

Ontwerpen van een generator voor het omzetten van golfenergie naar elektrische energie

Ben SARENS

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Scheepswerktuigkunde
aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: Kapt. Dr. W. JACOBS

Academiejaar 2024-2025

Woord vooraf

Deze thesis gaat over het ontwerpen van een elektrische generator voor het opwekken van elektriciteit door middel van de mechanische rotatie gecreëerd door een golfenergieomzetter. Deze generator moet bovendien in staat zijn om aan een laag toerental een klein vermogen op te wekken.

Dit onderwerp sprak mij aan vanwege de uitdaging die het bood, de praktische kant van het realiseren van de generator zelf en de terugkoppeling naar de leerstof van de cursus elektrotechniek die ik volgde tijdens mijn loopbaan als student van de Antwerp Maritime Academy. Verder is het gebruik van golfenergie naar mijn mening een interessante alternatieve manier om groene energie op te wekken. Groene energie is een belangrijke problematiek in de huidige maritieme wereld vanwege de klimaatcrisis. Op dit ogenblik is er een grote interesse voor alternatieve brandstoffen in de scheepvaart en gebeurt er veel onderzoek naar. De kans om hieraan bij te dragen sprak mij dan ook zeer hard aan.

Natuurlijk heb ik dit onderzoek niet alleen ondernomen. Graag zou ik mijn promotor Kapt. Dr. Werner Jacobs bedanken voor zijn ondersteuning tijdens de uitvoering van deze thesis en mij de kans te geven om te werken aan dit onderzoek. Ook zou ik graag de heer Peter Bueken bedanken voor het aanbieden van de nodige apparatuur en zijn waardevolle feedback bij het ontwerpen van de generator zelf. Verder bedank ik ook mijn leerkrachten de heren Rik FLoren, Marc Sterkens en Gijs Vanden Bogaerde om mij doorheen mijn loopbaan de nodige kennis op vlak van elektrotechniek bij te brengen om dit onderzoek tot een goed einde te kunnen brengen.

Tenslotte zou ik graag mijn ouders willen bedanken om mij de kans te geven deze opleiding te volgen en voor hun onvoorwaardelijke steun. Niet alleen tijdens mijn opleiding, maar ook tijdens het uitvoeren van dit onderzoek.

Samenvatting

Deze thesis gaat over het ontwerpen van een generator voor het omzetten van golfenergie naar elektrisch vermogen in de context van een golfenergieomzetter. In de verschillende hoofdstukken worden de ondernomen stappen besproken. Het ontwerpen van de generator begon met een literatuurstudie om te bepalen dat er gewerkt zou worden met een 3-fasige dubbele rotor axiale flux generator. Later werd omwille van praktische overwegingen besloten om over te stappen naar een 1-fasig model met 1 grote spoel. Uit de eerste resultaten bleek dat de generator geen spanning produceerde. Het model werd aangepast om de luchtspleet te verkleinen en ook het aantal magneten werd aangepast om uiteindelijk tot een werkend model te komen. Zo werd er van een dubbele rotor overgestapt naar enkelvoudige model en werd het aantal magneten verlaagd van 48 naar 36. Omwille van de noodgedwongen aanpassingen kon de eindversie van de generator het gewenste vermogen niet behalen. Het onderzoek wordt afgesloten met een kritische benadering van de ontworpen generator en de aandachtspunten waar rekening mee gehouden moet worden naar de toekomst toe. Zo is het belangrijk om een goede verhouding te hebben tussen spoelen en magneten en de luchtspleet zo klein en uniform mogelijk te houden.

Abstract

Designing a generator for converting wave energy to electrical energy

This thesis is about designing a generator for converting wave energy to electrical power in the context of a wave energy converter. The various chapters discuss the steps taken. The design of the generator began with a literature review to determine that a 3-phase double rotor axial flux generator would be used. Later, for practical reasons, it was decided to switch to a single-phase model with 1 large coil. Initial results showed that the generator did not produce voltage. The model was modified to reduce the air gap and the number of magnets was also adjusted to finally arrive at a working model. Thus, a double rotor was changed to a single model and the number of magnets was reduced from 48 to 36. Because of the necessary modifications, the final version of the generator could not achieve the desired power output. The study concludes with a critical approach to the designed generator and the concerns that need to be taken into account towards the future. For instance, it is important to have a good ratio of coils to magnets and to keep the air gap as small and uniform as possible

Inhoudstafel

Lijst van figuren.....	VI
Lijst van tabellen	VIII
Lijst van afkortingen	IX
Lijst van symbolen	X
Inleiding	1
1. Theoretisch onderzoek generator.....	2
1.1 Werkingsprincipe Elektrische Generator	2
1.2 Bekomen voldoende vermogen	3
1.3 De Generator	4
1.3.1 Algemene Lay-out	5
1.3.2 Cogging-Koppel	6
1.3.3 Magneten	7
1.3.4 Spoelen	9
2. Bepalen generator specificaties	11
2.1.1 Ontwerpvoorwaarden	11
2.2 Berekeningen.....	12
2.2.1 Polen.....	12
2.2.2 Spoelen	13
2.2.3 Verwacht vermogen.....	16
3. Teken van de generator	21
3.1 Rotor tekenen	21
3.2 Stator tekenen	25
3.2.1 Nieuwe stator dimensies en generator gegevens	27
3.2.2 Verder ontwerp stator	28
3.3 Steunpalen tekenen	32
3.4 Herontwerpen stator	34

3.4.1	Ontwerpen bovenplaat stator.....	34
3.4.2	Ontwerpen bodemplaat stator	38
3.4.3	Uiteindelijk model	41
3.4.3.1	Nieuw vermogen.....	41
3.4.3.1	Uiteindelijk stator model	42
4.	Fabriceren Generator.....	43
4.1	Spoelen wikkelen	43
4.1.1	Serpentine Coil	44
4.2	Magneten bevestigen	45
4.3	Nieuwe vermogensberekening	46
4.4	Constructie van de generator	47
5.	Testen van de generator	49
5.1	Test oorspronkelijke constructie	49
5.2	Test enkelvoudige generator	49
5.3	Test verbeterde wikkelingen.....	50
5.4	Verder verkleinde luchtspleet	51
5.5	Test met verlaagd aantal magneten	52
6.	Verder onderzoek	55
6.1	Gebruikt materiaal	55
6.2	Spoel en wikkelingen.....	56
6.3	Aantal magneten.....	56
6.4	Nieuw ontwerp.....	57
	Conclusie.....	59
	Bibliografie	61
	Lijst van bijlagen	66

Lijst van figuren

Figuur 1: Werkingsprincipe generator	3
Figuur 2: Drawing of AFPMG.....	4
Figuur 3: AFPMG Lay-out's	5
Figuur 4: Diagram of Rotor Skewing	6
Figuur 5: Kernloze AFPMG.....	7
Figuur 6: Neodymium magneet	9
Figuur 7: Magnetische veldlijnen radiaal vs. axiaal.....	9
Figuur 8: Serpentine Coils.....	10
Figuur 9: Teken en roto rschijf.....	22
Figuur 10: Overlappen indentaties.....	22
Figuur 11: Uiteenplaatsen indentaties	23
Figuur 12: Uitplannen magneten	23
Figuur 13: Indentaties voor magneten.....	24
Figuur 14: Finaal ontwerp roto rschijf	24
Figuur 15: Uitzetten stato rslo t.....	25
Figuur 16: Overlappen stato rslo ten	26
Figuur 17: Versmalde stato rslo ten.....	26
Figuur 18: Uitteken en stato r.....	29
Figuur 19: Uitteken en stato rslo ten	29
Figuur 20: Verhogen stato rslo ten	30
Figuur 21: Bovenkant stato r	30
Figuur 22: Stat o r model	31
Figuur 23: Centrum gat.....	31
Figuur 24: Teken en steunpalen	32
Figuur 25: Versteving steunpalen	33
Figuur 26: Finaal ontwerp Stat o r.....	33
Figuur 27 Herontwerp Stat o r	34
Figuur 28: Afronden basislatten	35
Figuur 29: Stat o rbasis teken en.....	35
Figuur 30: Teken en hulplijnen	36
Figuur 31: Teken en rechthoeken	36
Figuur 32: "Extrude" van tekening	37

Figuur 33: Plannen cirkel	37
Figuur 34: Eindresultaat bovenplaat stator.....	38
Figuur 35: Vertrekpunt bodemplaat stator	39
Figuur 36: Extruden cirkels.....	39
Figuur 37: Verstevinging basis.....	40
Figuur 38: Bodemplaat stator.....	40
Figuur 39: Houten Statormodel	42
Figuur 40: Spoel voor stator	43
Figuur 41: Spoel wikkel constructie	44
Figuur 42: Plakken van de stator en inbrengen van de spoel	45
Figuur 43: Afgewerkte rotorconstructie	45
Figuur 44: Bevestiging van de rotor	47
Figuur 45: Kogellagers	48
Figuur 46: Vergroten centergat stator	48
Figuur 47: Constructie van de generator	48
Figuur 48: SAFPM lay-out.....	50
Figuur 49: Test met verbeterde wikkeling	51
Figuur 50: Testopstelling met verkleinde luchtspleet	52
Figuur 51: Testopstelling met 36 magneten en verkleinde spoel	53
Figuur 52: Belasting van de generator	54
Figuur 53: Toekomstig model stator.....	58
Figuur 54: Toekomstig model statorsteun	58

Lijst van tabellen

Tabel 1: Magnetische eigenschappen van verschillende magneten.....	8
Tabel 2: Ontwerp voorwaarden DRAFPM-Generator	11
Tabel 3: Verwachte generator specificaties.....	20
Tabel 4: Resultaten generatortest.....	54

Lijst van afkortingen

IMO	International Maritime Organisation
EMF	Electro Motive Force
PM	Permanente Magneet
AFPMG	Axial Flux Permanent Magnet Generator
SAFPM	Single sided Axial Flux Permanent Magne
DRAFPM	Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet
DSAFPM	Double Stator Axial Flux Permanent Magnet
MAFPM	Multistage Axial Flux Permanent Magnet
Alnico	Aluminium-Nikkel-Kobalt
Alcomn	Aluminium-Mangaan-Kobalt
Neodymium	Neodymium-Ijzer-Boron
Samco	Samarium-Kobalt
FBR	Full Bridge Rectifier

Lijst van symbolen

ε	EMF
N	Aantal wikkelingen
$d\Phi$	Verandering in magnetische flux
B	Magnetische Veldsterkte
dt	Verandering in de tijd
ω	Elektrische rotatiesnelheid
A	Oppervlakte spoelen
B_r	Remanente fluxdichtheid
H_c	Dwingende magnetische veldsterkte
$BH_{\max}$	Maximale energiedichtheid
$T_{\max}$	Maximale werkingstemperatuur
V_L	Lijnspanning
V_f	Fasespanning
α	Pole arc to pole pitch ratio
τ	Pole pitch
dR	Diameter van de rotor
p	Aantal magneten
b_M	Magneet breedte
Q	Aantal spoelen
w	Breedte spoelen
S	Oppervlakte spoelen
ϵ	ratio tussen EMF
V_{1l-N}	Spanning tussen lijn 1 en de neuter

