste belangrijke beslissing was de keuze tussen stator en rotor. Door de neodymium magneetjes in de rotor te plaatsen, is er bewegingsvrijheid gecreëerd. De koperdraad van de wikkelingen belemmert de rotatie niet.

Omdat de generator zelf ontworpen en handgemaakt is, is ervoor geopteerd om de generator toch toe te staan volledige rotaties te maken. Het toestaan van volledige rotaties geeft de mogelijkheid tot meer flexibiliteit met de generator. Zo kan de opbrengst beter getest worden. Als er later overwogen wordt om tandwielen te gebruiken om de rotatiesnelheid te verhogen kan dit ook.

3 3D printers

3D printen is een snelle en goedkope manier om stukken te maken voor prototypes. De stukken zijn zeer complex met vele kleine details. De geometrie van een generator heeft vele kleine karakteristieken om zowel de koperdraad als de magneetjes vast te houden. Dit is geen enkel probleem voor een 3D printer (Shahrubudin et al., 2019).



Figuur 5 Geprinte stukken

Bron: Eigen werk

Een heel groot voordeel van 3D printen is dat het heel snel kan gaan. De tijd die nodig is om een stuk te ontwerpen hangt samen met de complexiteit. De meest complexe stukken hebben vele uren gekost om te ontwerpen. De duur van het printen zelf is enkel afhankelijk van de omvang van het object. Tijdens het printen is er echter geen toezicht van de printer nodig. Eenmaal dat het bestand naar de printer gestuurd is, kan deze zelf voort. Alhoewel dat de print zelf soms 12 uur lang kan duren is er maar vijf minuten nodig om het bestand naar de printer te sturen en als de print voltooid is het stuk van het *printbed* af te halen.

De duur van het ontwerpen kan hier ook niet mee in rekening gebracht worden doordat deze stap altijd nodig is, onafhankelijk van de manier van fabricage.

Een probleem waar omheen moet gewerkt worden met 3D printers is dat het oppervlak aan het *printbed* vlak moet zijn. Het is wel mogelijk om zwevend te printen maar er zijn limieten. Omdat de stukken vaak langs alle kanten details hebben is het lastig om dit in één keer te printen. Om hier omheen te werken kunnen de delen opgesplitst worden door ze middendoor te snijden en beide delen apart te printen. Vervolgens kunnen beide delen aan elkaar gemonteerd worden om het hele stuk te bekomen (*How To Improve Rough Overhangs on a 3D Print* | *Printing It 3D*, z.d.). Deze tactiek is nodig geweest om een bepaald stuk te maken. Dit wordt later nog toegelicht als dat stuk zelf besproken wordt.

Nadat een stuk geprint wordt is er altijd nog een beetje werk nodig om de oppervlakken tot de gewenste afwerking te krijgen. Er resteert altijd een beetje printresidu aan de geprinte stukken. Ook aan het oppervlak waar het stuk aan het *printbed* hangt is er een klein resterend randje. Het resterende printresidu en het randje kunnen verwijderd worden met behulp van een breekmes, vijlen en schuurpapier (MakerVerse, 2024). De kwaliteit van de printer heeft een grote impact op de hoeveelheid opkuiswerk van het stuk. Betere printers laten minder printresidu achter.

Omdat er zelf een 3D printer aangeschaft is, kunnen al de stukken zelf gemaakt worden. Er moet dan niet gewacht worden op een externe factor die de stukken maakt. Hierdoor kunnen dan er gemakkelijk testprints gemaakt worden en sommige stukken meerdere malen geprint worden. Dit is soms nodig voor bepaalde passingen met bijvoorbeeld lagers te kunnen testen zodat alles vlot past.

Het aanschaffen van een 3D printer was de eerste stap van het project. Hiermee kunnen de stukken zelf gemaakt worden voor de constructie van de generator.

De eerste 3D printer die aangeschaft is, was een relatief goedkoop bouw pakket. Deze printer was zeer gemakkelijk te assembleren. Daarna heeft Kapt. dr W. Jacobs de printer onder zijn hoede genomen.

Deze printer had helaas enkele problemen, de printkwaliteit was niet geweldig. Het frame was onvoldoende stijf. Het frame kon de beweging van de printkop tijdens het printen niet tegenhouden. De kleine toegelaten beweging zorgde ervoor dat het plastic niet altijd op de plaats waar deze hoorde te liggen terecht kwam.

Op figuur 6 is een printdefect afgebeeld. Daar is te zien hoe de print kromgetrokken is. Bovenaan is deze smaller dan onderaan. Door het kromtrekken van het stuk is de printer gestopt en is het hele stuk niet geprint.

Deze problemen zijn tot bij Kapt. dr W. Jacobs gebracht. Deze problemen zijn in acht genomen en de beslissing werd genomen om te investeren in een betere printer. De printer die hij tot de beschikking van het project gaf, was van hogere kwaliteit. Dit bevorderde de printkwaliteit van de stukken. De hogere kwaliteit bevorderde de bouw van de prototypes.



Figuur 6 Printdefect

Bron: Eigen werk

4 Onderzoek en ontwerpen

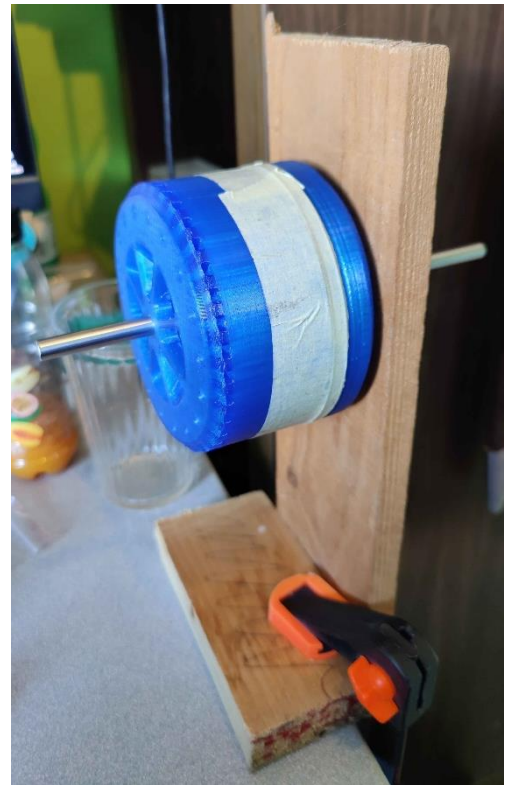
4.1 Prototype 1

4.1.1 Ontwerp

Het ontwerp is een 600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor van TheGoofy. (TheGoofy, z.d.)

Dit is een motor maar kan ook gebruikt worden als een generator. Wanneer we de rotor aandrijven wordt er elektriciteit opgewekt in de wikkelingen. De motor heeft een hoog aantal poolparen en was daarom interessant voor onze toepassing.

TheGoofy heeft een stappenplan gemaakt voor het bouwen van deze generator. Hij heeft eveneens de 3D-tekeningen online beschikbaar gemaakt. Met deze tekeningen printen zijn onze stukken geprint. Vervolgens is zijn stappenplan gevolgd om het geheel te bouwen.



Figuur 7 Prototype 1

Bron: Eigen werk

4.1.2 Fysieke uitwerking

De eerste stap na het ontvangen van de geprinte stukken is het opkuisen van de restanten filament die aan de stukken aan bleven plakken. Onder andere in de pockets voor de magneetjes waren veel draden van de *nozzle* aanwezig. Deze zijn met behulp van een fijne vijl weggehaald, zodanig dat de magneetjes konden passen.

Na meermaals te proberen is het niet gelukt om de rotor in één deel te printen. Het ontbrekende deel is apart geprint en met behulp van lijm en papier tape is er één onderdeel van gemaakt.

Voordat de magneetjes in de rotor geplaatst konden worden, moest worden bepaald wat de noord- en zuidpolen waren. Dit is nodig omdat de magneetjes telkens van polariteit moeten wisselen. Wanneer de

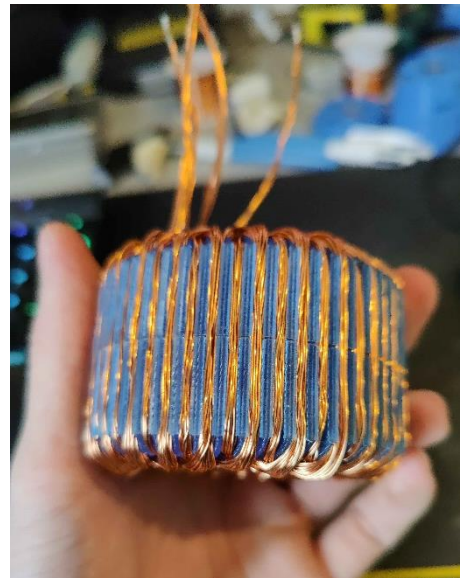


Figuur 8 Magneetjes in de rotor

Bron: Eigen werk

magneetjes aan elkaar hangen wijzen hun polen in dezelfde richting (Dvořák, 2019). Vervolgens is er met een fijn stiftje een “N” voor noordpool op de kant die naar voren gericht is geschreven en een “Z” voor zuidpool op de andere kant. Nadat alle magneetjes hun markering gekregen hebben, konden ze in de rotor geplaatst worden, afwisselend met een “N” of een “Z” naar de binnenkant gericht.

De zwaarste stap was het wikkelen van de stator. Om te beginnen moet de draad voorbereid worden om te wikkelen. Er zijn lussen gemaakt van vijf meter lang, met zes draden die samen getwist worden, om dan in de stator te wikkelen. Om deze lussen te maken, zijn er twee punten afgemeten die vijf meter uit elkaar stonden om daar vervolgens de lussen rond te maken. Nadat een lus was gemaakt, werd deze in elkaar gedraaid. Eenmaal dat een lus opgetorst is, is dit nu een voorbereide wikkeldraad. Deze wikkeldraad is vervolgens opnieuw opgewikkeld om er makkelijk mee overweg te kunnen. Daarbij werd ervoor gekozen om de wikkeldraad om een vierkleurenbalpen te wikkelen.

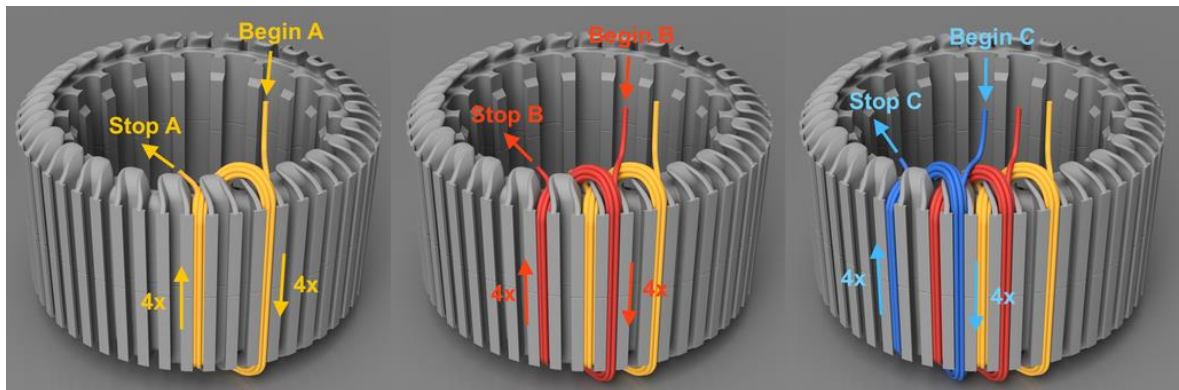


Figuur 9 Gewikkelde stator

Bron: Eigen werk

Deze had de ideale afmeting om mee te wikkelen en het klipje hield de wikkeldraad vast. Deze stappen werden herhaald om 3 identieke wikkeldraden, elk bestaande uit zes dunnere ineens getwiste draden, te bekomen. Op elke vierkleurenbalpen is een letter geschreven die overeenkomt met de corresponderende fase.

Na deze voorbereiding van de draad was het tijd om de stator effectief te beginnen wikkelen. De draad werd in de openingen van de stator aangebracht. Ze werden goed aangedrukt om binnen de diameter van de stator te blijven.



Figuur 10 Volgorde van wikkelen

Bron: (TheGoofy, z.d.)

Wikkeldraad A werd in een willekeurige gleuf gelegd, van boven naar beneden. Beneden werd opgeschoven naar een gleuf, met twee gleuven open te laten. Daar werd naar boven gewikkeld en teruggebracht naar de eerst gleuf. Deze stap werd viermaal herhaald om vier lussen in dezelfde gleuven te bekomen. Belangrijk is dat de draad goed aangespannen is, goed in de gleuven geduwd is en goed achter de haakjes hangt.