ω_m ;	Mechanische rotatiesnelheid
k_{w1}	Windingsfactor
Φ_m	Flux linkage amplitude
B_{mg}	Fluxdichtheid over de luchtspleet
δ	Breedte van de luchtspleet
μ_{rPM}	Relatieve permeabiliteit van de permanente magneet
h_{PM}	Hoogte van de permanente magneet
K_B	Flux distributiefactor
K_{PM}	Magnet fill factor
t_M	Dikte van de spoel
t_{LS}	Dikte van de luchtspleet van de spoel
h_{ls}	Hoogte luchtspleet van de spoel
A_c	Oppervlakte doorsnede van de spoel
D_o	Buitendiameter van de generator
P	Vermogensoutput in Watt
K_D	Diameterfactor
D_i	Binnendiameter generator n_s de rotatiesnelheid
A_m	Lineaire stroomdichtheid
J	Stroomdichtheid van de geleider
A_s	Oppervlakte van de spoelen per fase
D_m	gemiddelde diameter per spoel
η	efficiëntie
$\cos\varphi$	arbeidsfactor
I	Stroom
Z	Impedantie
R	Resistieve component

X	Inductieve component
ρ	Weerstand van koper
l	Lengte van de draad
A_w	Oppervlakte van de draad
F	Frequentie
L	Inductie van de spoelen
E	Spanning

Inleiding

Voor dit eindwerk werd een studie verricht naar het ontwerpen van een generator voor het opwekken van vermogen aan de hand van golfenergie. In deze tijd is het ontwikkelen van alternatieve energiebronnen, om weg te kunnen stappen van de klassieke fossiele brandstoffen een zeer belangrijk onderwerp dat betrekking heeft op veel sectoren waaronder ook de maritieme. Zo wil de “*International Maritime Organisation*” (IMO) tegen 2050 een netto-nul uitstoot van broeikasgassen. Een mogelijke alternatieve bron van energie zou golfenergie kunnen zijn. Golven in de oceaan bevatten een immense hoeveelheid aan energie, voldoende om grote schepen van over de 5000 GT te doen rollen. Het idee zou dan ook zijn om deze energie die voorlopig nog verloren gaat, te benutten voor het opwekken van elektrisch vermogen om zo de nood aan generatoren, die klassieke brandstoffen gebruiken te verminderen en eventueel naar de toekomst toe compleet te vervangen. Voor het omzetten van deze energie is uiteraard een apparaat nodig om deze beweging van golven om te zetten naar elektrische energie, een golfenergieomzetter. Er zijn verschillende types van golfenergieomzetters, elk met hun eigen manier om de energie van een golf om te zetten naar een elektrisch vermogen. Voor het bekomen van elektrische energie is een elektrische generator noodzakelijk, dit is een cruciaal onderdeel van de golfenergieomzetter. Deze thesis focust zich op deze generator die nodig is voor het opwekken van elektrische energie met behulp van mechanische energie. Om een zo goed mogelijke generator te ontwerpen zal eerst een theoretisch onderzoek uitgevoerd worden om te bepalen welk type generator het beste is, rekening houdende met de ontwerpparameters zoals een laag toerental. Verder zullen er berekeningen gedaan worden om een schatting te bekomen van het op te wekken vermogen door de generator. Ook het ontwerpen van de generator zelf zal in detail besproken worden, gevolgd door de uiteindelijke constructie. Vervolgens zullen de verschillende testen en de aanpassingen die werden doorgevoerd voor het verder verbeteren van het origineel model besproken worden. Dit wordt gevolgd door een conclusie waarin de uiteindelijke resultaten en de toekomst van dit onderzoek besproken worden. Elk van deze onderdelen krijgt een afzonderlijk hoofdstuk, waar in detail de ondernomen stappen en argumentaties, die hebben geleid tot het uiteindelijk ontwerp van de generator voor de golfenergieomzetter, worden besproken.

1. Theoretisch onderzoek generator

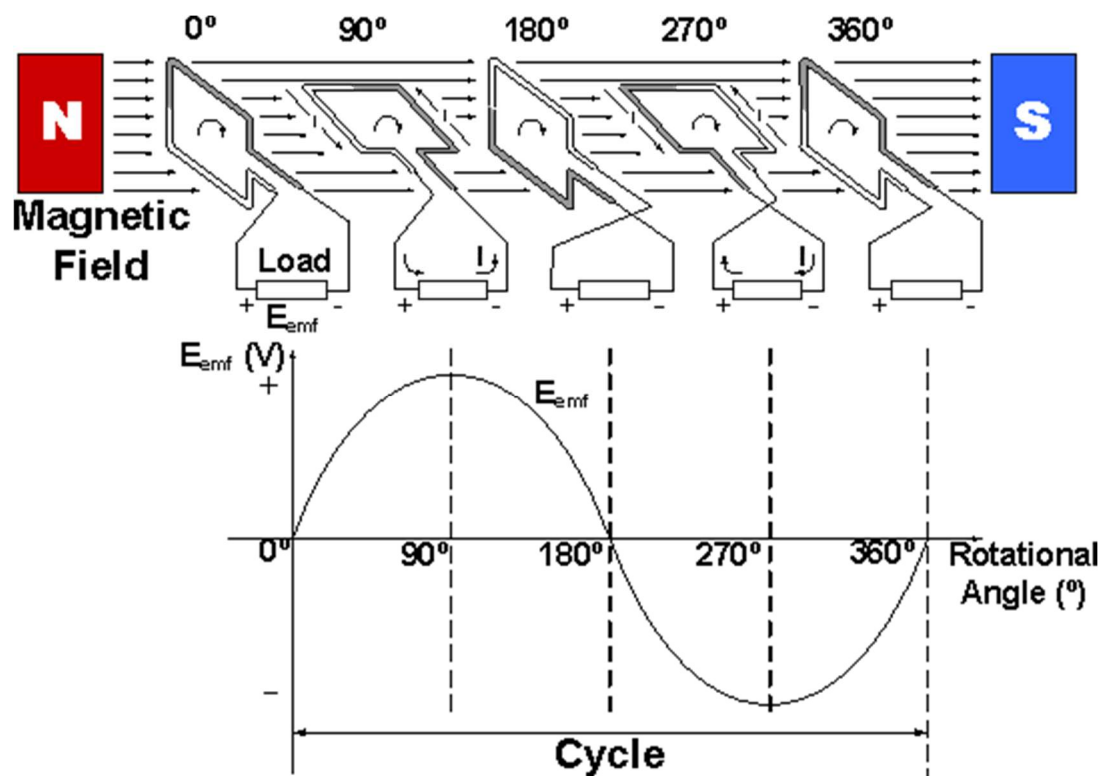
De probleemstelling was om een elektrische generator te ontwerpen die voldoende vermogen kan opwekken aan een relatief lage omwentelingssnelheid. Hiervoor moet gekeken worden naar de werking en de verschillende karakteristieken van een elektrische generator om de meest voordelige te kunnen bepalen en vervolgens hiervan een afweging te maken voor het ontwerp van de generator. Er werd onderzoek gedaan naar verschillende generatortypes en materialen voor het construeren hiervan.

1.1 Werkingsprincipe Elektrische Generator

Het doel van een elektrische generator is om mechanische energie om te zetten naar elektrische energie. Het bereikt dit met behulp van inductie, een natuurkundig principe beschreven in de wet van Faraday: $\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$. Deze zegt dat een “*Electro Motive Force*” (*EMF*) opgewekt zal worden door de verandering in flux van een magnetisch veld in functie van de tijd. Bij het roteren van de generator zullen de spoelen in de stator als het ware snijden door de magnetische veldlijnen van het roterend magnetisch veld opgewekt in de rotor, permanente magneet (PM) of elektromagneten. Dit zorgt vervolgens voor een verandering in flux wat een *EMF* induceert in de spoelen van de stator, wat zal zorgen voor een tegengesteld elektrisch veld in de spoel aan de veranderingen in het elektrisch veld van de rotor. Om deze *EMF* in stand te houden zal er een elektrische spanning geïnduceerd worden in de spoelen van de stator. De hierbij opgewekte wisselspanning is de output van de generator en is afhankelijk van:

- de magnetische veldsterkte B
- rotatiesnelheid ω
- aantal spoelen N en
- de oppervlakte van de spoelen A .

Op onderstaande figuur 1 valt te zien hoe de gegenereerde spanning afhankelijk is van de positie van de magneten ten opzichte van de spoelen op een bepaald punt in de tijd.



Figuur 1: Werkingsprincipe generator, Bron:Debasish, (n.d.)

1.2 Bekomen voldoende vermogen

Om een hogere vermogensoutput te bekomen moet rekening gehouden worden met een aantal ontwerpeigenschappen van de generatoren. Bij de vorige opstelling bleek dat de limiterende factor de rotatiesnelheid was waardoor er niet genoeg vermogen kon opgewekt worden door een te groot tijdsinterval waarin de verandering in magnetische flux plaatsvond. Voor het ontwerp van de nieuwe generator zal dus gekeken moeten worden naar manieren om deze limitatie te omzeilen. Aangezien zoals hierboven vermeld het opgewekte vermogen van de generator afhankelijk is van de verandering van de magnetische flux in functie van de tijd, Wet van Faraday moet er dus zo veel mogelijk verandering gebeuren in een zo kort mogelijk tijdsinterval.

Een manier om dit te bekomen is het verhogen van de verandering in magnetische flux, de $d\Phi B$ component in de wet van Faraday. Dit kan men bekomen door het vergroten van de veldsterkte door gebruik te maken van sterkere magneten of door het aantal poolparen te verhogen en zo een groter magnetisch veld te krijgen.

Een andere manier is het verkleinen van de dt component in de wet van Faraday. Dit is mogelijk door het vergroten van de buitendiameter om met een kleine rotorverdraaiing een grotere fluxverandering teweeg te brengen wat het tijdsinterval om eenzelfde fluxverandering te bekomen dus verkleint. De limiet die hierbij optreedt is de maximale fysieke diameter van 33,5 cm die de generator kan bedragen om nog steeds in de proefopstelling passen.

Een ander probleem dat vaak optreedt bij generatoren die draaien aan lage toeren is het zogeheten “cogging”-koppel waardoor koppelrimpel en onregelmatige snelheden ontstaan. Het

wordt veroorzaakt door de interactie tussen de permanente magneten en de statorsloten en is afhankelijk van de positie, het aantal poolparen en statortanden en de luchtspleet tussen rotor en stator. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 1.3.2 Cogging-Koppel waar er gekeken zal worden naar manieren om dit nadelige effect zo veel mogelijk te beperken.

Voor het ontwerpen van een generator, die voldoende vermogen kan leveren werd vooral inspiratie gehaald uit de generatoren die men gebruikt in windturbines. Deze draaien namelijk ook rond aan lagere toerentallen, zo een 20–40 *RPM* (Soderlund et al., 1996) en hier worden dus generatoren gebruikt in het geval van “*direct drive*” die hoge vermogens kunnen opwekken aan lagere toerentallen.

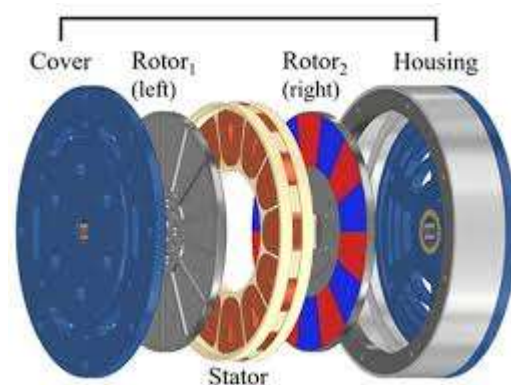
1.3 De Generator

Voor de generator zelf werd geopteerd voor een “*Axial Flux Permanent Magnet Generator*” (AFPMG). Bij dit type generatoren lopen de magnetische veldlijnen, zoals de naam het zegt, axiaal en evenwijdig aan de as door de loodrechte rotatie van de spoelen ten opzichte van de as. Deze generator is een populaire keuze voor DIY-windturbines vanwege hun hogere vermogensdichtheid in vergelijking met hun klassieke radiale tegenhangers door hun compactere vorm (Pop et al., 2013).