De volgende gleuf bleef open voor de terugkeer van de allerlaatste wikkeling.

Wikkeldraad B werd gelegd in de gleuf naast de opengelaten gleuf, naar beneden, drie gleuven verder terug naar boven en viermaal herhalen.

Wikkeldraad C kwam in de eerste vrije gleuf na het terugkomende wikkeldraad A. Deze ging naar beneden, schoof op en terug naar boven.

Dit proces werd herhaald in het patroon van eerst wikkeldraad A, dan wikkeldraad B en ten laatste wikkeldraad C, om zo de hele stator in te wikkelen. Bij voltooiing moest de laatste lus van wikkeldraad C onder de eerste doorgebracht worden. Dit hield alle draden goed vast.

4.1.3 Problemen

Na het 3D-printen van meerdere onderdelen is gebleken dat de toleranties niet nauwkeurig genoeg waren. Hierdoor passen de stukken niet goed samen zoals oorspronkelijk ontworpen. Dit leidt tot problemen zoals het slepen van de rotor in de stator.

Dit slepen heeft meerdere gevolgen voor de generator:

Het slepen verlaagt de efficiëntie van de generator. Deze wrijving tussen de stukken moet overwonnen worden door de drijvende kracht voor de generator. Dit was duidelijk te voelen wanneer de generator manueel tot draaien werd gebracht. Het was zeer stroef en vroeg veel moeite om er beweging in te krijgen.

Een ander gevolg is dat de isolerende vernislaag van de draad beschadigd ging geraken bij langdurig gebruik. Dit komt omdat de draad die gewikkeld was in de stator niet perfect bleef zitten binnen zijn omtrek.

4.1.4 Mogelijke oorzaken

Er zijn verschillende mogelijke oorzaken waarom de geprinte stukken onvoldoende in kwaliteit geprint zijn. Een mogelijke oorzaak is dat er fouten in de tekeningen zitten. Vermits dat de tekeningen niet zelfgemaakt zijn is de kans dat er fouten inzitten ei zo na onbestaande. Dit is echter niet te verifiëren omdat het tekenprogramma dat gebruikt wordt deze tekening niet kon openen.

Omdat dit de eerste stukken waren die geprint werden, was er nog geen vertrouwdeheid met de instellingen. Nadat meerdere stukken geprint waren, werd er meer ervaring opgedaan. De printer kan nu beter ingesteld worden om betere stukken te printen.

Zoals eerder reeds aangehaald is de kans groot dat de voornaamste oorzaak de beperkte kwaliteit van de printer is. Er kunnen geen perfecte stukken verwacht worden van een gebrekkige printer.

4.1.5 Oplossingen

Het eerste wat geprobeerd is, is het afschuren van de stukken om meer ruimte te creëren tussen de stator en de rotor. Bij het afschuren van de stator werd de ruimte voor de draad die al aan de kleine kant was nu nog kleiner. Daardoor werden de vooraf reeds genoemde problemen van de mogelijke beschadiging van de isolerende laag van de koperdraad nu nog groter. Het afschuren van de rotor was lastiger, vermits de binnen diameter groter moest worden. Dit maakte het lastiger om voldoende materiaal weg te nemen.

Na vele uren schuurwerk was het slepen nog steeds een probleem. De realisatie kwam dat de moeite tevergeefs was en dat er naar een andere oplossing gezocht moest worden.

De volgende mogelijkheid was om de tekeningen aan te passen en opnieuw, nauwkeuriger te printen. Omdat de 3D-tekeningen niet geopend konden worden in het tekenprogramma, kon er niet op voortgebouwd worden. Er bestond eveneens al het idee om de generator groter te maken, dit was een goed punt om vanaf nul op te bouwen.

Ondertussen was er geïnvesteerd in een betere 3D printer. Het was een optie om prototype 1 opnieuw te printen met deze nieuwe printer. Er was echter het idee ontstaan om een ander prototype te maken, vanuit eigen tekeningen met de kennis van de tekortkomingen van prototype 1. Dus werd er verdergegaan met de uitwerking van prototype 2.

Bovendien was er ondertussen meer ervaring opgedaan met 3D printen. Deze ervaring helpt in het nauwkeurig afstellen van de printer instellingen.

4.2 Prototype 2

4.2.1 Ontwerp

Alle 3D tekeningen zijn gemaakt in Autodesk Inventor. Vanwege voldoende tekenervaring en de gemakkelijke exportatie naar een 3D-printer werd ervoor gekozen om met dit programma te werken.

Het ontwerp is gebaseerd op het eerste prototype. Het is een uitvergroete versie van dat prototype.

De generator bestaat uit 2 belangrijke onderdelen: de rotor en de stator. Daarnaast zijn er nog de lagers, deze zorgen ervoor dat beide onderdelen vrij kunnen ronddraaien.

Elk van deze onderdelen bestaat uit meerdere onderdelen.

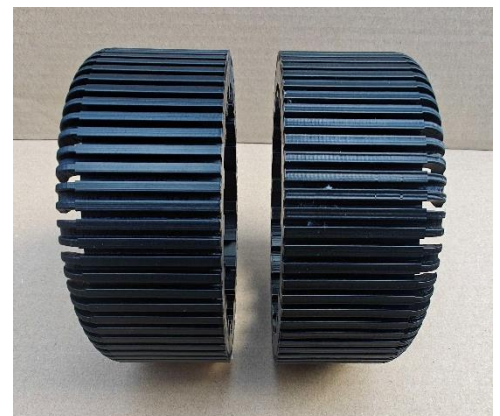
De rotor is de buitenste behuizing rond de stator die de magneten vasthoudt. Er moeten plaatsen voorzien worden voor het installeren van lagers. Er moet ook een mogelijkheid zijn om deze te monteren aan de aandrijving. De rotor kan niet gemaakt worden in een enkele print omdat dat assemblage onmogelijk zou maken. Er moet dus een manier zijn om de rotor te kunnen openen om de stator te installeren. Zo is ervoor gekozen om de rotor op te splitsen in een *main body* met een deksel die met behulp van schroefdraad in elkaar draait. Dit ontwerp is overgenomen van prototype 1.

De stator is ingewikkeld in zijn constructie. De *slots* die de wikkelingen vast houden hebben een redelijk complex ontwerp om de draad vast te kunnen houden. Dit complex ontwerp zorgt er ook voor dat het niet in één deel geprint kan worden omdat er zwevend geprint moet worden. Om hier omheen te kunnen is het onderdeel in het midden in twee gesneden. Om de twee delen samen te houden is er een kern die in beide delen inschuift. Deze kern bestaat zelf ook uit twee delen die met kleine



Figuur 11 Prototype 2

Bron: Eigen werk



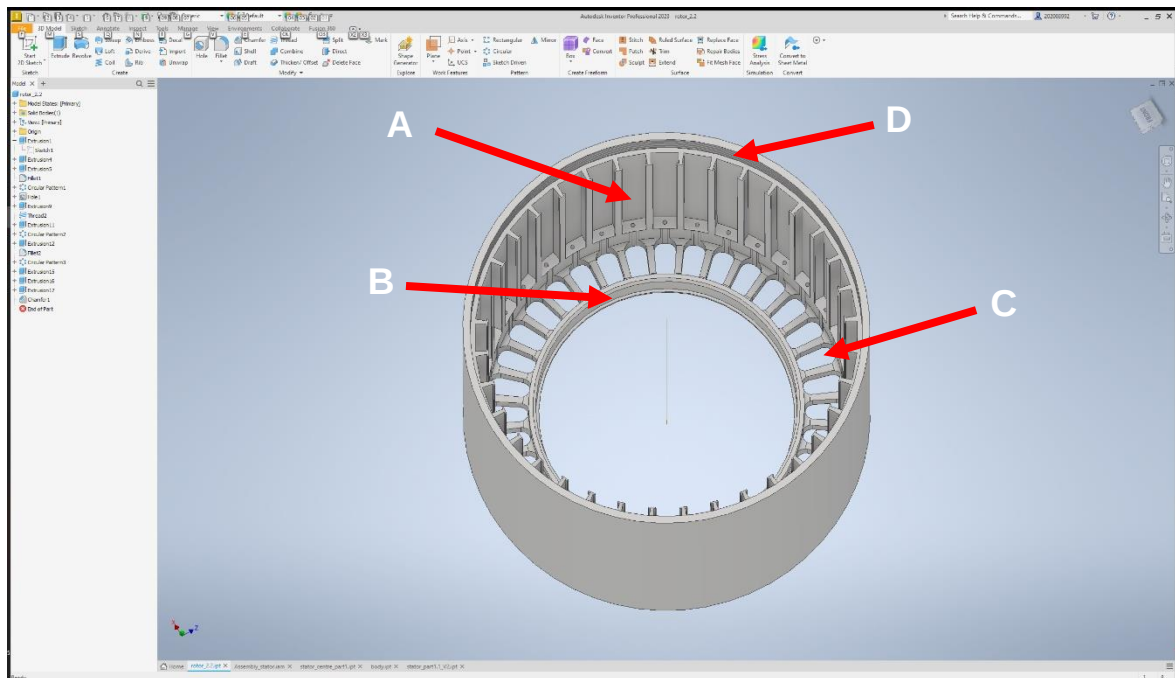
Figuur 12 Statorring in twee delen

Bron: Eigen werk

draadstangen aan elkaar hangen. Deze draadstangen zijn eveneens voorzien voor de montage van de generator.

De afmetingen van de rotor is bepaald door twee factoren. De buis waarin de generator moet passen is de eerste limiterende factor, deze bepaalt de maximale diameter van de generator. De andere factor die de diameter bepaalt zijn de magneetjes. Om het maximale uit de magneten te halen moet de ruimte tussen de magneten minimaal zijn. Deze twee factoren tezamen resulteren in een afmeting waarbij er 36 magneetjes in de rotor passen. Dit komt overeen met achttien poolparen. Om voldoende wanddikte te hebben om de stevigheid te garanderen, word er gekozen voor een buitendiameter van 140mm. Dit past vlot in een pvc-buis van diameter 160mm. De lengte was voorzien om twee magneetjes boven elkaar te zetten. In totaal kunnen er op deze manier 72 magneetjes in de rotor.

- Rotorlichaam



Figuur 13 Rotorlichaam

Bron: Eigen werk

Om de passing van de magneetjes te garanderen is er eerst een *partial* geprint. Dit is een kleine uitsnijding uit het geheel. Deze is geprint om te kunnen passen of de *slots* (A) de juiste afmetingen hebben. Wanneer de *partial* ontvangen was, werd de passing van de magneetjes gecontroleerd. Indien dit niet het geval is kunnen er aanpassingen gemaakt worden in de tekeningen om ze wel te doen passen. Als het hele rotorlichaam geprint wordt en de magneetjes passen niet, is dit een verspilling van veel tijd en materiaal.



Figuur 14 Partial

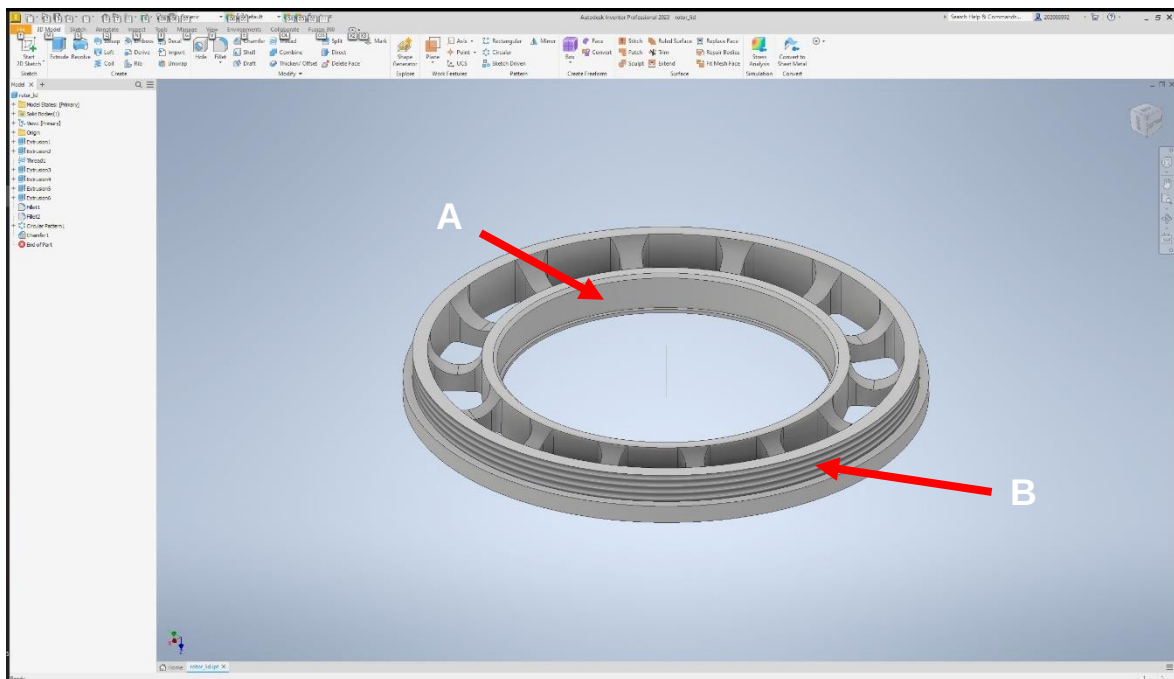
Bron: Eigen werk

De opening voor de lager (B) is voorzien voor een lager van 90/70. De passing is voorzien om licht te spannen zodat de lager goed vastgehouden wordt.