Een ander voordeel is dat er door de lengte van de generator en door de axiale rotatie van het magnetisch veld geen verlies in magnetische veldsterkte optreedt bij het opwekken van vermogen. Dit laat toe om een compacte generator zonder vermogensverlies te ontwerpen.

Over het algemeen worden AFPMG's als de gunstigere keuze beschouwd vanwege hun vele voordelen zoals: hogere fluxdichtheid, hoge geïnduceerde *EMF* en stroom, laag “*cogging*”-koppel, minder volume, minder verlies en hoog rendement (Sitheswaran et al., 2021).

Een nadeel echter bij de AFPMG is het correct balanceren van stator en rotor om de belasting op de as te verminderen en magnetische aantrekkingskrachten te compenseren, dit kan verholpen worden door gebruik te maken van een dubbele rotor single stator ontwerp. Een AFPMG is te zien op figuur 2. In volgende onderdelen zal het ontwerp van de generator in meer detail besproken worden.



Figuur 2: Drawing of AFPMG, Bron: Lee et al., (2017)

1.3.1 Algemene Lay-out

Er wordt dus gekozen voor een AFPMG vanwege hun compactheid en hoge vermogensdichtheid. Bijkomend moet er een keuze gemaakt worden uit 4 verschillende types, hieronder opgesomd: (Rotorjev et al., 2017). Een visualisatie van de verschillende types is te zien in figuur 3.

1. *Single-sided axial*

flux (SAFPM)

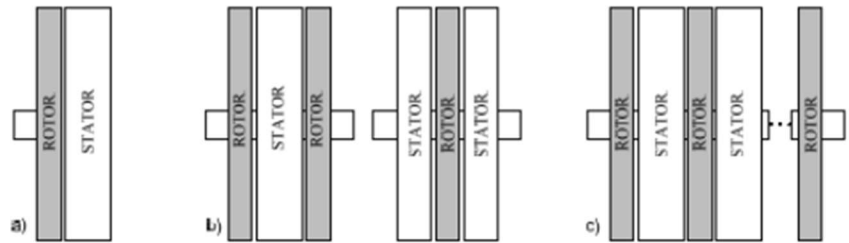
2. *Double-rotor axial*

flux (DRAFPM)

3. *Double-stator axial*

flux (DSAFPM)

4. *Multistage axial flux (MAFPM)*



Figuur 3: AFPMG Lay-out's, Bron: Rotorjev et al., (2017)

Het gebruik van een SAFPM wordt ondanks de eenvoudige constructie afgeraden. Dit vanwege de extra maatregelen die genomen moeten worden, zoals het installeren van een speciale “thrust”-bearing of het installeren van een extra gelamineerde “dummy stator/rotor” om de ongecompenseerde magnetische aantrekkingskrachten tussen stator en rotor te balanceren. Het doet dit door een tegengesteld magnetisch veld op te wekken met behulp van hysteresis en eddy stromen in de extra stator. Deze kan namelijk zorgen voor axiale verschuiving wat een nadelig effect heeft op de efficiëntie van de generator (Yicheng Chen et al., 2004).

De MAFPM is dan weer zeer ingewikkeld om te maken en brengt een hogere materiaalkost met zich mee vanwege de dubbele uitvoering van stators en rotors. Voor de rest biedt deze structuur ook geen extra voordelen tenzij voor echt hoge vermogens vanwege de hoge vermogensdichtheid en koppeldichtheid (Torkaman et al., 2019).

Een DAFPM biedt het meeste voordelen in verband met vermogensdichtheid, koppeldichtheid, efficiency en een lage hoeveelheid actieve materialen (Faiz et al., 2020).

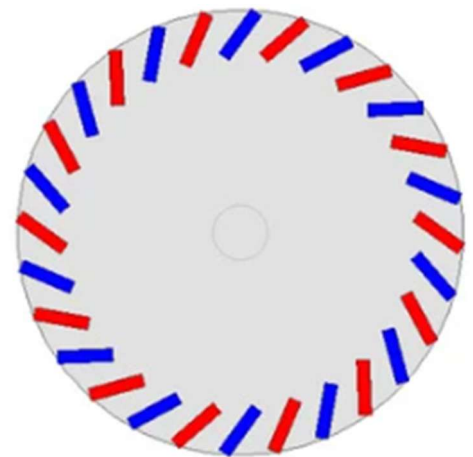
De vraag is nu of er gekozen moet worden voor een DSAFPM of een DRAFPM. Studies (Alsuwian et al., 2024; Faiz et al., 2020; Yicheng Chen et al., 2004), die deze met elkaar vergelijken kwamen tot de conclusie dat het gebruik van een DRAFPM voordeliger is omdat men hierbij een volle kernloze topologie kan realiseren. Andere voordelen zijn: eenvoudige constructie, uitgebalanceerde aantrekkingskracht tussen rotoren en stator, hogere koppeldichtheid, minder “cogging”-koppel, tolereerbare koppelrimpel en hoge efficiëntie (Habib et al., 2020). Een DSAFPM scoort dan weer beter op vlak van koeling (Alsuwian et al., 2024), maar dit weegt niet op ten opzichte van de andere voordelen. Omwille van de vele voordelen en de nog relatief eenvoudige constructie wordt dus besloten om een DRAFPM Generator te ontwerpen voor de golfenergie-omzetter.

1.3.2 Cogging-Koppel

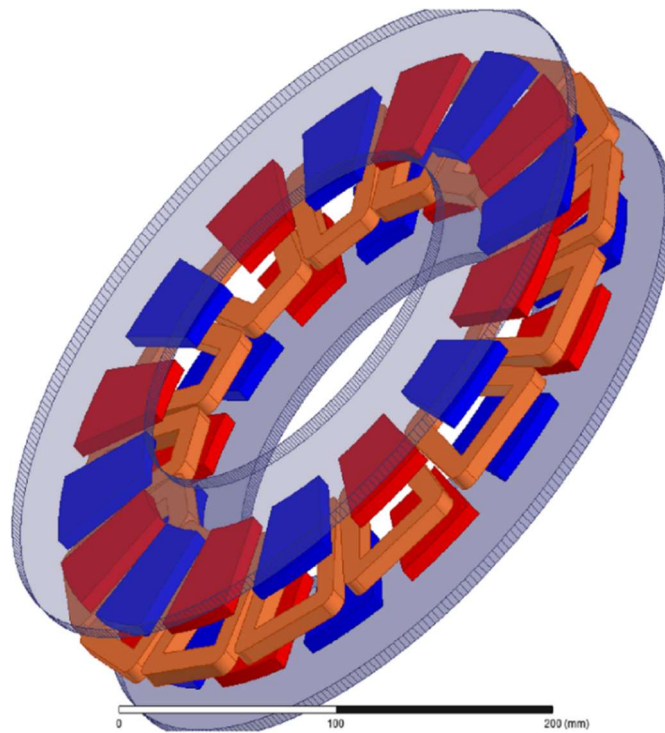
“Cogging”-koppel is een optredend probleem bij generatoren en komt vooral voor bij de lagere toerentallen. Zoals eerder vermeld ontstaat het door de interactie tussen de permanente magneten en statorsloten van de generator, meer specifiek de interactie tussen de magnetische velden van spoelen en permanente magneten. Wanneer een permanente magneet perfect tegenover een statorslot staat is de magnetische aantrekkingskracht het sterkste wat ervoor zorgt dat er meer koppel nodig is om uit deze positie te geraken. Het optreden van “Cogging” heeft hierdoor dus een remmend effect op het draaien van de generator en kan zelfs het starten bemoeilijken. Tijdens het draaien van de generator kan dit fenomeen ook zorgen voor onnodige variaties in snelheid en vibraties wat leidt tot een onregelmatige vermogensoutput. Een mogelijke manier om dit fenomeen te minimaliseren is het toepassen van “*stator skewing*”, het schuinplaatsen van de stator wat leidt tot een non-uniforme luchtspleet. Het schuinplaatsen van de stator zorgt voor een graduele oplijning van de magnetische velden en voorkomt hierdoor harmonisatie. De stator perfect kantelen zou dus kunnen zorgen voor het volledig elimineren van “cogging”(Muljadi & Green, 2002). Echter is dit niet de meest simpele oplossing en moeilijk om te produceren.

Een makkelijker alternatief is “*rotor skewing*” oftewel het schuin plaatsen van de magneten in het rotorvlak zoals te zien op figuur 4. Hiermee kan men hetzelfde effect bekomen van een graduele opbouw van de aantrekkingskrachten en perfecte harmonisatie vermijden. Deze techniek is echter vorm afhankelijk, deze is bijvoorbeeld niet toepasbaar op cirkelvormige magneten. Ook hierbij moet de positie van de magneten en de hoek waarmee ze gekanteld worden exact berekend worden om deze oplossing volledig tot zijn recht te laten komen (Radwan-Pragłowska et al., 2020).

Een andere mogelijkheid is het ontwerpen van een zogeheten “*coreless*” AFPMG. Dit type generator heeft geen ijzeren statorkern, de plaats waar de spoelen zich bevinden, waardoor er geen aantrekking tussen de statorsloten en de magneten kan plaatsvinden. Doordat er geen ijzer is of ander geleidend materiaal kan er dus geen magnetische aantrekkingskracht plaatsvinden en wordt “*cogging*” volledig vermeden (Ani et al., 2012). Het gebruik van deze oplossing zou ook geen nadelige effecten hebben voor onze toepassing aangezien dit een veel gebruikte oplossing is voor lage en medium vermogen generators (Pranjić & Vrtič, 2024). Daarom lijkt het de beste oplossing om voor een kernloze AFPMG te gaan, zoals te zien op figuur 5.



Figuur 4: Diagram of Rotor Skewing, Bron: Radwan-Pragłowska et al., (2020)



Figuur 5: Kernloze AFPMG, Bron: Zhang et al., (2021)

1.3.3 Magneten

Een essentieel onderdeel van de AFPMG zijn uiteraard de magneten op de rotor. Daarom is het belangrijk om te kiezen voor magneten uit een goed magnetisch materiaal voor het bekomen van een zo sterk mogelijk magnetisch veld voor het opwekken van hogere vermogens. Er bestaan verschillende magnetische materialen die gebruikt worden bij permanente magneetgeneratoren.

De populairste zijn: Alnico (Aluminium-Nikkel-Kobalt), Ferriet (IJzer), Alcomn (Aluminium-Mangaan-Kobalt) Neodymium (Neodymium-IJzer-Boron) en Samco (Samarium-Kobalt). Deze laatste 2 zijn zeldzame aardmaterialen en magnetisch gezien het sterkst. Het gebruiken van ferriet voor de magneten is niet de meest ideale optie. Ze beschikken over het zwakste magnetisch veld en worden vooral toegepast in situaties waar een hoge magnetische prestatie niet van toepassing is vanwege hun lage productiekost. In onderstaande tabel 1 wordt een vergelijking gemaakt tussen deze 5 materialen (Soderlund et al., 1996).

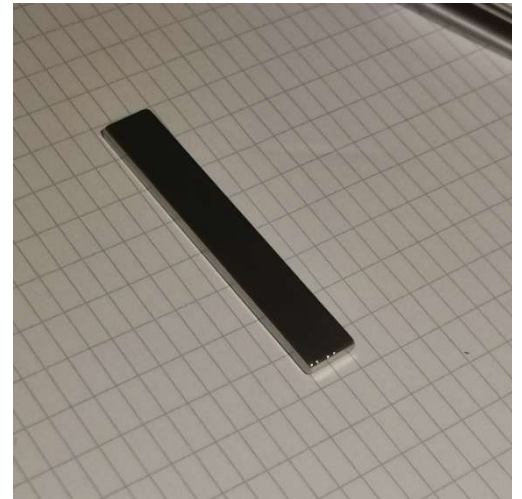
Tabel 1: Magnetische eigenschappen van verschillende magneten, Bron: Soderlund et al., (1996)

Material	$B_r(T)$	$H_c(kA/m)$	$BH_{max}(kJ/m^3)$	$T_{max}(^{\circ}C)$
Alnico V	1.280	51	44	>300
Ferrites	0.385	235	28	<100
Mn-Al-C	0.560	239	61	
SmCo ₅	0.870	637	146	≈250
Nd ₁₅ B ₈ Fe ₇₇	1.230	881	290	≈150

B_r is de remanente fluxdichtheid en staat voor de sterkte van het magnetisch veld nadat een extern magnetisch veld is verwijderd, met andere woorden hoe hoger deze waarde hoe krachtiger de magneet en hoe sterker het magnetisch veld. H_c is de dwingende magnetische veldsterkte en is een maatstaf van het materiaal om een extern magnetisch veld te weerstaan zonder gedemagnetiseerd te worden. BH_{max} is de maximale energiedichtheid en T_{max} is de maximale werkingstemperatuur. Uit deze tabel kan dus afgeleid worden dat Alnico en Neodymium magneten over het sterkste magnetisch veld beschikken. Echter in het geval van Alnico kunnen deze snel gedemagnetiseerd worden door externe magnetische velden vanwege de zeer lage H_c waarde. Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruik van een aangepaste delta-configuratie met een 3-fasige “full bridge rectifier” (FBR), deze zal ervoor zorgen dat de stroom in elke fase slechts in 1 richting kan vloeien om tegengestelde magnetische velden te vermijden. Deze FBR kan gebouwd worden met simpele elektronische componenten zoals een condensator en 9 diodes (Kucuk, 2016) Echter voor onze toepassing is het voordeliger om gebruik te maken van een ster-configuratie gezien de lage snelheden. Het schakelen van de generator in ster wordt namelijk gebruikt om een hoger EMF te bereiken voor een minder aantal wikkelingen aangezien bij een sterconfiguratie de lijnspanning gelijk is aan vierkantswortel 3 keer de fasespanning, $V_L = \sqrt{3} \cdot V_f$.

De volgende optie is het gebruik van neodymium magneten, een populaire keuze bij het ontwerpen van AFPMG. Deze beschikken over de beste eigenschappen over heel de lijn, zoals de hoogste H_c en hoogste BH_{max} , maar zijn hierdoor ook duurder. De hoge H_c zorgt ervoor dat deze magneetsoort sterk bestand is tegen externe magnetische velden en bijna niet kan worden gedemagnetiseerd. De hoogste BH_{max} is ook een voordelige eigenschap aangezien het met Neodymium magneten mogelijk is om een even sterk magnetisch veld te verkrijgen met kleinere magneten dan met de andere types. Deze eigenschap komt vooral voordelig uit gezien de beperkte diameter van de generator en de behoefte aan een compact ontwerp. Een belangrijke eigenschap is de hoge remanente fluxdichtheid van deze magneet, 2^{de} hoogste na Alnico V. Een

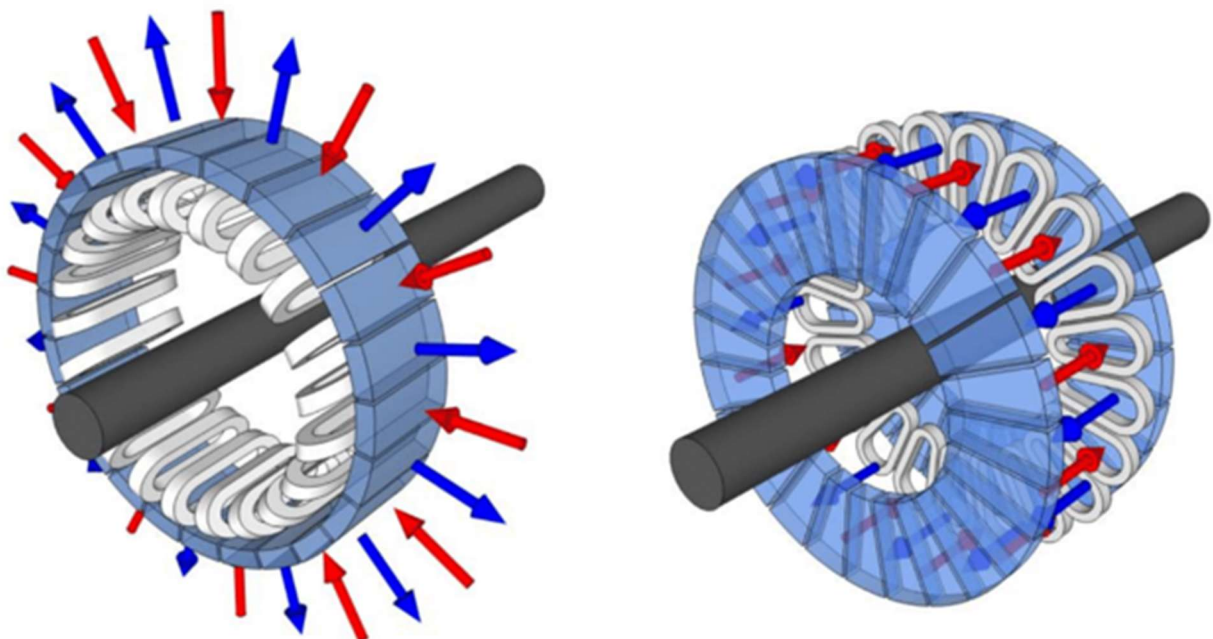
hogere fluxdichtheid zal zoals eerder vermeld namelijk zorgen voor een sterker magnetisch veld, waardoor men een grotere EMF kan opwekken (Wet van Faraday) en dus meer vermogen kan bekomen. Het gebruiken van een magneet met een hogere remanente fluxdichtheid wordt ook aangeraden voor compacte systemen zoals de golfenergieomzetter waarvoor deze generator wordt ontworpen (Irasari et al., 2018). Omwille van deze redenen is het aangeraden om te investeren in de sterkere Neodymium magneten om zo hogere vermogens te kunnen bekomen. De gebruikte magneet valt te zien op figuur 6. Deze magneten waren al aangekocht en de afmetingen van deze magneet zullen dus gebruikt worden voor het ontwerp van de generator.



Figuur 6: Neodymium magneet, Bron: eigen werk

1.3.4 Spoelen

Het voornaamste verschil bij een AFPMG is dat de spoelen zo gewikkeld zijn zodat ze als het ware loodrecht op de as van de generator staan waardoor de magnetische veldlijnen bij deze generator axiaal lopen, evenwijdig aan de as. Dit in tegenstelling tot bij radiale generatoren waar de spoelen evenwijdig aan de as worden gewikkeld en de veldlijnen loodrecht op de as staan, zie figuur 7.



Figuur 7: Magnetische veldlijnen radiaal vs. axiaal, Bron: Greenspur, (n.d.)

Een mogelijk alternatief ontwerp voor de spoelen is het gebruik van een zogeheten “*Serpentine Coil*”, zie figuur 8. Hierbij worden de spoelen als het ware doorverbonden aan elkaar om een lange doorlopende lus te maken met bochten om rond de stator sloten te passen. Deze manier van wikkelen wordt vaak gebruikt bij DIY-windgeneratoren om de materiaalkosten zo laag mogelijk te houden. Het heeft als voordeel dat het de hoeveelheid inactief materiaal verkleint en hiermee de kosten aan koperdraad vermindert. De moeilijkheid hierbij bekommt men echter wanneer men een 3-fase systeem wil creëren. Het gebruik van een 3-fase systeem is namelijk voordeliger bij generatoren voor het bekomen van een stabielere output (Murphy, n.d.). De manier om dit te doen is door 3 lussen als het ware tegen elkaar te plakken echter moet men hierbij opletten dat de verschuiving tussen de verschillende lussen perfect 120° bedraagt om geen efficiëntie te verliezen en dat de spoelen perfect van elkaar geïsoleerd zijn om kortsluitingen te vermijden. Ook zou dit vragen om 3 lange spoelen wat het voordeel van de verlaagde materiaalkosten mogelijks neutraliseert. Om deze redenen wordt gekozen voor een klassiek ontwerp met statorsloten waarrond de spoel wordt gewikkeld.



Figuur 8: Serpentine Coils, Bron: Where eagles fail to perch (2023)

2. Bepalen generator specificaties

De volgende fase is het ontwerpen van de generator zelf. In dit hoofdstuk zullen dan ook de verschillende parameters van de generator besproken worden zoals: diameter, poolparen, spoelen, vermogen, stroom en spanning. Elk van deze eigenschappen zal afzonderlijk besproken worden en gestaafd worden met behulp van berekeningen. Het was vooral van belang om een goede balans te bekomen tussen diameter en hoeveelheid spoelen en magneten, maar ook om een zo hoog mogelijk vermogen te bekomen met een zo laag mogelijke hoeveelheid aan magneten.

Het doel is om met de generator een batterij van 12V op te kunnen laden door middel van gelijkspanning. Dit wil dus zeggen dat de output van de generator ook gelijkgericht zal moeten worden alvorens aan de belasting te hangen. Het gelijkrichten van de wisselspanning gebeurt met een FBR.

2.1.1 Ontwerpvoorwaarden

Voor het ontwerpen van de DRAFPM-generator wordt er niet helemaal van nul begonnen. Er zijn dan ook een paar fysieke limieten opgelegd aan het ontwerp om succesvol in de golfenergieomzetter te kunnen passen, zoals de maximale diameter om nog in de golfenergieomzetter te passen.

Het doel is om een ontwerp te maken dat een zo hoog mogelijk vermogen kan opwekken voor het opladen van een 12V batterij. Dit einddoel wordt ook in rekening gebracht bij het ontwerpen. De magneten en koperdraad bleken op voorhand al aangekocht te zijn. De fysieke afmetingen en eigenschappen hiervan moeten dus ook in rekening gehouden worden bij het ontwerp van de generator. Een overzicht van al deze gegevens is terug te vinden in onderstaande tabel 2. Deze gegevens zullen gebruikt worden als vertrekpunt voor het ontwerp van de DRAFPM.

Tabel 2: Ontwerp voorwaarden DRAFPM-Generator, Bron: eigen werk

Max. Buitendiameter	335 mm	Magneet Breedte	9,4 mm
As Diameter	8 mm	Magneet Lengte	59,94 mm
Toerental	100 RPM	Magneet Dikte	2,56 mm
Output Spanning	12 V	Koperdraad Diameter	0,45 mm

2.2 Berekeningen

In dit deel worden de berekeningen voor het ontwerp toegelicht en het gevolgde stappenplan uiteengezet om zo een duidelijk overzicht te bieden van de gevolgde redenering en het denkproces dat tot het eindresultaat heeft geleid. De gebruikte formules zijn afkomstig uit academische onderzoekspapers over het ontwerpen van AFPMG's.

2.2.1 Polen

Om een zo hoog mogelijk vermogen te bereiken, moet de DRAFPM-Generator, binnen de grenzen van de diameter, zo veel mogelijk magnetische polen hebben.