De vele openingen (C) zorgen voor mogelijke koeling en besparen op materiaal en tijd tijdens het printen.

Voor de schroefdraad (D) is de *feature* van Inventor gebruikt, om een schroefdraad die gepast is voor deze diameter te ontwerpen.

- Rotordeksel



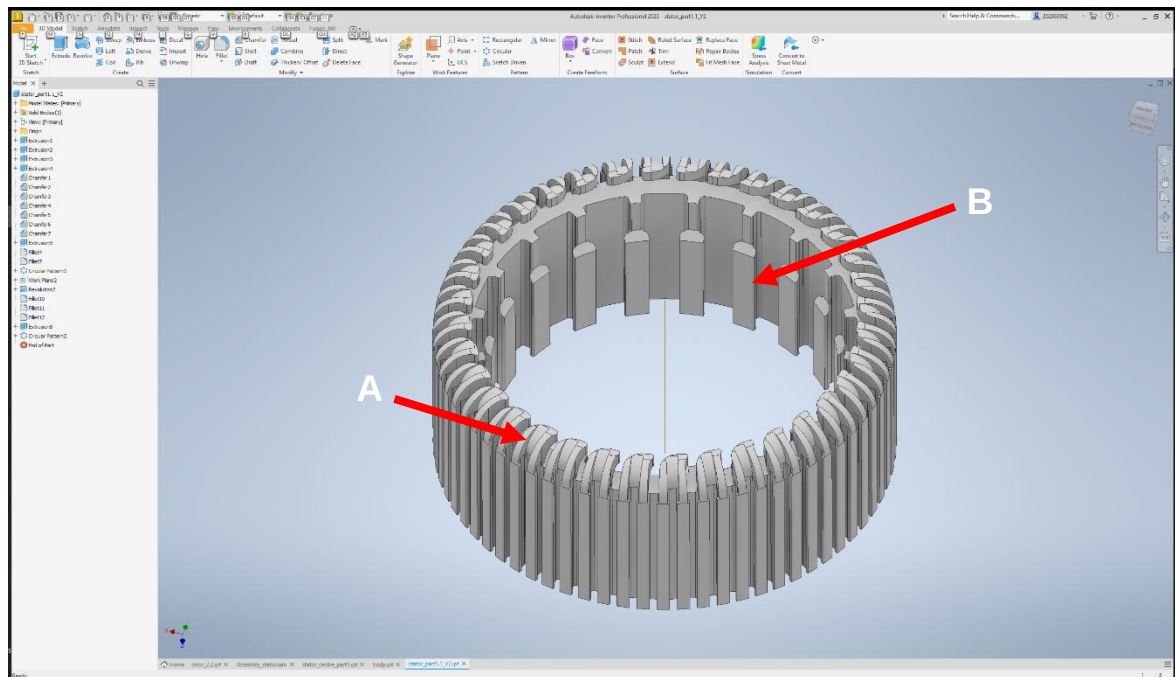
Figuur 15 Rotordeksel

Bron: Eigen werk

Het deksel heeft een zeer simpel ontwerp. Verschillende *features* uit de rotor komen hier terug. Het heeft dezelfde plaats (A) voor een lager die al ontworpen was in het rotorlichaam.

De schroefdraad (B) is hier de overeenkomende afmeting maar deze keer in buitendraad.

- Statorring



Figuur 16 Statorring

Bron: Eigen werk

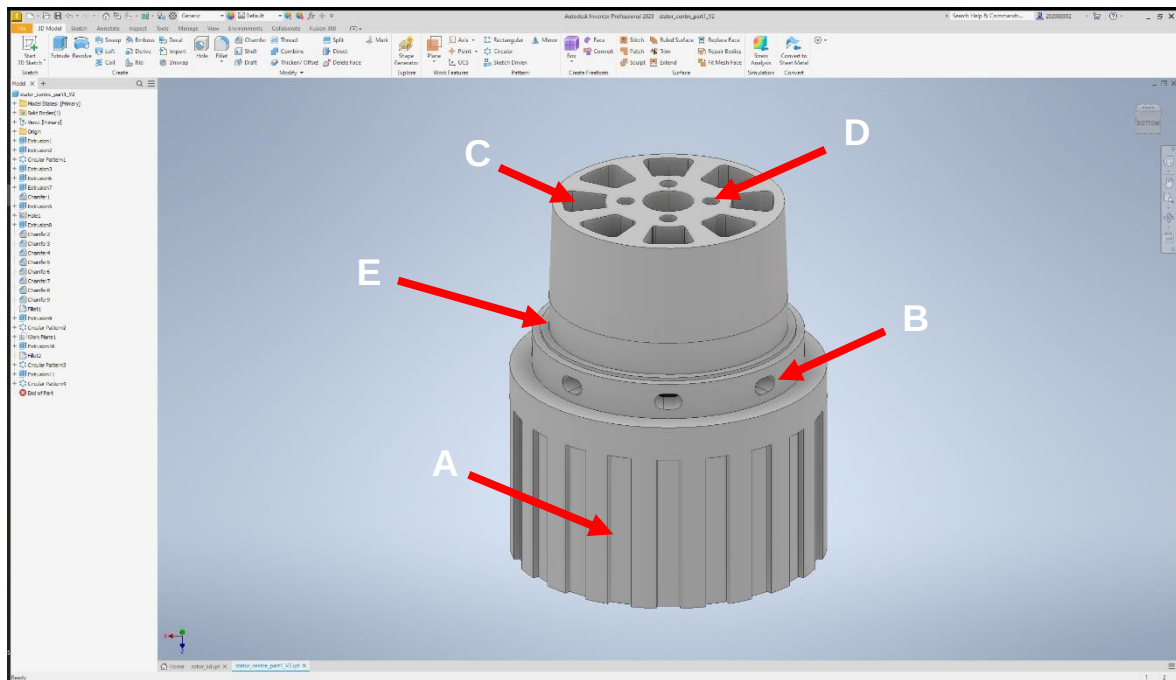
De stator die de wikkelingen vast houdt is een zeer complex ontwerp. Er zijn 72 *slots* waar de draad in moet passen. De uitsteeksels bovenaan (A) dienen als haakjes die de draad in positie houden.

Binnenin zijn er wederom openingen voorzien die besparen op materiaal en printtijd.

De uitsteeksels (B) zijn zodanig ontworpen dat deze perfect in de statorkern kunnen schuiven.

Een gespiegelde versie van dit onderdeel is ook geprint. Deze twee onderdelen worden dan tegen elkaar geplaatst en vormen zodanig de volledige statorring.

- Statorkern A



Figuur 17 Statorkern A

Bron: Eigen werk

De statorkern houdt de twee statorringen samen. De kern is eveneens gemaakt uit twee onderdelen zodanig dat deze rond de uitsteeksels aan de binnenkant van de ringen (zie figuur 16, B) rond kunnen geklemd worden. De twee delen worden vervolgens met draadstangen aan elkaar bevestigd.

De twee delen zijn niet gelijk in lengte, op deze manier houdt het grootste deel beide ringen vast zonder de draadstangen op afschuiving te belasten.

De openingen (A) zijn voorzien om de uitsteeksels van de statorring te ontvangen en goed vast te houden.

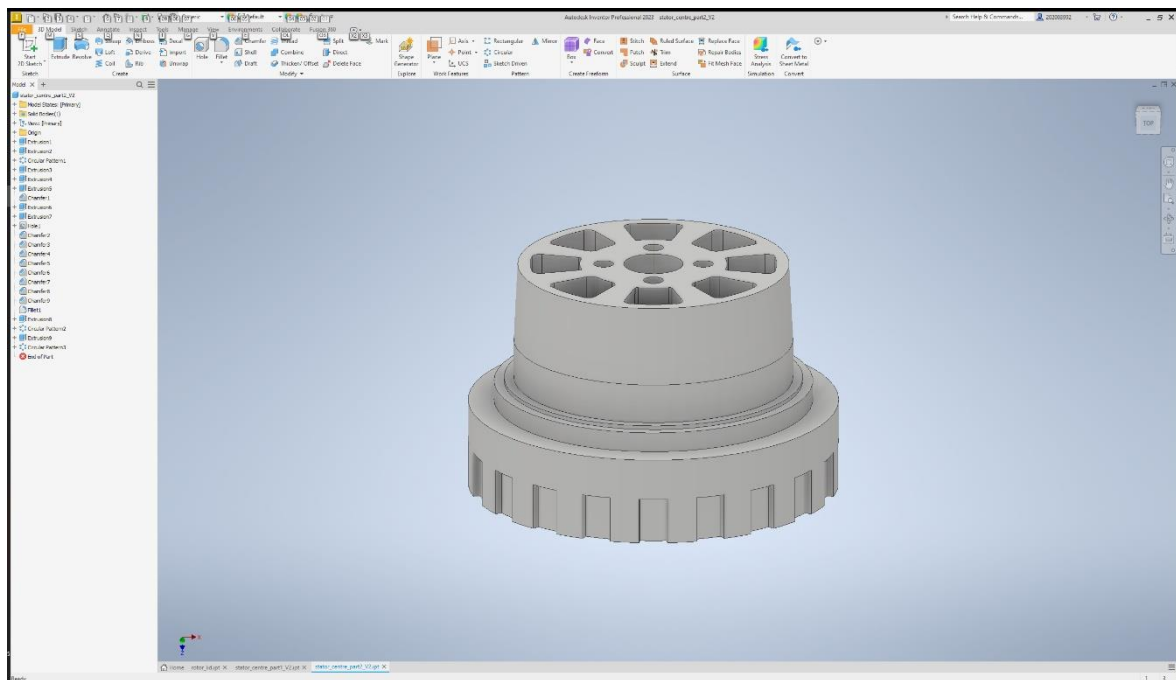
De gaten (B) zijn voorzien om de draad van de wikkelingen naar buiten toe te leiden.

De gaten (C) zijn materiaal en printtijd besparing.

De gaten (D) zijn voor draadstangen die de twee helften van de statorkern samenhouden alsook om de stator te bevestigen en het geheel vast te houden.

Het oppervlak (E) is voorzien om de lager over te schuiven. Er is een klein randje voorzien om de lager tegen te schuiven, wanneer de lager zo gemonteerd wordt, is er geen contact tussen de delen die bewegen. De as die naar het oppervlak (E) toe leidt is licht conisch zodanig dat de lager makkelijk kan geïnstalleerd worden.

- Statorkern B



Figuur 18 Statorkern B

Bron: Eigen werk

Het tweede deel van de statorkern is zeer gelijkaardig aan het eerste deel. De afmetingen zijn aangepast zodanig dat de totale lengte van de twee delen tezamen mooi rond de ringen klemmen. De as is ook minder lang omdat deze nergens aan bevestigd gaat worden.

4.2.2 Fysieke uitwerking

Prototype 2 is amper tot in dit stadium geraakt. De verschillende delen van de rotor zijn geprint geweest en opgekuist zodanig dat deze in elkaar passen. De oppervlakken voorzien om de lager te plaatsen zijn opgeschuurd om mooi te kunnen passen.

De stukken van de rotor zijn zelfs niet eens geprint geraakt. De redenen waarom dat zo gekomen is zijn besproken in 4.2.3 Problemen.

4.2.3 Problemen

Het grote probleem van prototype 2 is de complexiteit en de enorme omvang van de wikkelingen. Pas nadat er meerdere stukken ontvangen waren en de fysieke uitwerking van start ging, kwam er een grote fout aan het licht.

Toen de lengte van de wikkelingen werd uitgerekend, werd er vastgesteld dat de benodigde lengte voor één wikkeling 36m lang was. Zoals voorheen bestaat één wikkeling uit zes verschillende koperdraden. Dit betekent dat er een 36m lange ruimte nodig is om daar 216m aan koperdraad in lussen te leggen. Deze lussen moeten vervolgens gelijkmatig opgedraaid worden.

Dit hele proces is niet realiseerbaar.

Daar bijkomend zijn er nog problemen met de weerstand van de wikkelingen. Omdat de lengte vele malen langer wordt zonder dat de sectie groter wordt, vermeerderd de weerstand in de koperdraad. Dit brengt grotere verliezen met zich mee.

Een ander probleem bevond zich in het ontwerp van de schroefdraad. Het rotordeksel was één van de eerste onderdelen dat geprint was zodat de passing van de lager gecontroleerd kon worden. Hier werd opgemerkt dat de schroefdraad niet geprint was.

Inventor heeft de *feature* om schroefdraad te tekenen. Helaas is deze schroefdraad gewoon een notatie van “hier is er schroefdraad” zonder dat deze in 3D gerenderd wordt (*3D Model Threads in Inventor*, z.d.). Dit is voldoende wanneer de tekening afgegeven wordt aan een frezer of draaier om het object te maken. Voor 3D te printen is dit echter een probleem.

Er bestaan derde partij uitbreidingen voor Inventor die wel toestaan om schroefdraad te tekenen specifiek voor de toepassing van 3D printen (Holst, 2023). Een probleem met het ontwerpen van de schroefdraad is dat deze zeer speciale afmetingen had. Terwijl er hier mee geëxperimenteerd werd, kwamen de andere problemen van prototype 2 aan het licht.

4.2.4 Oplossingen

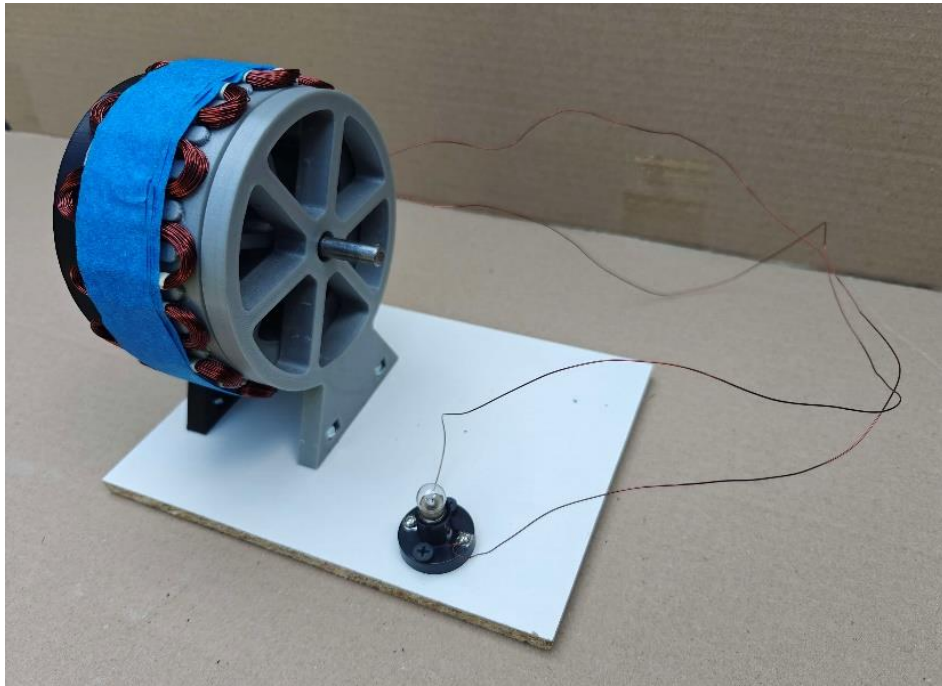
De problemen van de lengte en complexiteit van de wikkelopdracht kunnen op twee mogelijke manieren opgelost worden.

De generator kon terug verkleind worden naar een meer hanteerbaar formaat. Het verkleinen van de generator beïnvloedt de opbrengst die gemaximaliseerd moet worden.

De andere mogelijkheid is om een ander type van generator te gebruiken. Als de constructie de koperdraad op een andere manier in de stator wikkelt kan de generator op een groter formaat gehouden worden, met meer opbrengst, zonder de hanteerbaarheid van het wikkelen te verliezen.

Prototype 2 kan onvoldoende worden aangepast aan deze criteria, daarom wordt er verder gegaan met het volgende prototype.

4.3 Prototype 3 – Serpentine Coil Generator



Figuur 19 Prototype 3

Bron: Eigen werk

Een serpentine *coil* generator gebruikt een andere manier van spoelopstelling. De term "serpentine" verwijst naar de vorm van de spoel: deze volgt een kronkelend of golvend pad, net zoals een slang. De spoel wordt in een lange lus gemaakt die vervolgens het kronkelend pad volgt (Robert Murray-Smith, 2023). Dit is een heel gemakkelijke manier om de generator te kunnen wikkelen. Waar dat er bij de twee vorige prototypes lange draden om de stator heen moest gewikkeld worden, wordt er hier gebruik gemaakt van een lus die de koperdraad bevat. Wanneer er meer lengte koperdraad gebruikt wordt voor een hogere opbrengst verhoogt het aantal wikkelingen in de lus. De lengte van de lus blijft hierbij constant. Dit houdt de hele opstelling overzichtelijk.

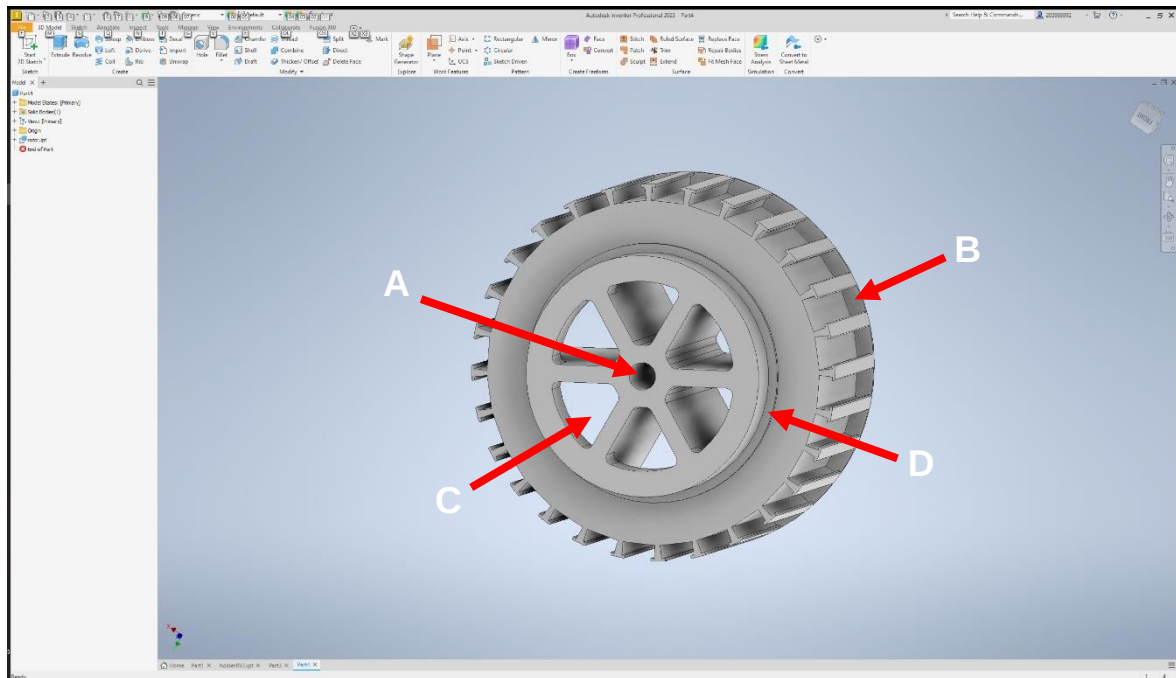
4.3.1 Ontwerp

Een groot verschil in het ontwerp van het derde prototype met de twee vorige is dat nu de rotor met de magneetjes aan de binnenkant zit met daarbuiten de stator met de wikkelingen. Dit heeft verschillende gevolgen voor het ontwerp. De montage voor het vasthouden van de stator en de bevestiging van de rotor aan de aandrijving zijn verschillend.

De rotor kan in één keer geprint worden. Het aantal magneetjes is minder dan in prototype 2. Omdat de rotor zich binnen in de stator bevindt is de diameter kleiner en kunnen er minder magneetjes in geplaatst worden. Daar bovenop komt er nog bij dat er deze keer niet voorzien is om twee magneetjes boven elkaar te plaatsen. In totaal bevat de rotor van prototype 3 nu 28 magneetjes.

De stator heeft een zeer simpele constructie. De manier waarop de windingen in de stator liggen zorgt ervoor dat de windingen gemakkelijk vastgehouden worden. Hierdoor kunnen er ook gemakkelijk meerdere lussen gewikkeld worden om meerdere experimenten uit te kunnen voeren. Om de stator vast te houden zijn er twee voetjes ontworpen die de statorring vasthouden.

- Rotor



Figuur 20 Rotor

Bron: Eigen werk

De opening (A) is voorzien om een as door de rotor te kunnen schuiven. Deze as wordt bevestigd aan de rotor om deze aan te kunnen drijven.

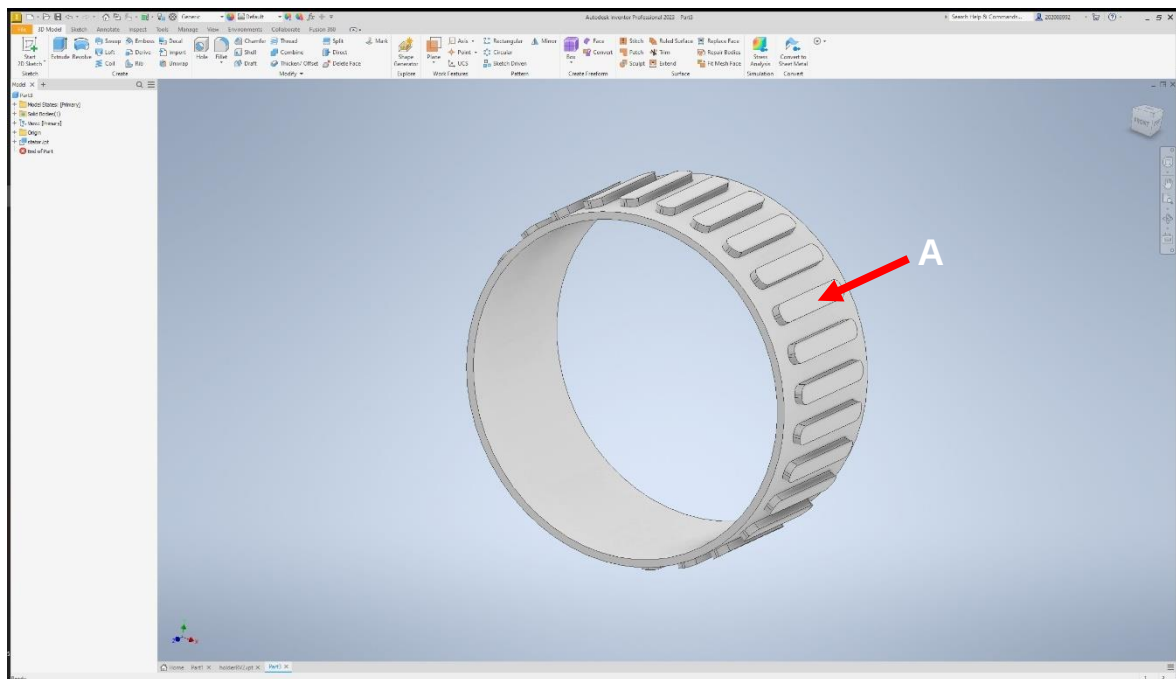
De *slots* (B) zijn voor de magneetjes. Ze zijn getekend op een gelijkaardige manier met prototype 2. Het verschil is dat deze keer de magneetjes zich aan de buitenkant bevinden in plaats van aan de binnenkant.

De rotor is uitgehold (C). Dit is opnieuw gedaan voor het besparen op materiaal en printertijd. In dit geval is er nog een voordeel van dit *design*, namelijk besparing op de massa van de rotor. Vermits dat de rotor ronddraait en in onze toepassing zelfs heen en weer beweegt, betekent dit dat de beweging van de rotor telkens gestopt en opnieuw gestart wordt. De besparing in massa resulteert erin dat er minder energie nodig is om de rotor te stoppen en opnieuw in beweging te brengen. De prototypes worden gemaakt uit ABS-plastic, daardoor is de besparing in massa niet zo zeer groot. Dat in combinatie met de positie van de bespaarde massa in het center van de rotor, betekent dit dat de impact bijna verwaarloosbaar is. Voor een model op grote schaal en uit een zwaarder materiaal vervaardigd, heeft dit wel een grote impact, daarom is het goed om er rekening mee te houden.