De eerste stap was om het aantal beschikbare magneten per rotor te bepalen. Er wordt gekozen om de diameter van de rotor vast te leggen op 30 cm om eventuele ruimte voor een “casing” over te laten. De beste afstand om magneten te plaatsen ten opzichte van de as bedraagt 65 – 85 % van de straal volgens (Premaratne et al., 2022). Rekening houdend met deze gegevens kan de oppervlakte van een band berekend worden waarin de magneten geplaatst horen te worden per rotor. De oppervlakte van deze band bedraagt 39544,5 mm² volgens onderstaande berekening.

- 1) Straal tot centerpunt magneet:

$$70\% \times 150 \text{ mm} = 105 \text{ mm}$$

- 2) Oppervlakte van magneetband:

$$(105 \text{ mm} + 29,97 \text{ mm})^2 \pi = 57230,1 \text{ mm}^2$$

$$(105 \text{ mm} - 29,97 \text{ mm})^2 \pi = 17685,6 \text{ mm}^2$$

$$57230,1 \text{ mm}^2 - 17685,6 \text{ mm}^2 = 39544,5 \text{ mm}^2$$

De volgende stap was het optimale aantal magneten in de magneetband bepalen. Een belangrijke factor hierbij is het bekomen van een goede “pole arc to pole pitch ratio”, α . Oftewel de verhouding van magneetoppervlakte over de afstand tussen magneten. Deze waarde bedraagt best ergens tussen de 0,4 en 0,7 (Hlaing, 2018). De hoeveelheid magneten werd bepaald door de oppervlakte van de magneetband te delen door de oppervlakte van een magneet, vermenigvuldigd met factor 2,5 voor het in rekening houden van niet magnetische ruimte om fluxverliezen te vermijden en het verhogen van de efficiëntie (Price et al., 2008). Het uitvoeren van deze berekening gaf volgend resultaat.

- 3) Berekenen oppervlakte magneet:

$$59,94 \text{ mm} \times 9,4 \text{ mm} = 563,46 \text{ mm}^2$$

4) Berekenen aantal magneten:

$$\frac{39544,5\text{mm}^2}{2,5 \times 563,436\text{mm}^2} = 28,07 \approx 28$$

Omwille van vereenvoudiging en het verhogen van het aantal magneten wordt gekozen om het aantal magneten te verhogen naar 30, dit geeft de DRAFPM-Generator 10 poolparen per rotor per fase. De volgende stap was controleren of dit binnen het gunstige bereik viel van α .

5) Bepalen “Pole Pitch”, τ en wordt gegeven door formule: $\tau = \pi dR/p$, met dR de diameter van de rotor en p het aantal magneten op de rotor.

$$\tau = \frac{\pi 0,3 \text{ m}}{30} = 0,0314 \text{ m}$$

6) Berekenen α , met de formule: $\alpha = bM/\tau$, met bM de breedte van een magneet.

$$\alpha = \frac{9,4\text{mm}}{31,42\text{mm}} = 0,3$$

Deze α valt niet binnen het gunstige bereik en er zal dus een aanpassing gemaakt moeten worden aan het aantal magneten om binnen dit bereik van 0,4 tot 0,7 te liggen. Het nieuwe aantal magneten kan bepaald worden door de formule voor α en τ te combineren en op te lossen naar p , geeft $p = \frac{\pi dR \times \alpha}{bM}$. Voor deze berekening werken we met een α gelijk aan 0,6, dit zou zorgen voor de meest sinusoïde golf (Latoufis et al., 2012).

7) Berekenen nieuw aantal magneten

$$p = \frac{\pi 300 \times 0,6}{9,4} = 60$$

60 magneten is echter te veel omdat als de magneten in secties van 6° geplaatst worden de oppervlaktes hiervan te klein zijn waardoor de magneten elkaar net raken, wat zoals hierboven al vermeld werd, vermeden moet worden. Omwille van deze reden wordt besloten om het aantal magneten te verlagen tot 48 magneten per rotor. 48 magneten zorgen voor een α van 0,48 wat nog binnen het gunstige bereik valt. Op elke rotor zal dus alternerend een magneet als noord- of zuidpool geplaatst worden om de $7,5^\circ$. Hierdoor is er nog voldoende speling tussen de verschillende magneten om geen nadelige verliezen te leiden.

2.2.2 Spoelen

Het volgende onderdeel om te berekenen heeft betrekking op de stator. Deze zal bestaan uit een aantal statorsloten omwikkeld met spoelen onderverdeeld in 3 fases om vermogen uit de generator te halen. Er zal gekeken worden naar de oppervlakte van de spoelen, het aantal

spoelen en het aantal wikkelingen. Het aantal spoelen wordt bepaald in verhouding tot het aantal polen. Deze verhouding bedraagt best $\frac{3}{4}$ van het aantal polen (Kamper et al., 2008).

1) Aantal spoelen, Q:

$$Q = \frac{3}{4} \times 48 = 36$$

Deze verhouding geeft dus 36 spoelen, wat neerkomt op 12 spoelen per fase. De volgende stap was de oppervlakte en het aantal wikkelingen bepalen. De breedte van de spoelen mag niet groter zijn dan de τ van de polen. Bredere spoelen zullen zorgen voor een hogere outputspanning, maar ook voor een verhoging in verstoorde harmonisatie vanwege overlap tussen spoelen en alternerende magnetische velden waardoor er efficiëntieverlies is (Bumby et al., 2004). Hierdoor zal de breedte van de spoelen beperkt worden tot de waarde van τ vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor van 0,9

2) Breedte Spoelen, w:

$$w = \frac{\pi \times 300 \text{ mm}}{48} \times 0,9 = 17,67 \text{ mm}$$

De volgende stap voor het berekenen van de oppervlakte was het bepalen van de hoogte van de spoelen. De hoogte hiervan is best hetzelfde of iets hoger dan de hoogte van de magneet om een maximale fluxopwekking te voorzien. Aangezien de magneten een hoogte hebben van 59,94 mm zal deze ongeveer hetzelfde zijn voor de spoelen, namelijk 60mm. Met deze gegevens kan vervolgens de oppervlakte van de spoelen berekend worden. Deze zullen uiteraard niet perfect rechthoekig zijn waardoor de berekende oppervlakte slechts een schatting is, nodig voor het berekenen van verdere gegevens.

3) Oppervlakte spoelen, S:

$$S = 17,67 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} = 1060,2 \text{ mm}^2$$

Nu we de oppervlakte van de spoelen hebben berekend kan het aantal wikkelingen bepaald worden. Hiervoor wordt volgende formule gebruikt (Kutt et al., 2020).

$$N = \frac{\epsilon \times \sqrt{2} \times V_{1l-N}}{\omega \times k_{w1} \times \Phi_m}$$

Met ϵ , ratio tussen EMF, V_{1l-N} , spanning tussen lijn 1 en de neuter; ω , elektrische rotatiesnelheid gedefinieerd door: $\omega = P/2 \cdot \omega_m$; k_{w1} de “windingsfactor” en Φ_m de “flux linkage amplitude” gedefinieerd door: $\Phi_m = B_{mg} \times k_B \times \frac{D_o - D_i}{2} \tau$ waarin men B_{mg} kan definiëren

als: $B_{mg} = \frac{k_B \times k_{PM} \times B_r}{1 + \frac{2\delta}{\mu_{rPM} \times h_{PM}}}$ met B_r de remanente fluxdichtheid, δ de breedte van de luchtspleet die

best zo laag mogelijk gehouden wordt om verliezen te vermijden, μ_{rPM} = Relatieve permeabiliteit van de permanente magneet ofwel de verhouding tussen fluxdichtheid in het materiaal en de fluxdichtheid in vacuüm, h_{PM} = hoogte van de permanente magneet, K_B de flux distributiefactor en K_{PM} de “magnet fill factor” gedefinieerd door breedte van de magneet over τ .

4) Flux distributiefactor, K_B :

$$K_B = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 = 0,405$$

5) Magnet fill factor, K_{PM} :

$$K_{PM} = \frac{b_M}{\tau} = \frac{9,4 \text{ mm}}{19.635 \text{ mm}} = 0,53$$

6) Luchtspleet fluxdichtheid B_{mg} :

De luchtspleet bedraagt slechts 2 mm. De verliezen van een DRAFPM-Generator zijn namelijk invers proportioneel ten opzichte van de luchtspleet, waardoor het best is om deze waarde zo laag mogelijk te houden (Bannon et al., 2013). μ_{rPM} bedraagt 1 voor Neodymium magneten (Prashanth, 2022). Nu deze gegevens gedefinieerd zijn kan de luchtspleet fluxdichtheid berekend worden.

$$B_{mg} = \frac{0,405 \times 0,53 \times 1,23 \text{ T}}{1 + \frac{2 \times 2 \text{ mm}}{1 \times 59,94 \text{ mm}}} = 0,248 \text{ T}$$

7) Flux linkage amplitude Φ_m :

$$\Phi_m = 0,248 \text{ T} \times 0,405 \times \frac{0,3 \text{ m} - 0,008 \text{ m}}{2} \times 0,019635 \text{ m} = 0,00028735 \text{ Wb}$$

8) Elektrische rotatiesnelheid, ω :

$$\omega = 48/2 \times 100 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 251,327 \text{ rad/s}$$

9) Fasespanning, V_{1l-N} :

De fasespanning in een sterconfiguratie wordt gedefinieerd als de lijnspanning gedeeld door vierkantswortel 3. Dit geeft ons onderstaande fasespanning tussen lijn 1 en de neutrale lijn ervan uitgaande dat de lijnspanning 12V bedraagt om onze batterij mee te kunnen opladen.

$$V_{1l-N} = \frac{12V}{\sqrt{3}} = 6,928V$$

10) Aantal wikkelingen, N:

Nu alle nodige gegevens verzameld zijn kan het aantal wikkelingen per spoel berekend worden. Voor ϵ zal een waarde gekozen worden van 1,1 om een bepaalde marge in te rekenen tussen niet belaste en onbelaste toestand. In onbelaste toestand zal de opgewekte spanning namelijk iets hoger liggen vanwege het feit dat er geen spanningsval is door een weerstand van de belasting. Voor k_{w1} zal gewerkt worden met een zo hoog mogelijke waarde tussen 0 en 1 deze wordt gelegd op 0,9 om een zo efficiënt mogelijk ontwerp te bekomen. Door bovenstaande formule in te vullen kan de volgende waarde bekomen worden voor het aantal wikkelingen.

$$N = \frac{1,1 \times \sqrt{2} \times 6,928 \text{ V}}{251,327 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,9 \times 0,00028735 \text{ Wb}} = 165,48 \approx 165 \text{ wikkelingen}$$

Nu het aantal wikkelingen bepaald is kan de luchtspleet en dikte van de spoelen bepaald worden. 165 kan opgesplitst worden als het product van 15 en 11. Aan de hand hiervan kan de luchtspleet en dikte van de spoel berekend worden. Door 11 wikkelingen per laag te doen met 15 lagen per spoel.

11) Dikte van de spoel, t_M :

$$t_M = 11 \times 0,35 \text{ mm} = 3,85 \text{ mm}$$

12) Dikte luchtspleet van de spoel, t_{LS} :

$$t_{LS} = 17,67 \text{ mm} - (15 \times 0,35 \times 2) = 7,17 \text{ mm}$$

13) Hoogte luchtspleet van de spoel, h_{LS} :

$$h_{LS} = 60 \text{ mm} - (15 \times 0,35 \times 2) = 49,5 \text{ mm}$$

14) Oppervlakte doorsnede van de spoel, A_c :

$$A_c = 1060,2 \text{ mm}^2 - (7,17 \text{ mm} \times 49,5 \text{ mm}) = 705,285 \text{ mm}^2$$

2.2.3 Verwacht vermogen

Nu alle voorgaande gegevens berekend zijn voor het ontwerp van de stator en de rotor kunnen deze gebruikt worden voor het uitrekenen van het verwacht vermogen van de generator tezamen met andere specificaties zoals de verwachte stroom. Voor het bepalen van het verwacht vermogen zal onderstaande formule gebruikt worden, deze wordt ook wel de “sizing equation” geheten en komt veel voor bij ontwerp van Axial Flux Generatoren (Kutt et al., 2020).

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{P}{\pi^2 \times k_D \times k_{w_1} \times n_s \times B_{mg} \times A_m \times \eta \times \cos \phi}}$$

Met D_o de buitendiameter van de generator, P de vermogensoutput in Watt, k_D de diameterfactor, gedefinieerd als: $k_D = \frac{1}{8} \times \left(1 + \frac{D_i}{D_o}\right) \times \left(1 - \left(\frac{D_i}{D_o}\right)^2\right)$, n_s de rotatiesnelheid, A_m de lineaire stroomdichtheid gedefinieerd door: $A_m = \frac{J \times A_s}{\pi D_m}$ met J de stroomdichtheid van de geleider, A_s de oppervlakte van de spoelen per fase en D_m de gemiddelde diameter per spoel. Verder bestaat de formule nog uit η voor de efficiëntie van de DRAFPM en $\cos \phi$ de arbeidsfactor van het systeem. Deze worden respectievelijk geschat op 90% en 0,9 volgens verschillende onderzoeken (Anvari et al., 2021; Asefi et al., 2018). Om de eerste formule in te vullen moet eerst een aantal gegevens berekend worden.

1) Berekenen diameterfactor, K_D :

$$K_D = \frac{1}{8} \times \left(1 + \frac{8 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}\right) \times \left(1 - \left(\frac{8 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}\right)^2\right) = 0,13$$

2) Berekenen stroomdichtheid van de geleider, A_m :

$$A_m = \frac{1 \frac{A}{\text{mm}^2} \times 12 \times 702,285 \text{ mm}^2}{\pi \times (0,01767 \text{ m} - 0,00717 \text{ m})} = 255479,15 \text{ A/m}$$

Nu alle gegevens bepaald zijn om deze vergelijking in te vullen moet deze enkel nog omgevormd worden naar P en ingevuld worden met de berekende gegevens.

3) Verwacht vermogen, P :

$$P = \frac{D_o^3}{\pi^2 \times k_D \times k_{w_1} \times n_s \times B_{mg} \times A_m \times \eta \times \cos \phi}$$

$$\frac{0,3^3 \text{ m}}{\pi^2 \times 0,13 \times 0,9 \times 10,47 \text{ rad/s} \times 0,248 \text{ T} \times 255479,15 \frac{\text{A}}{\text{m}} \times 0,9 \times 0,9}$$

$$= 4.35 \times 10^{-8} \text{ W}$$

Dit resultaat is echter beduidend lager dan verwacht en dan gewenst. De gebruikte formule is waarschijnlijk niet geschikt voor de voorgestelde DRAFPM-Generator vanwege de kleine diameter. Daarom wordt een alternatieve manier gebruikt waarmee eerst de stroom opgewekt door de generator wordt berekend om hiermee dan het verwacht vermogen te berekenen. Hiervoor wordt onderstaande formule gebruikt met Z de verwachte impedantie van het systeem.

$$I = \frac{B_{mg} \times A_c \times \omega m \times N}{Z}$$

Deze impedantie bestaat uit een resistieve en inductieve component, gedefinieerd door $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. Deze componenten zullen elk eerst apart berekend worden volgens onderstaande formules (Bageshwar & Phand, 2017).

4) Resistieve Component, R:

$$R = \rho \times \frac{l}{A_w}$$

Met ρ de weerstand van koper die zo een $1,72 \times 10^{-8} \Omega m$ bedraagt, l de lengte van de draad in m en A_w de oppervlakte van de draad in m^2 .

5) Totale lengte van de draad, l :

$$l = N \times (b_s \times 2 + l_s \times 2)$$

$$l = 36 \times 165 \times (0,01767 m \times 2 + 0,06 m \times 2) = 922,716 m$$

Vermenigvuldigd met 36 vanwege het aantal spoelen

6) Oppervlakte van de koperdraad, A_w :

$$A_w = \pi \times \left(\frac{d_w}{2}\right)^2$$

$$A_w = \pi \times \left(\frac{0,00035 m}{2}\right)^2 = 9,62 \times 10^{-8} m^2$$

7) Resistieve Component, R:

$$R = 1,72 \times 10^{-8} \Omega m \times \frac{25,6311 m}{9,62 \times 10^{-8} m^2} = 164,98 \Omega$$

8) Inductieve Component, X:

$$X = 2\pi fL$$

Met f de frequentie van de generator in Hz en L de inductie van de spoelen in Henri.

9) Frequentie, f:

$$f = \frac{RPM \times P}{120}$$

$$f = \frac{100 \text{ RPM} \times 48}{120} = 40 \text{ Hz}$$

10) Inductie van de spoelen, L:

$$L = \mu_0 \times \mu_k \times \frac{N^2 \times A_c}{l}$$

Met μ_0 de permeabiliteit van de ruimte gedefinieerd als $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ en μ_k de permeabiliteit van de kern gedefinieerd als 1 voor niet magnetische materialen.

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \times 1 \times \frac{165^2 \times 36 \times 0,000705285 \text{ m}^2}{36 \times 25,6311 \text{ m}} = 9,414 \times 10^{-7} \text{ H}$$

11) Inductieve Component, X:

$$X = 2\pi \times 40 \text{ Hz} \times 9,414 \times 10^{-7} \text{ H} = 2,366 \times 10^{-4} \Omega$$

12) Impedantie van de spoel, Z:

$$Z = \sqrt{164,98 \Omega^2 + 2,366 \times 10^{-4} \Omega^2} = 164,98 \Omega$$

13) Opgewekte stroom door de generator, I:

$$I = \frac{0,248 \text{ T} \times 0,000705285 \text{ m}^2 \times 36 \times 10,47 \text{ rad/s} \times 165}{164,98 \Omega} = 0,066 \text{ A}$$

Nu de verwachte op te wekken stroom bepaald is kan het verwacht vermogen berekend worden met de formule voor vermogens in een 3 fase systeem, $P = \sqrt{3} \times V \times I$.

14) Verwachte vermogensoutput, P:

$$P = \sqrt{3} \times 12 \text{ V} \times 0,066 = 1,37 \text{ W}$$

Deze output van 1,37 ligt meer binnen de verwachtingen en kan dus geaccepteerd worden. Deze output is echter puur theoretisch en het effectief vermogen opgewekt in de praktijk zal hier hoogstwaarschijnlijk van afwijken. Dit vanwege het feit dat sommige gegevens een schatting zijn en geen exacte benadering. Ook wordt er tijdens de berekening van een perfect scenario uitgegaan met ideale omstandigheden en er wordt dus geen rekening gehouden met mogelijke verliezen. Desondanks geven deze stappen ons een goed beeld van de verwachtingen voor de

DRAFPM-Generator voor de golfenergieomzetter. De verwachte generatorspecificaties zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 3: Verwachte generator specificaties, Bron: eigen werk

Specificatie	Waarde
Vermogen	1,37 W
Spanning	12 V
Stroom	66 mA
Frequentie	40 Hz
Toerental	100 RPM
Aantal polen	48
Aantal statorsloten	36
Afstand polen tot center	105 mm
Breedte spoelen	17,67 mm
Dikte spoelen	3,85 mm
Oppervlakte doorsnede spoelen	705,285 mm ²
Aantal wikkelingen per spoel	165
Buitendiameter	300 mm

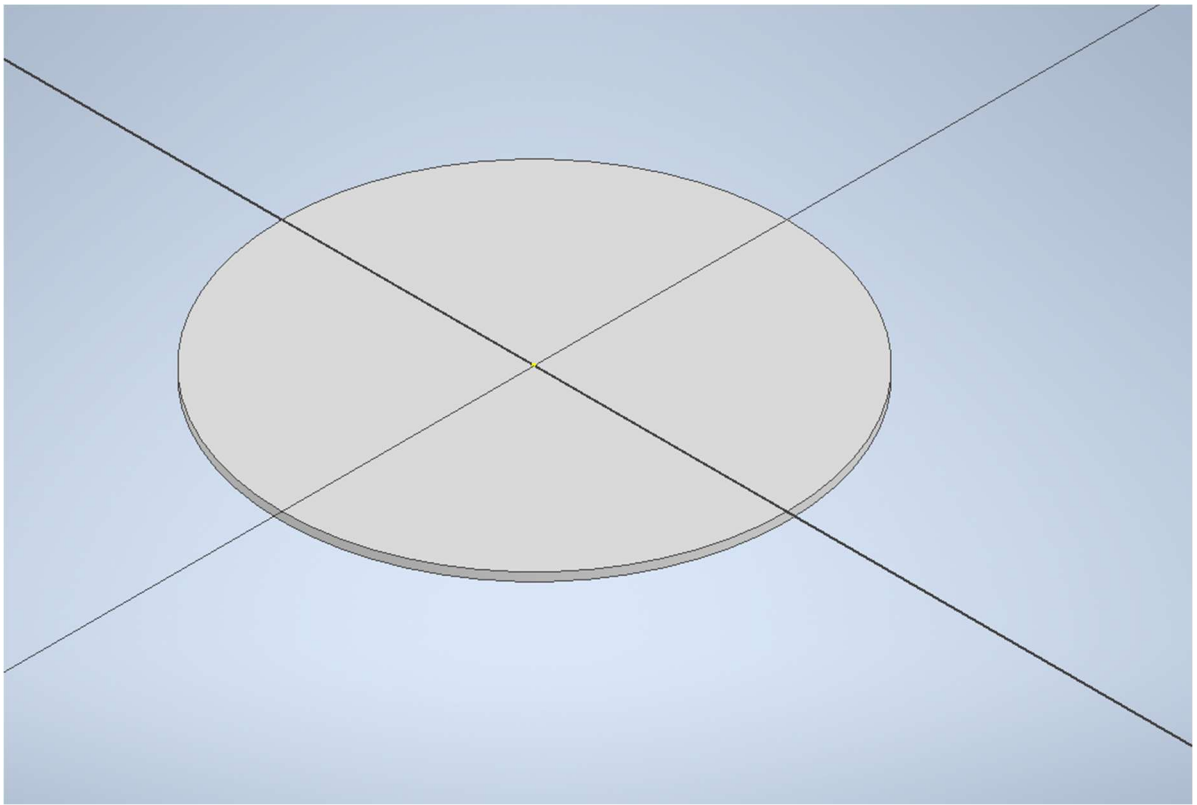
3. Teken en van de generator

Nu de specificaties van de DRAFPM-Generator bepaald zijn is de volgende stap het ontwerpen van een 3D-model om uit te kunnen printen en een praktisch model te realiseren. Dit model zal bestaan uit 3 aparte ontwerpen: de rotorschijf voor de 2 rotors van de generator, de statorschijf voor de spoel sloten waarrond de wikkelingen moeten komen en de buitenkap van de generator zelf waardoor de koperdraden zullen lopen om de juiste configuratie te bekomen. Elk van deze onderdelen zal apart toegelicht worden en het ontwerpproces zal stap voor stap besproken worden. De onderdelen werden getekend in Inventor een 3D mechanische ontwerp software, vaak gebruikt om virtuele prototypes te maken van producten.