Het oppervlak (D) is ontworpen voor de lager die reeds aangeschaft was voor prototype 2.

Aan de achterzijde is er geen voorziening gemaakt voor een lager van groot formaat. In de plaats daarvan wordt de as met een kleine lager vastgehouden. Dit resulteert in een vlakke achterzijde, dit vergemakkelijkt de printopdracht.

- Statorring

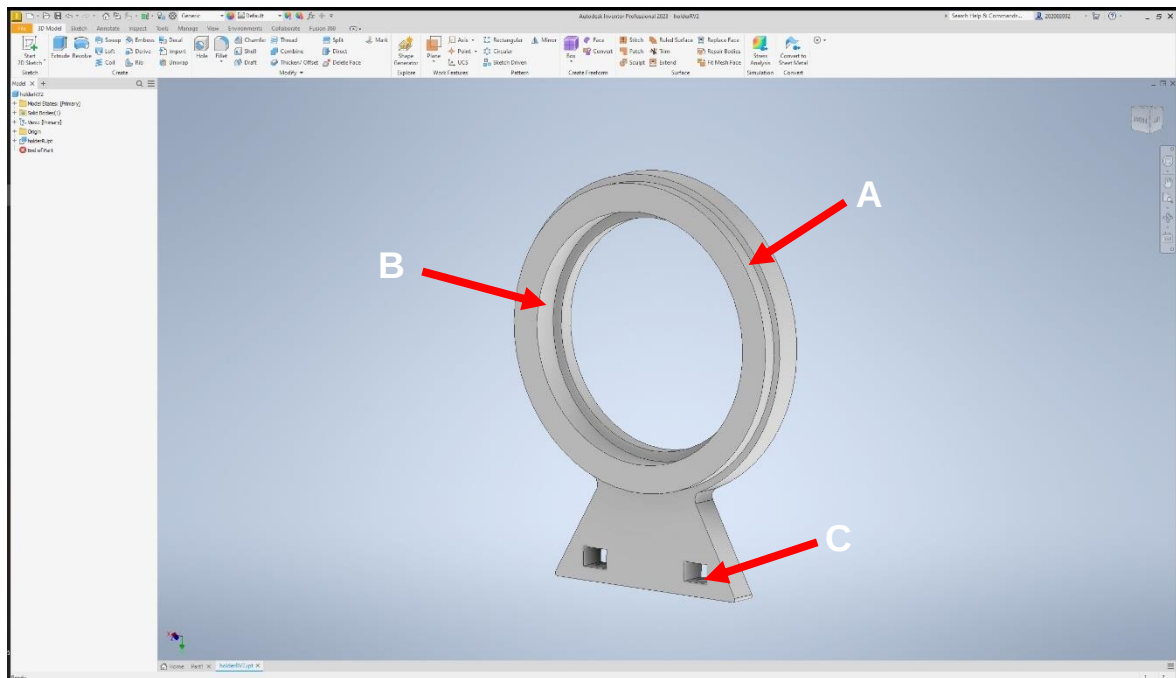


Figuur 21 Statorring

Bron: Eigen werk

De statorring is zeer simpel. Een enkele ring met de uitsparingen (A) waar de windingen tussen gewikkeld worden.

- Linker houder



Figuur 22 Linker houder

Bron: Eigen werk

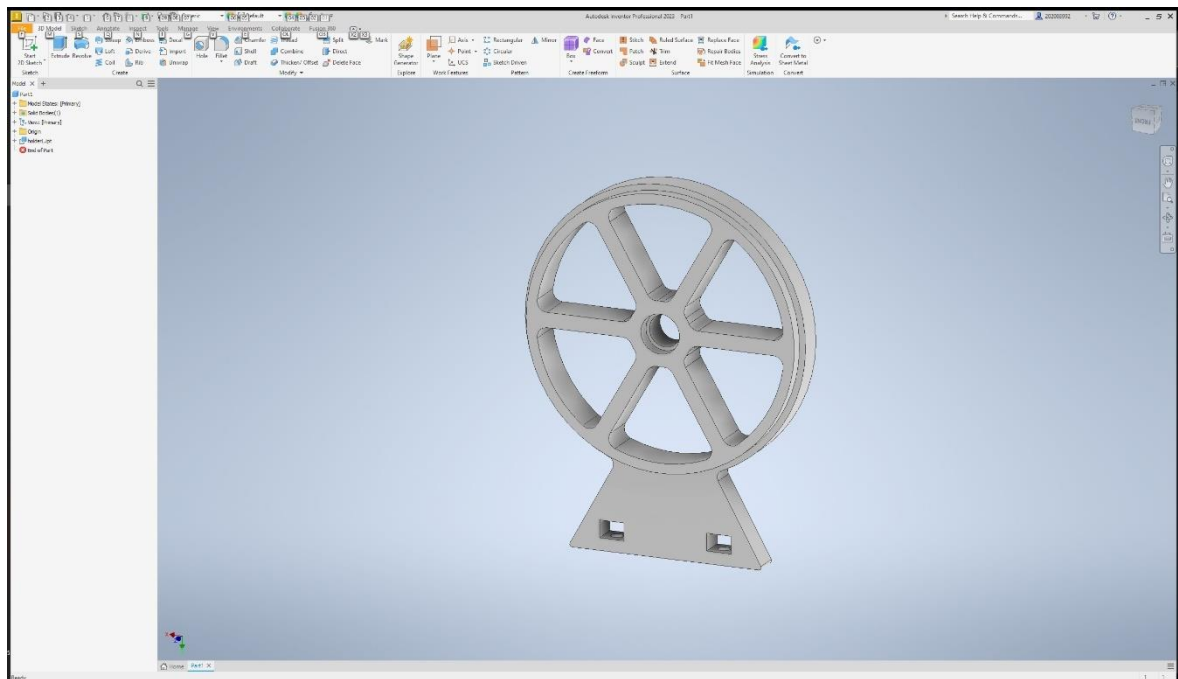
Om de stator te kunnen bevestigen zijn er houders nodig.

Het oppervlak (A) is ontworpen zodanig dat deze perfect binnen de statorring valt. De passing tussen de twee oppervlakken is lichtjes spannend, zodanig dat alles goed vastgehouden wordt.

Het oppervlak (B) is ontworpen voor de lager vast te houden.

Om het geheel goed vast te houden is er een plankje voorzien. De gaten (C) zorgen ervoor dat de houders kunnen gemonteerd worden met boutjes. De vierkante gaten zijn voorzien om een moer in te leggen, langs de onderkant kan er vervolgens een bout door gebracht worden om in de moer vast te zetten.

- Rechter houder

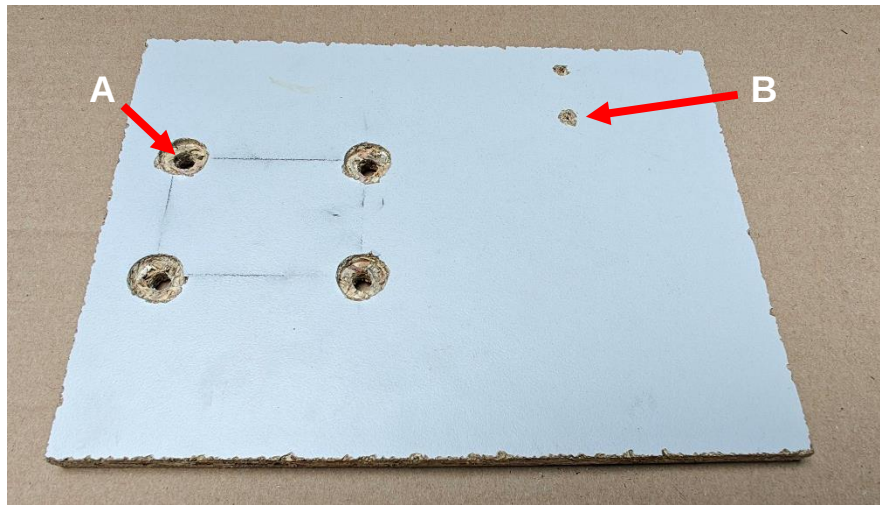


Figuur 23 Rechter houder

Bron: Eigen werk

De rechter houder heeft meerdere van dezelfde ontwerpelementen als de linker houder. Het grote verschil bevindt zich in de lager die gebruikt wordt. Voor deze kant is er een kleine lager gebruikt die de as vasthoudt. Er was al een kleine lager aangeschaft voor prototype 1, deze is hier hergebruikt.

- Basis



Figuur 24 Basis

Bron: Eigen werk

Om het geheel vast te kunnen houden moet er een stevige basis zijn. Er is geopteerd om hiervoor een dun plankje te gebruiken. In het plankje zijn er gaten (A) voorzien die de twee houders vast kunnen houden. Om het geheel stabiel te kunnen zetten zijn de hoofden van de bouten verzonken. Het plankje kan nu vlak op de tafel liggen.

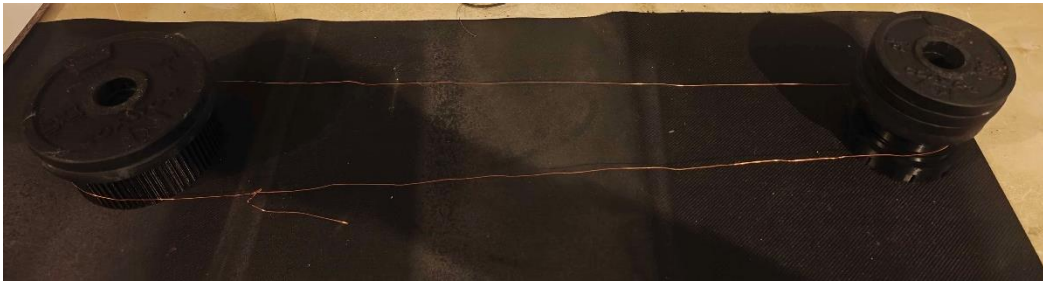
Op het plankje wordt ook een fitting voor een lampje bevestigd, daarvoor dienen de gaten B.

4.3.2 Fysieke uitwerking

Wikkelen:

Het wikkelen van dit type van generator is veel simpeler vergeleken met de vorige prototypes. Er worden lange lussen gemaakt die vervolgens tussen de uitsparingen van de stator gelegd worden.

Er is een proces ontwikkeld om de lussen te maken.

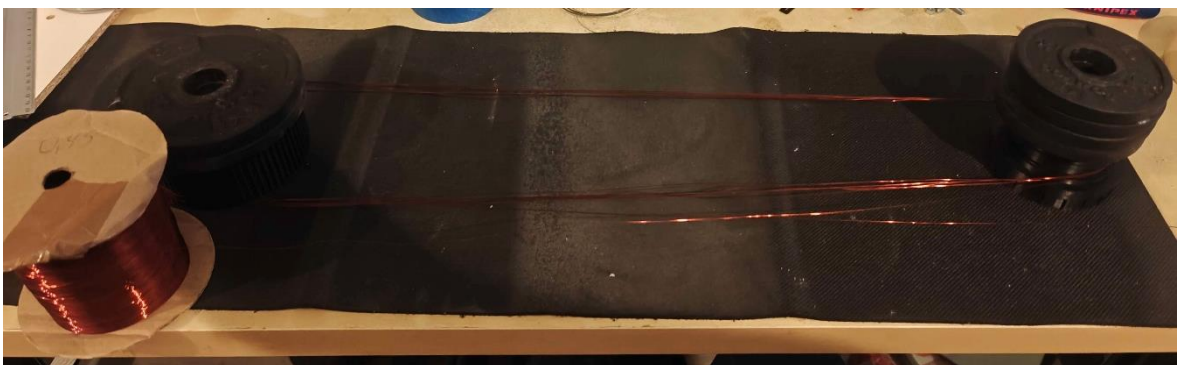


Figuur 25 Wikkelopstelling

Bron: Eigen werk

Eerst is de lengte van de lussen bepaald. Er is gemeten hoe lang een lengte van een enkel deeltje lus is en dat vermenigvuldigd met het aantal deeltjes.