3.1 Rotor tekenen

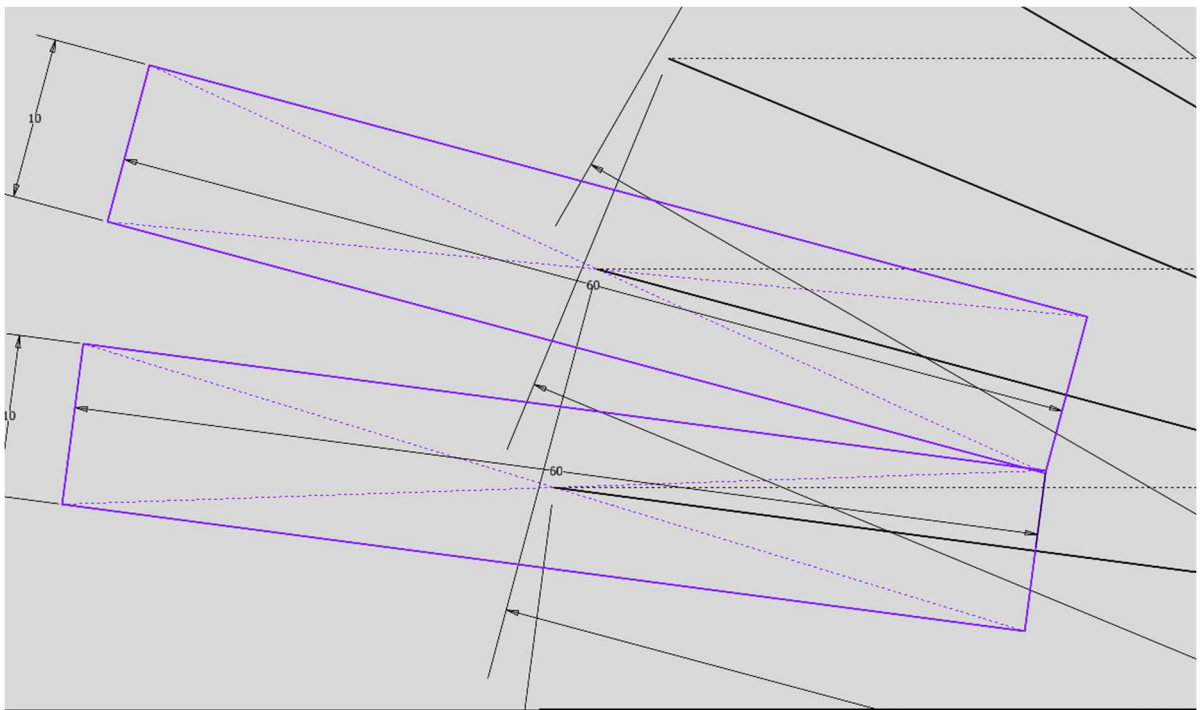
Het eerste onderdeel dat werd ontworpen was de rotor. De rotor bestaat eigenlijk uit 2 perfect identieke rotorschijven, die op een symmetrische afstand van de stator zullen ronddraaien. In deze rotorschijven moet plaats voorzien zijn voor het installeren van de neodymium magneten. Deze zullen namelijk door de beweging van de rotorschijf mee rond de as draaien en dus een fluxverandering veroorzaken in de wikkelingen van de stator wat dan weer zorgt voor een stroomopwekking en het bekomen van een output vermogen. Aangezien beide rotorschijven identiek zijn moet er maar 1 ontwerp gemaakt worden. Deze rotorschijf moet in staat zijn om de 48 magneten te herbergen en moet op de as bevestigd kunnen worden om een rotatiebeweging mogelijk te maken, noodzakelijk voor het bekomen van de fluxverandering.

De eerste stap in het ontwerpproces bestond uit het tekenen van een cirkel met een straal van 300mm. Deze cirkel werd vervolgens “*extruded*” met 5 mm om voldoende dikte te bekomen om de magneten te herbergen. Deze eerste stappen vallen te zien in onderstaande figuur 9.



Figuur 9: Teken rotor schijf, Bron: eigen werk

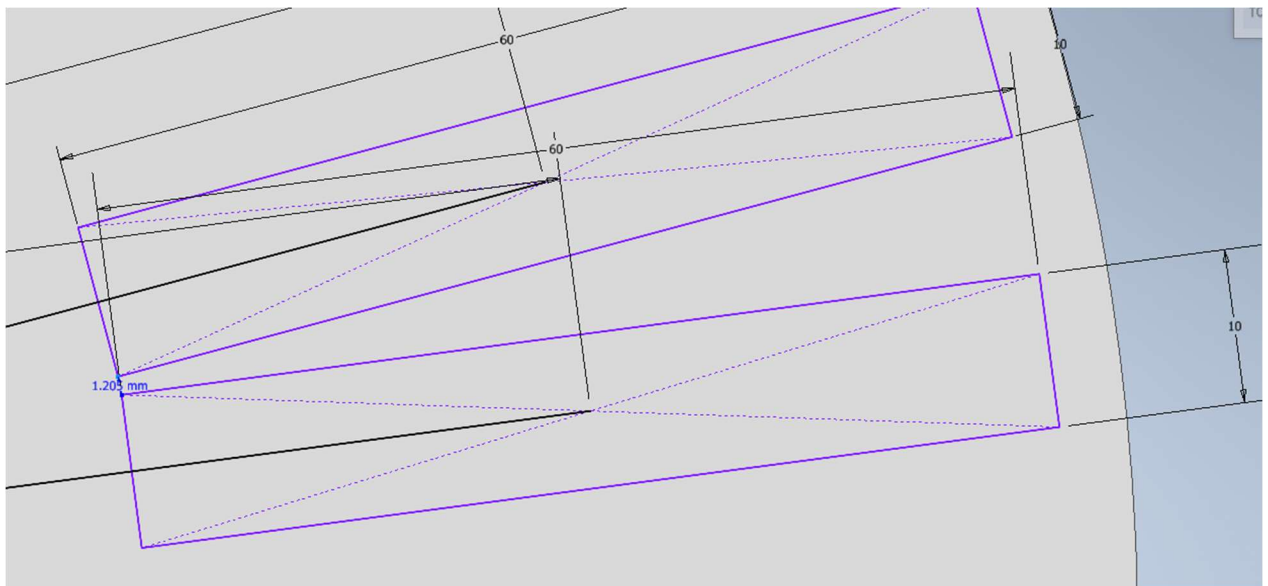
Echter bij het tekenen van de indentaties voor de magneten te plaatsen bestaande uit rechthoeken van 60 mm op 10 mm werd ontdekt dat deze overlappen, zie figuur 10.



Figuur 10: Overlappen indentaties, Bron: eigen werk

Om dit probleem te verhelpen werd de afstand van het center van de rechthoek tot het middelpunt van de schijf vergroot tot 115,5 mm in plaats van de vooraf bepaalde 105mm. Deze nieuwe afstand blijft binnen het gunstige bereik van 65 – 85%, waarbij het midden zich nu op 77% van de straal bevindt. Dit plaatste de rechthoeken verder naar achter en meer uit elkaar

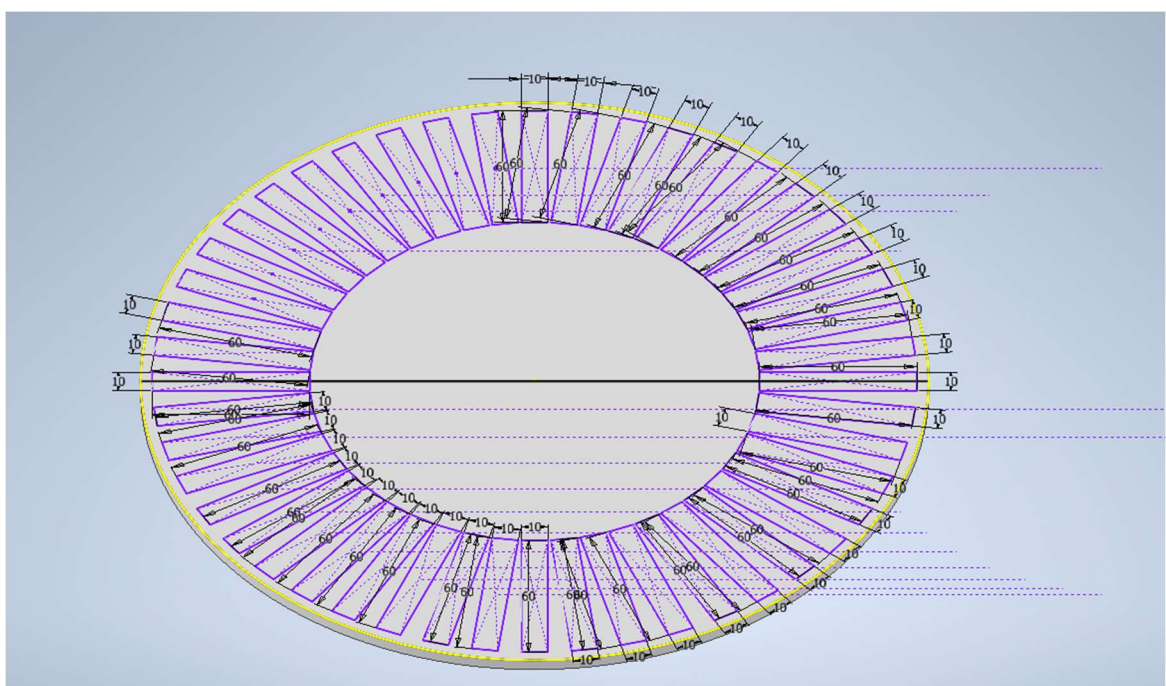
waardoor de overlap hiertussen wegviel zoals zichtbaar op figuur 11. De afstand tussen de rechthoeken aan de hiervoor overlappende hoekpunten bedraagt nu een 1,205 mm. Deze afstand is best klein, maar het verder opschuiven van de rechthoeken zou deze te dicht bij de rand brengen.



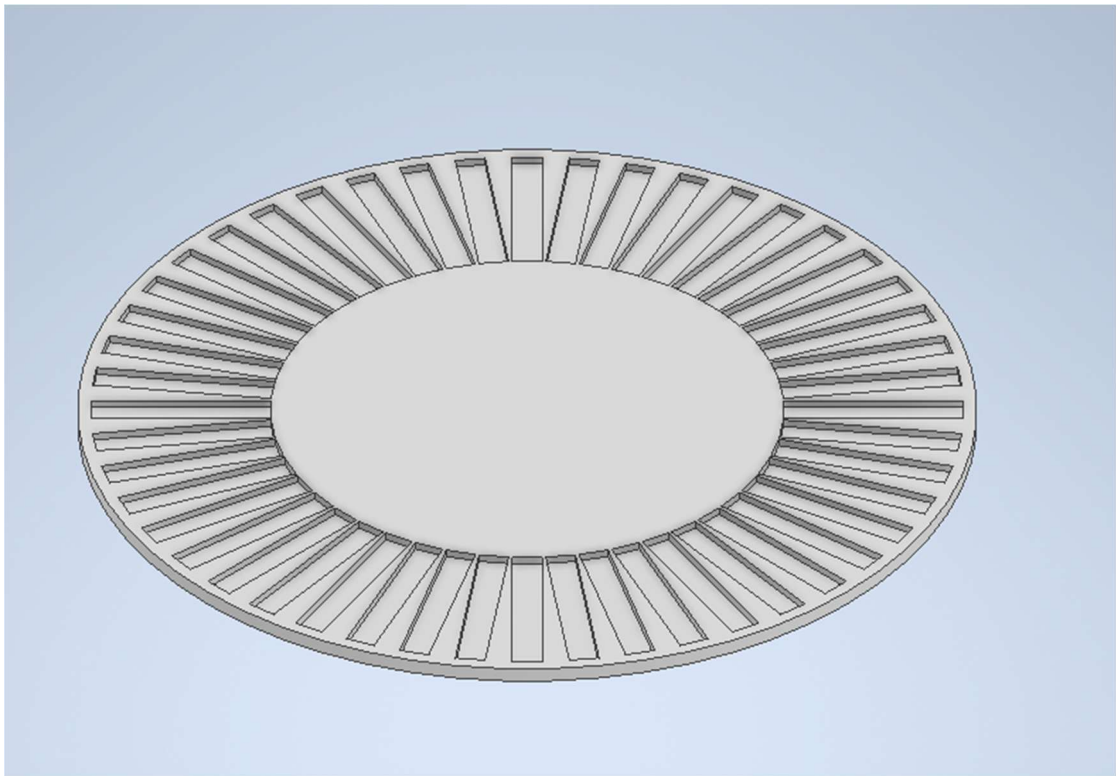
Figuur 11: Uiteenplaatsen indentaties, Bron: eigen werk

De volgende stap was om de 48 rechthoeken te tekenen voor het creëren van de indentaties in de schijf waar de magneten geplaatst zullen worden. Deze stap valt te zien in figuur 12.