Vervolgens is er een lus op de juiste lengte gemaakt van een enkel stuk koperdraad. Dan zijn er enkele objecten op de juiste afstand uit elkaar geplaatst om de lussen rond te maken. Hiervoor zijn er testprints van prototype 2 gebruikt. Om ze vast te houden is er gewicht op gelegd. Om de positie van beide stukken goed op hun plaats te houden is er een oude muismat ondergelegd. De rubber van de muismat hielp de afstand mooi constant te houden.



Figuur 26 Wikkelen

Bron: Eigen werk

Nu dat de juiste afstand bepaald was kon het maken van de lussen beginnen. Het begin van de koperdraad wordt vastgeplakt aan de tafel. Vervolgens is er met de spoel koperdraad rond de opstelling gegaan tot dat er voldoende wikkelingen waren.

Initieel is er begonnen met een klein aantal wikkelingen in een lus. Op deze manier kon er bevestigd worden of het proces werkt en kon er al een eerste maal getest worden of er elektriciteit opgewekt wordt in dit prototype. Voor de eerste lus is er gekozen om ze slechts zes wikkelingen lang te maken.

Eenmaal dat dit proces op punt gesteld was kon het vervolgens verschillende malen herhaald worden met verschillende aantal wikkelingen om verschillende metingen te doen.

Om de draad goed in de uitsparingen te laten vallen, is de koperdraad in plakband gewikkeld. Het plakband heeft een lengte die overeenkomt met de lengte van de uitsteeksels op de stator. Er is geprobeerd de afstand tussen de plakbandjes gelijk te verdelen. Door onnauwkeurigheid van de lat die gebruikt werd, moest er met de laatste paar gecompenseerd worden maar het kwam uiteindelijk allemaal wel goed uit.



Figuur 27 Plakband rond lus

Bron: Eigen werk

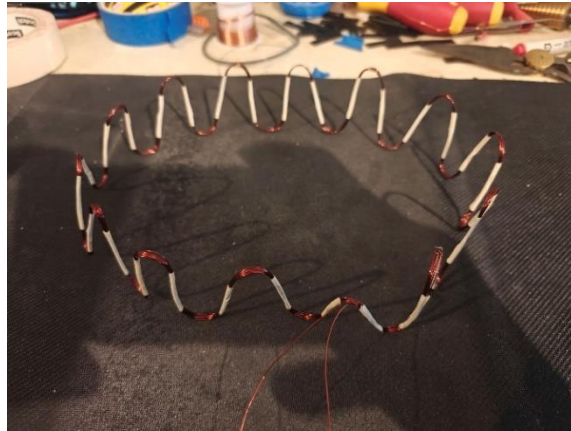
De lus ziet er nu uit zoals in de onderstaande figuur 28.



Figuur 28 Gewikkelde lus

Bron: Eigen werk

Vervolgens is de lus geplooid tussen al de plakbandjes, in voorbereiding om de wikkelingen op de stator te leggen.



Figuur 29 Geplooide lus

Bron: Eigen werk

De lus was nu volledig voorbereid, deze kon nu op de stator gelegd worden.

De wikkelingen bleven niet liggen op zichzelf, maar dit was gemakkelijk opgelost met een beetje plakband. Dit is te zien in onderstaande figuren.



Figuur 30 Lus op statorring

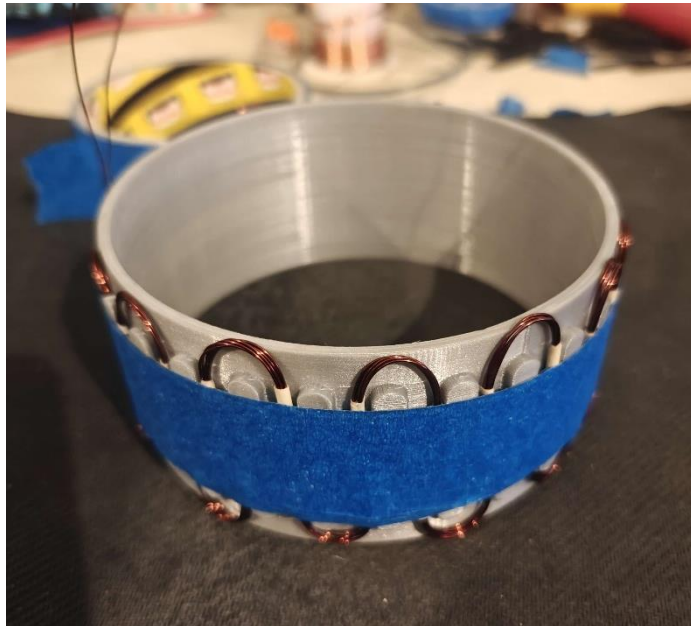
Bron: Eigen werk



Figuur 31 Vastplakken lus op statorring

Bron: Eigen werk

Nu werd een gewikkelde statorring bekomen.



Figuur 32 Gewikkelde statorring

Bron: Eigen werk

Het gecreëerde proces kon nu herhaald worden om lussen met meerdere hoeveelheden wikkelingen te maken.



Figuur 33 26 wikkelingen

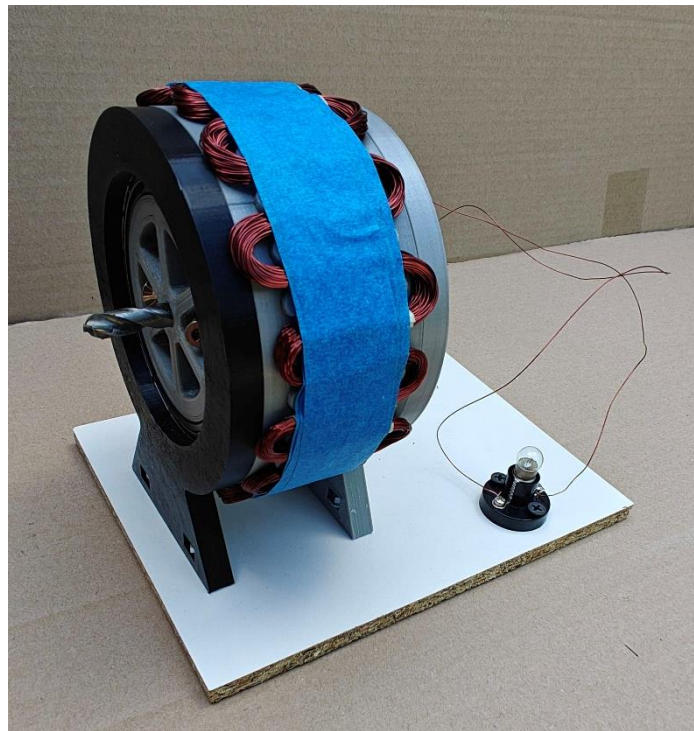
Bron: Eigen werk



Figuur 34 50 wikkelingen

Bron: Eigen werk

Nadat de statorringen gewikkeld waren konden ze nu op de houders gemonteerd worden. De houders werden vervolgens met boutjes gemonteerd op de basis. De strakke passing tussen de ring en de houders, samen met dat de houders vast gebout zijn op de basis, houdt alles voldoende stevig vast. Dit geheel is nu een afgewerkte generator.

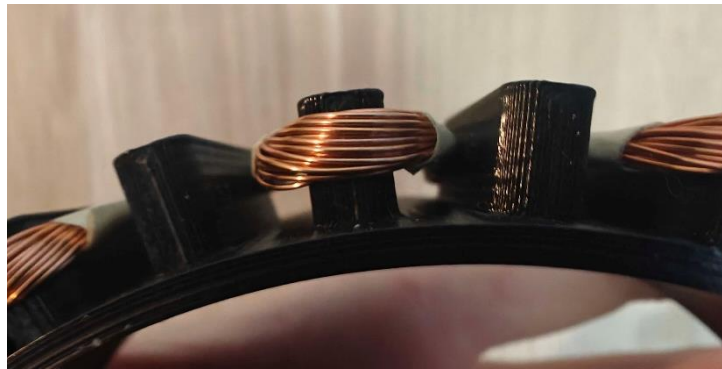


Figuur 35 Afgewerkte generator

Bron: Eigen werk

4.3.3 Problemen en oplossingen

Een van de problemen is dat de draad niet voldoende vastgehouden wordt in de uitsparingen. Het ontwerp van de statorring werd aangepast zodanig dat de uitsparingen nu iets groter zijn. Deze zouden de wikkelingen nu beter vasthouden. Nadat de koperen wikkeling in de grotere uitsparing geplaatst werd, werden ze nog steeds onvoldoende vastgehouden zodat er nog steeds een plakband nodig was om de wikkeling op zijn plaats te houden. Helaas is er hiermee een nieuw probleem geïntroduceerd. Tijdens metingen kwamen de gemeten waarden niet uit met wat er verwacht werd. De lus met een hoger aantal wikkelingen leverde minder spanning op dan de lus met een lager aantal wikkelingen.



Figuur 36 Luchtspleet

Bron: Eigen werk

Er werd opgemerkt dat er een luchtspleet ontstaan was tussen de wikkelingen en de statorring. Deze luchtspleet is te zien op bovenstaande foto. De uitsparingen waren nu zodanig groot dat het plakband de wikkeling niet volledig tegen de statorring duwt. Dit heeft als resultaat dat ze zich verder uit het magnetisch veld bevonden. Verder uit het magnetisch veld betekent dat het magnetisch veld daar zwakker is (Weir et al., 2020), dat de koperdraad minder veldlijnen snijdt en dat er minder elektriciteit opgewekt wordt. Om te verifiëren of deze hypothese correct was zijn de wikkelingen los gemaakt van de aangepaste statorring en vervolgens opnieuw gemonteerd aan de statorring met de kleinere uitsparingen. Op deze statorring is de lus moeilijk te bevestigen. De uitsparingen houden de lus niet goed op zijn plaats. Het enige dat de lus vasthoudt is het plakband. Na een herhaling van de metingen vielen de nieuwe gemeten waarden wel binnen het verwachte bereik.

De wikkeling was ook iets te lang. Er was voldoende overlengte gelaten toen de lengte van de lus initieel bepaald was voor al de bochten te kunnen maken. Nu dat er een lus gemaakt was, kon er beter bepaald worden wat de effectieve benodigde lengte is. Voor de volgende lussen die gemaakt zijn, is de lengte aangepast om beter te passen. Met de lus van 26 wikkelingen was er echter opgemerkt dat met het hoger aantal wikkelingen de buigingsradius meer ruimte nodig had. De lus van 50 wikkelingen is vervolgens weer iets langer gemaakt om hier zeker niet in de problemen te komen. De extra lengte op de lus van 50 wikkelingen, om alle buigingen te kunnen maken, zorgt ervoor dat de elektrische weerstand nog meer verhoogt in de lus. De lengte van de koperdraad is recht evenredig met de weerstand (Hambley, 2019).

De opening voor de as had redelijk grote printdefecten die opgekuist moesten worden zodat de as in de opening past. Toen de opening uitgeboord werd, bleef de boor vastzitten door de strakke passing tussen de stukken. Op dit moment is de beslissing genomen om de boor te laten zitten en deze te gebruiken als as. De boor had de exacte diameter van de lager en paste perfect in het ontwerp. Het zou geen extra moeite kosten om de as te bevestigen aan de rotor vermits de wrijving beide stukken aan elkaar vasthoudt. Toen dat alle testen gedaan werden, begon de rotor echter te slippen van de as. Om dit op te lossen zijn er twee kleine gaatjes geboord en zijn er twee kleine vijsjes in de fluiten van de boor bevestigd. Dit was een zeer gemakkelijke manier om de rotatie tussen de twee onderdelen tegen te houden.

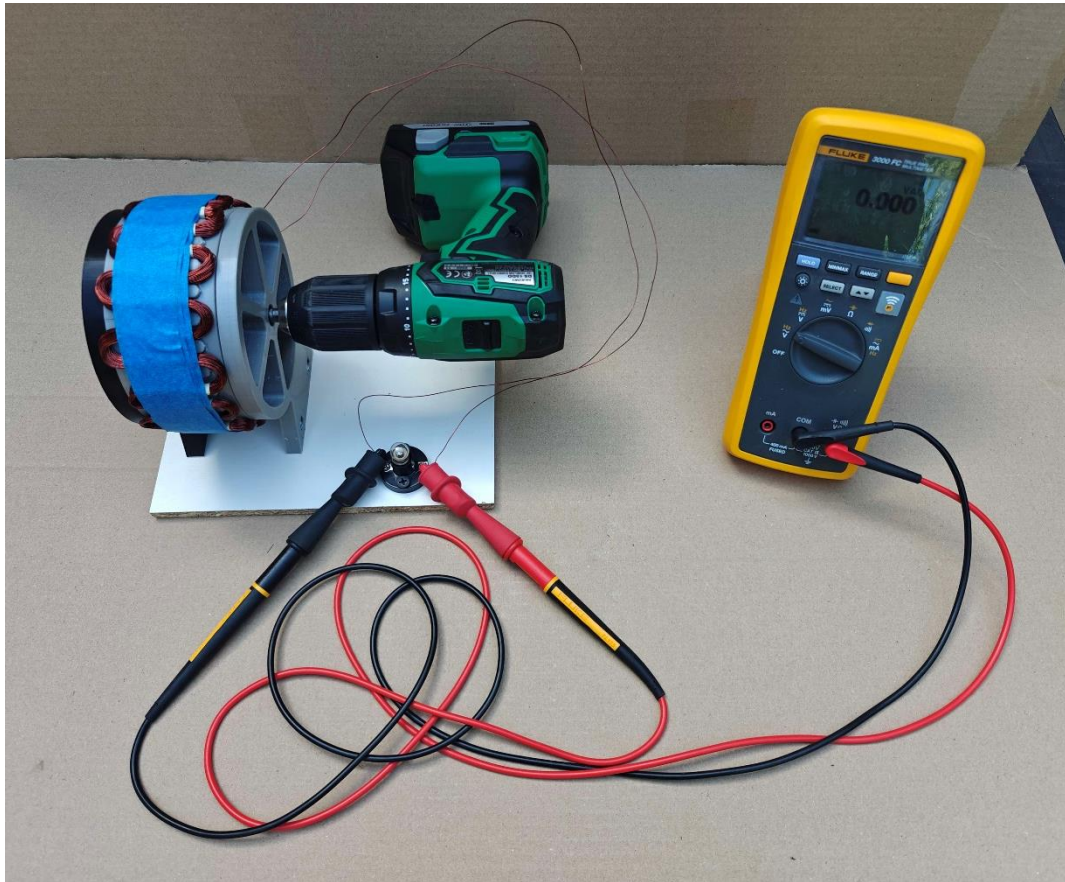


Figuur 37 Vijsjes op de as

Bron: Eigen werk

5 Metingen

5.1 Opstelling



Figuur 38 Testopstelling

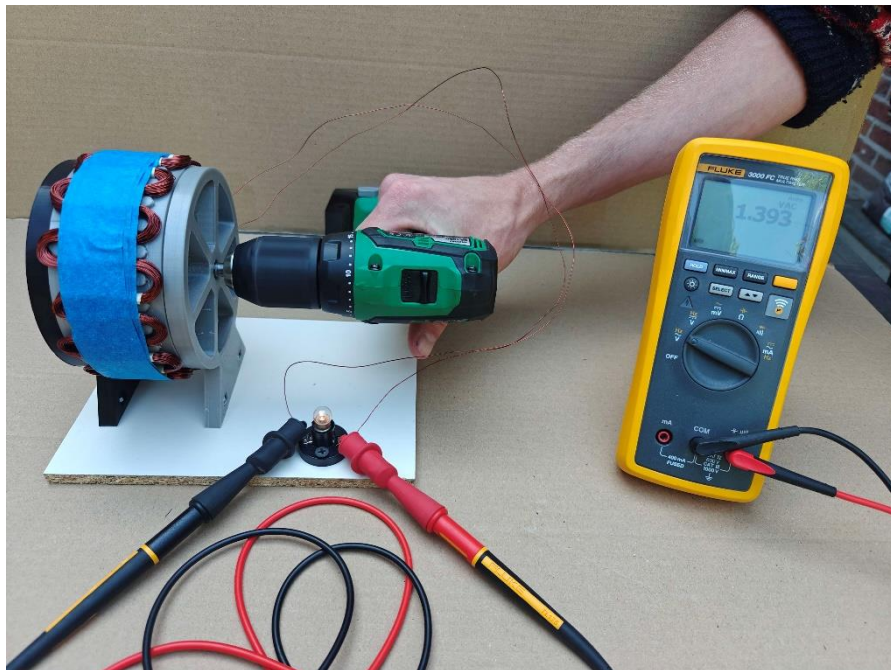
Bron: Eigen werk

De opbrengst van prototype 3 werd getest. Er is een testopstelling gemaakt waarin de metingen gedaan zijn met een multimeter om de opbrengst te bepalen.

In de eerste test werd de generator manueel tot draaien gebracht, door de as zelf vast te pakken en deze langzaam in de gewenste heen en weer richting te bewegen. Op deze manier kon er al snel vastgesteld worden dat de opbrengst veel te klein is om zinvolle metingen te doen.

In plaats hiervan is er geopteerd om een accuboormachine te gebruiken als aandrijving van de generator. Alle metingen zijn gebeurd op de trage stand van de machine. Dit zou een gelijk toerental moeten garanderen over de verschillende testen. Het toerental van de accuboormachine bedraagt 440 rotaties per minuut. (HiKOKI DS18DD handleiding (Nederlands - 188 pagina's), z.d.)

Er is een simpele testopstelling gemaakt. De generator wordt aan een multimeter gehangen om de stromen en spanningen te kunnen meten. Eerst werd de spanning in onbelaste toestand gemeten. Vervolgens werden verschillende weerstanden in het circuit toegevoegd om de opgewekte spanningen en stromen te meten. Er is eveneens een circuit met een lampje gemaakt. Deze geeft een heel mooie visualisatie van wat er aan het gebeuren is in het circuit.



Figuur 39 Brandend lampje

Bron: Eigen werk

In eerste instantie is de generator met zes wikkelingen getest. Hier kwam een onbelaste spanning van 0.5V uit. Dit gaf een eerste bevestiging dat het concept werkte. Vervolgens begon het wikkelen van de volgende lussen met meer wikkelingen.

Een van de lussen had 26 wikkelingen en de andere 50. Een eerste meting werd gedaan om de interne weerstanden van de lussen te bepalen. De lus van 26 wikkelingen heeft een weerstand van 4.2Ω en de lus van 50 wikkelingen heeft een weerstand van 9.1Ω . Deze lussen zijn vervolgens op de statorring aangebracht en deze zijn in de generator gemonteerd. De generator wordt aan het meetcircuit aangesloten. De accuboormachine wordt op de as gemonteerd en drijft de generator aan. Vervolgens worden al de gemeten spanningen en stromen genoteerd in een Excel document om daar conclusies uit te kunnen trekken. Dit is ook waar de reeds vermelde problemen met de luchtspleet tussen de lus van 50 en

de statorring opgemerkt werden aan de hand van onlogische meetresultaten. Eerst werd er geverifieerd dat alle metingen met de lus van 26 gedaan waren. Daarna zijn de beide lussen los gemaakt van hun statorringen. Nu kon de lus van 50 wikkelingen gemonteerd worden op de andere statorring en al de metingen met deze wikkeling konden herhaald worden. Nu kan er geconcludeerd worden dat de luchtspleet de boosdoener was voor de zeer lage opbrengst.

Op een later moment is de opstelling met het lampje gemaakt. Wanneer de generator nu manueel tot draaien gebracht wordt aan de snelheid die gebaseerd is op de golfperiode is het niet mogelijk om het lampje te doen branden. Wanneer de boormachine aan de opstelling gehangen wordt, kan het lampje wel branden. Des te sneller dat de generator aangedreven wordt, des te feller dat het lampje oplicht. Wanneer er teruggeblikt wordt op de formule die in hoofdstuk “2. Generator” aangehaald is, is dit logisch.

Hier werd er nog een belangrijke opmerking vastgesteld. De generator was verschillende keren verplaatst tussen deze en vorige metingen. In de tussentijd was de plakband los beginnen komen en hadden de wikkelingen zich een beetje verlegt. Eerst werd de spanning over het lampje gemeten. Wanneer wikkelingen terug stevig vastgeplakt werden en de generator aangedreven werd, ging het lampje nog feller oplichten. De volgende waarden zijn gemeten:

	$U_{\text{lamp}}(\text{V})$
1 ^e meting	0.97
Meting met strakke plakband	1.39

Tabel 1 Meting met lampje

Bron: Eigen werk

De gemeten spanning over het lampje is met ongeveer 43% gestegen wanneer de wikkelingen strakker tegen de statorring aanplakken.

Deze observatie heeft het duidelijk gemaakt hoe lastig het is om nauwkeurige resultaten te bekomen. Omdat er gewerkt wordt met manueel gewikkelde koperdraad op 3D geprinte onderdelen is er zeer weinig nauwkeurigheid. Geen van de bochten is dezelfde, elk stuk van de lus is uniek. Iedere keer dat een handeling met de generator gedaan wordt, veranderen de metingen opmerkelijk.

De generator heeft ook een zeer lage opbrengst. Dit betekent dat elk klein verschil een grote impact heeft. Een kleine afwijking leidt tot een groot verschil in de resultaten. Hiermee is het weinig zinvol om de exacte waarden in acht te houden.

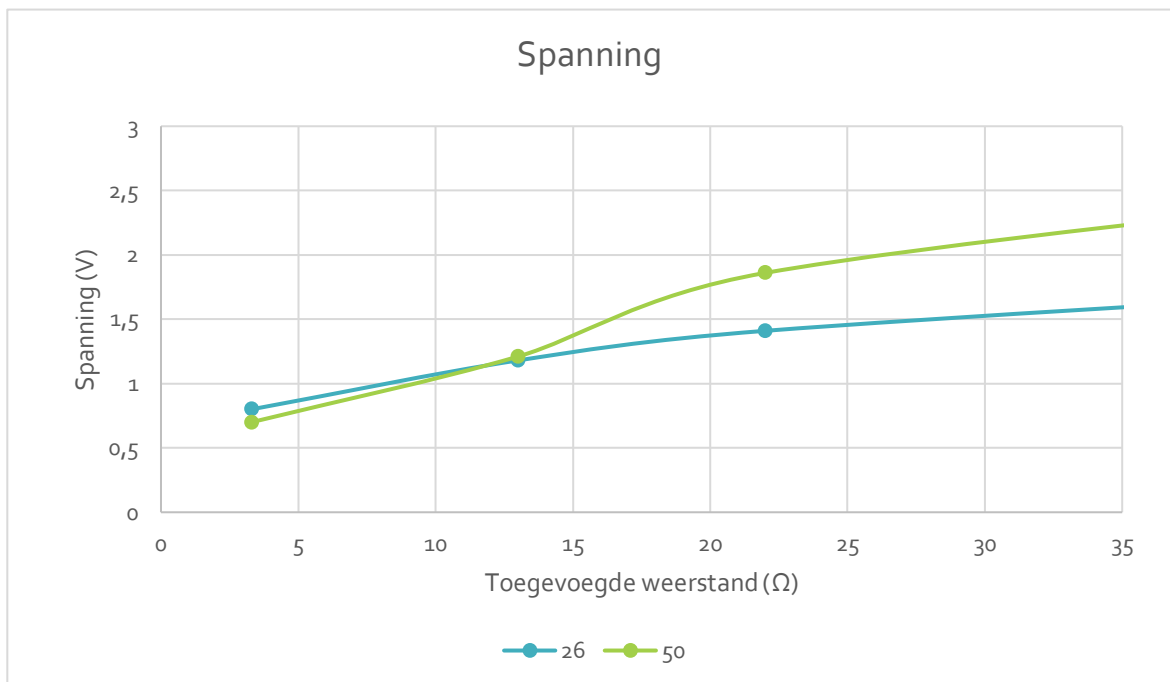
De onderstaande tabel geeft de gemeten waardes weer. Nogmaals wordt benadrukt dat de meetresultaten onnauwkeurig zijn. Om een beter overzicht te krijgen over de waarden wordt verwezen naar de grafieken op de volgende bladzijdes. De grafieken geven een duidelijker beeld over de algemene trend die zich voordoet in de verschillende metingen.

#wikkelingen	U(V)	I _{sc} (mA)	U _{22Ω} (V)	I _{22Ω} (mA)	U _{13Ω} (V)	I _{13Ω} (mA)	U _{3,3Ω} (V)	I _{3,3Ω} (mA)
26	1,79	323,5	1,41	60	1,18	117	0,81	192
50 met luchtspleet	1,53	146	1,1	47	0,82	77	0,56	114
50	2,60	250	1,86	80	1,21	141	0,71	196

Tabel 2 Metingen Generator

Bron: Eigen werk

5.2 Spanning



Figuur 40 Spanningsgrafiek

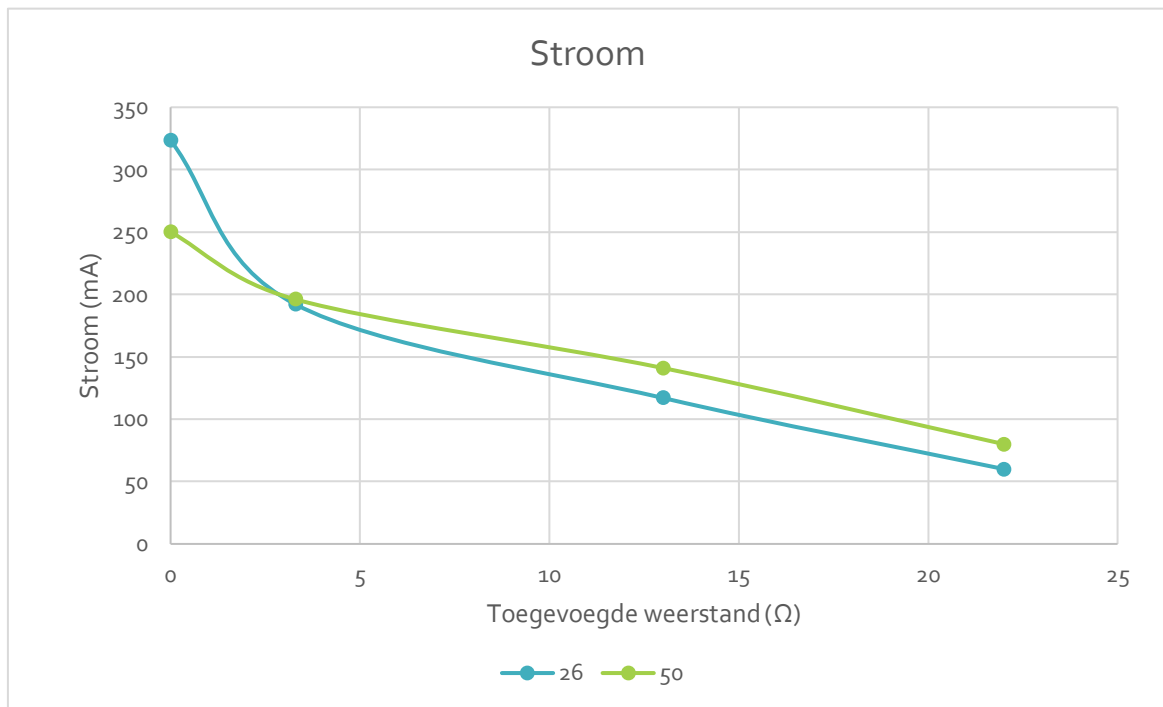
Bron: Eigen werk

De maximale geïnduceerde spanning van de generator wordt gemeten als deze onbelast is. Onbelast betekent dat de aangelegde weerstand oneindig groot is. Dit is moeilijk weer te geven op de grafiek.

Vervolgens worden weerstandjes toegevoegd in het meetcircuit om een belasting aan te leggen. Om de belasting op de generator te verhogen, wordt de grootte van de aangelegde weerstand verlaagd. Wanneer er een hogere belasting aangelegd wordt daalt de spanning gemeten over de belasting. Op dit moment kan de generator zijn spanning niet meer leveren.

Bij een kleine belasting of een hoge toegevoegde weerstand is er duidelijk te zien dat de lus met meerdere wikkelingen een hogere spanning opwekt.

5.3 Stroom



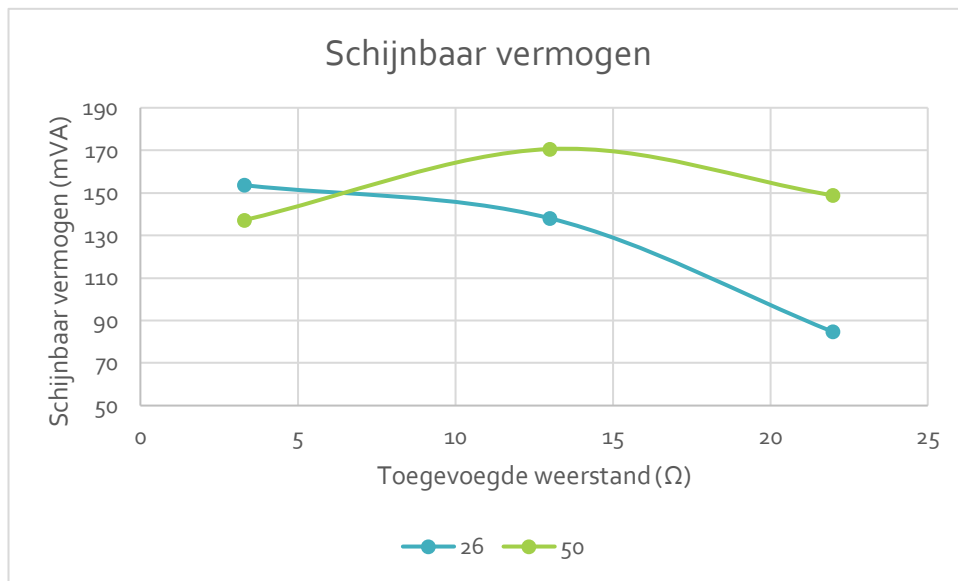
Figuur 41 Stroomgrafiek

Bron: Eigen werk

Wanneer de generator kortgesloten wordt, wordt de stroom bepaald door zijn interne weerstand. Hier is op te merken dat de lus van 26 wikkelingen een hogere kortsluitstroom heeft dan de lus van 50 wikkelingen. In eerste instantie is dit tegen de verwachtingen in. Wanneer naar de weerstand van de lussen en de spanningen in de vorige grafiek wordt gekeken, dan wordt opgemerkt dat de weerstand in de lus proportioneel sterker toeneemt dan de geïnduceerde spanning. Dit leidt tot een hogere kortsluitstroom bij een lager aantal wikkelingen.

Daarna worden stap voor stap weerstanden toegevoegd. Wanneer er meer weerstand geïntroduceerd wordt in het circuit, vermindert de invloed van de interne weerstand van de generator op de totale weerstand in het circuit. Tegelijkertijd kan uit de spanningsgrafiek afgeleid worden dat de spanning over de belasting meer verhoogt met een hoger aantal wikkelingen in een lus. Bij een voldoende hoge toegevoegde weerstand vloeit er door de lus van 50 wikkelingen nu wel een hogere stroom dan door de lus van 26 wikkelingen.

5.4 Vermogen



Figuur 42 Vermogensgrafiek

Bron: Eigen werk

In bovenstaande grafiek is het vermogen van beide lussen bij de verschillende belastingen geplot. Deze vermogens zijn bekomen door het vermenigvuldigen van de gemeten spanningen en stromen.

Wat opvalt in de grafiek van het vermogen is dat de trends elkaar tegen spreken. Bij een lagere belasting daalt het vermogen bij 26 wikkelingen terwijl het vermogen stijgt bij 50 wikkelingen. Wanneer de gemiddelde vermogens in acht genomen worden, wordt er opgemerkt dat de lus met meer wikkelingen een hoger vermogen kan leveren dan de lus met minder wikkelingen.

5.5 Bevindingen

De voornaamste opmerking uit de grafieken is dat er te veel factoren zijn die de nauwkeurigheid van de metingen van een hand gewikkelde, zelfgebouwde generator beïnvloeden om exacte waarden te bekomen.

Zoals verwacht valt vast te stellen dat de opbrengst stijgt naar mate dat de hoeveelheid wikkelingen toeneemt. Om de opbrengst verder te verbeteren kan er een lus gemaakt worden met nog meer wikkelingen. De complexiteit van het wikkelen van hoge aantallen wikkelingen maakt het zeer lastig om dit te testen. De buigingsradius van de toenemende doorsnede van de lus maakt het installeren op de stator praktisch moeilijk te realiseren.

6 Toekomstig onderzoek

Om de opbrengst van de generator nog te verhogen zijn er verschillende mogelijkheden.

Een mogelijkheid is het gebruik van sterkere permanente magneten of overstappen op regelbare elektromagneten. Dit biedt potentieel voor een verhoging van de magnetische fluxdichtheid en dus van de opgewekte spanning.

Een andere optie is om de effectieve lengte van de geleider te vergroten. Dit vergroot het snijvlak met het magnetisch veld, wat direct bijdraagt aan een hogere opbrengst.

Verliezen kunnen geminimaliseerd worden op verschillende wijzen.

Een voorbeeld daarvan is het gebruiken van materialen met een betere magnetische geleidbaarheid.

Een andere manier is het verminderen van de afstand tussen magneten en wikkelingen. Bijvoorbeeld door de wikkelingen aan de binnenzijde te plaatsen.

Er kan ook specifiek onderzoek gedaan worden naar de verliezen in de tandwieloverbrenging, in relatie tot de opbrengstwinst. Dit kan leiden tot beter afgewogen ontwerpbeslissingen.

7 Conclusie

In dit onderzoek zijn er verschillende prototypes van generatoren ontworpen met als doel een zo hoog mogelijk vermogen op te wekken bij een laag toerental en een heen en weer beweging. Hoewel deze ontwerpen qua poolparen en geleiderlengte geoptimaliseerd zijn om de limitatie in de rotatiesnelheid te overkomen, blijkt het in de praktijk niet realistisch om zelfstandig een goed werkende generator te bouwen.

Gedurende het project zijn er metingen uitgevoerd bij verschillende vermogens om de prestaties van de prototypes te evalueren. Uit deze metingen kwamen echter meerdere tekortkomingen naar voren, die de effectiviteit van de ontwerpen beperkten.

Ondanks deze beperkingen was het wel een leerrijk project over het ontwerpproces en het uitvoeren van technisch onderzoek. De opgedane kennis over elektromagnetische principes, het optimaliseren van generatorcomponenten en het analyseren van meetresultaten vormt een waardevolle basis voor toekomstige projecten binnen dit vakgebied.

8 Bibliografie

- 3D Model Threads in Inventor*. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2025, van <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Modeled-Threads-can-significantly-slow-Inventor.html>
- Bearing basics | SKF*. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2025, van <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics>
- Dvořák, L. (2019). Magnets and magnetic field around them: What can we learn from simple experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1286/1/012005>
- Hambley, A. R. (2019). *Electrical engineering: Principles and applications* (Seventh edition, global edition). Pearson.
- HiKOKI DS18DD handleiding (Nederlands—188 pagina's)*. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2025, van <https://www.handleidi.ng/hikoki/ds18dd/handleiding?p=176>
- Holst, B. W. (2023, maart 17). *3D Modeled Threads in Inventor*. <https://balderholst.com/how-to/3d-threads-in-inventor/>
- How Climate Change Impacts Renewable Energy – State of the Planet*. (2024, oktober 31). <https://news.climate.columbia.edu/2024/10/31/how-climate-change-impacts-affect-renewable-energy/>
- How To Improve Rough Overhangs on a 3D Print | Printing It 3D*. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2025, van <https://printingit3d.com/how-to-improve-rough-overhangs-on-3d-print/>
- Kuijpers, A. (2023). *Kan golfbeweging rechtstreeks een generator aandrijven om elektrische energie te produceren?* Antwerp Maritime Academy.

MakerVerse. (2024, december 2). How to Clean Up 3D Prints. *MakerVerse*.
<https://www.makerverse.com/resources/3d-printing/how-to-clean-up-3d-prints/>

OES | *What is Ocean Energy | Waves*. (z.d.). Geraadpleegd 23 mei 2025, van
<https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy/what-is-ocean-energy/waves/>

Robert Murray-Smith (Regisseur). (2023, maart 17). *1869 The Twisted Serpent A Generator For Everyone* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=QRY4dSEXD1o>

Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

Shewane, P. G., Singh, A., Gite, M., & Narkhede, A. (z.d.). An Overview of Neodymium Magnets over Normal Magnets for the Generation of Energy. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2(12).

TheGoofy. (z.d.). *600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor*. Instructables. Geraadpleegd 16 mei 2025, van
<https://www.instructables.com/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/>

Theodore Wildi. (2014). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* (6de dr.).

United Nations. (z.d.). *Renewable energy – powering a safer future*. United Nations; United Nations. Geraadpleegd 16 mei 2025, van
<https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy?>

Wang, C. (2024). Study on dynamic performance and optimal design for differential gear train in wind turbine gearbox. *Renewable Energy*, 221, 119776. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119776>

Weir, G., Chisholm, G., & Leveneur, J. (2020). THE MAGNETIC FIELD ABOUT A THREE-DIMENSIONAL BLOCK NEODYMIUM MAGNET. *The ANZIAM Journal*, 62(4), 386-405. <https://doi.org/10.1017/S1446181120000097>

What Are Wire Enamels | Electrical Insulation | Axalta Energy Solutions. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2025, van https://www.axalta.com/electricalinsulation_global/en_US/wire-enamels/what-are-wire-enamels.html