Vervolgens werd door gebruik te maken van de “extrude” functie de indentaties gemaakt met een diepte van 2,6 mm. Deze extra 0,1 mm is om rekening te houden met het inlijmen van de magneten en om zeker geen uitstekende magneet oppervlaktes te bekomen. Het resultaat is zichtbaar op figuur 13.

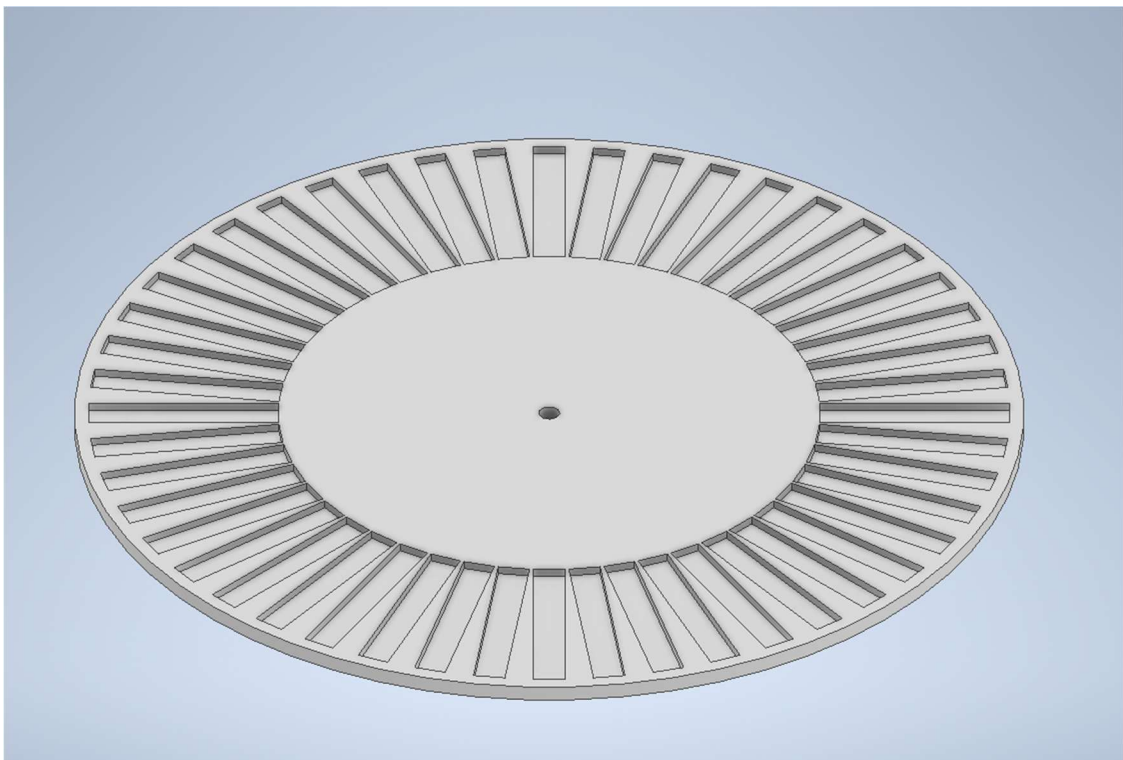


Figuur 12: Uitplannen magneten, Bron: eigen werk



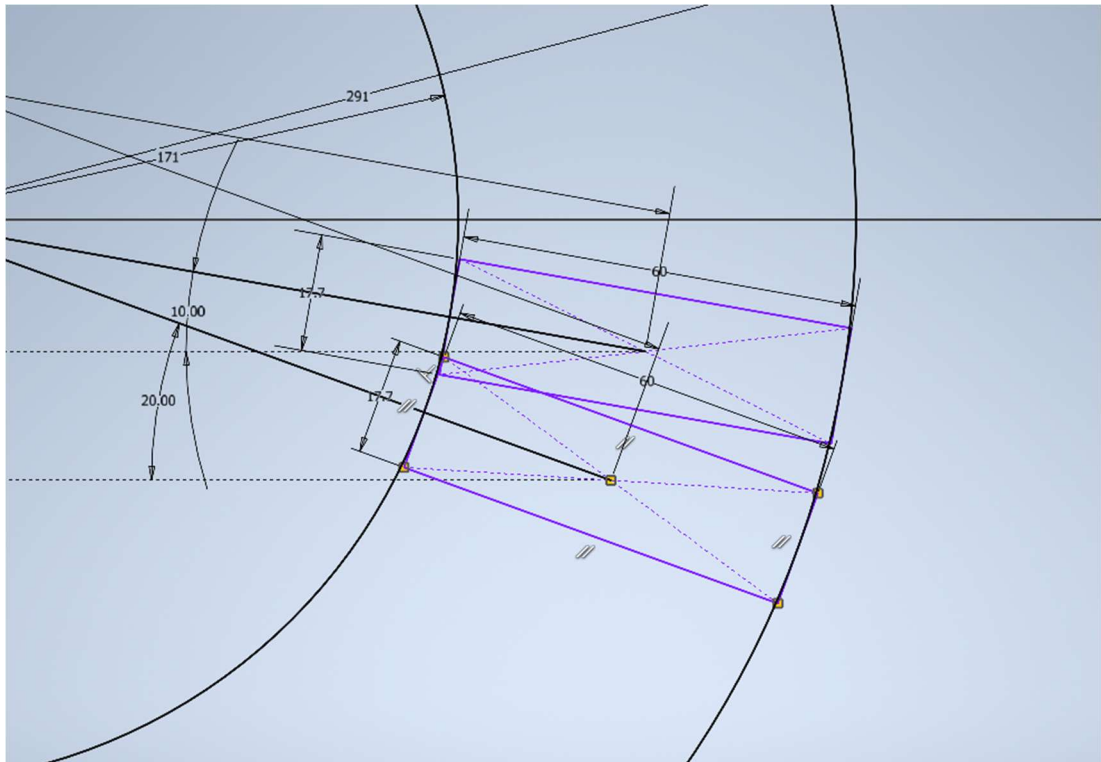
Figuur 13: Indentaties voor magneten, Bron: eigen werk

De finale stap voor de rotor bestond eruit om in het center een gat te maken waar later de draad, voor bevestiging op de as in getapt kan worden. Dit gat bedraagt een diameter van 6,75 mm. Het is namelijk een vuistregel om bij het tappen van draad dit te doen in een gat met een diameter van de diameter van de draad – de spoed. 8mm diameter draad heeft een spoed van 1,25 mm, wat dus een diameter geeft van 6,75 bij het aftrekken. Dit gat en het uiteindelijke ontwerp voor de printer valt te zien op figuur 14.

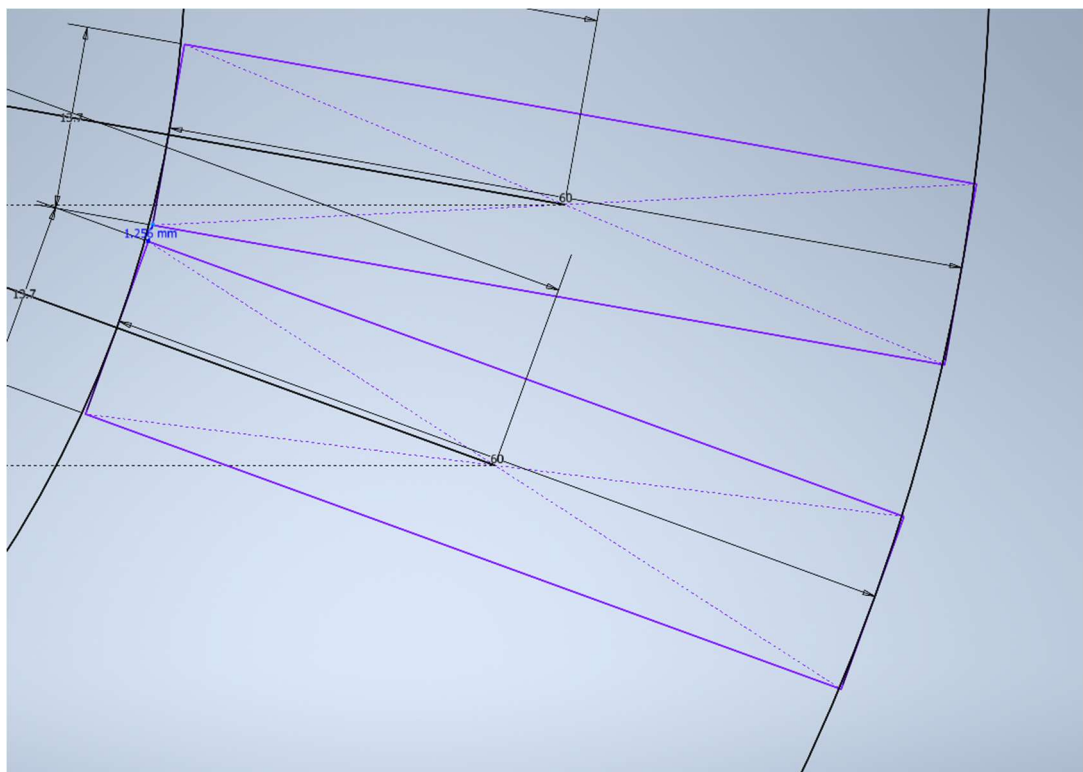


Figuur 14: Finaal ontwerp rotorschijf, Bron: eigen werk

mogelijk aangezien het bedoeling is om de spoelen op te delen in 3 fases. Het gebruiken van 33 spoelen gaf dan weer een vreemde hoek tussen de verschillende statorsloten, wat het tekenen zou bemoeilijken. Omwille van deze redenen werd gekozen om de oppervlakte van de spoelen te verkleinen en ze te versmallen. De nieuwe statorsloten werden verkleind met een factor van 0,7 wat een breedte gaf van 13,7 mm. Dit geeft een uiteindelijke afstand tussen de statorsloten van 1,256 mm zoals te zien op figuur 16.



Figuur 16: Overlappen statorsloten, Bron: eigen werk



Figuur 17: Versmalde statorsloten, Bron: eigen werk

3.2.1 Nieuwe stator dimensies en generator gegevens

Aangezien de spoelen zijn versmald moet om hetzelfde aantal wikkelingen te behalen de spoelen worden verdikt. Deze nieuwe dikte zal 5,25 mm bedragen. Het veranderen van deze parameters leidt tot nieuwe dimensies waardoor nieuwe verwachte generator gegevens. De berekeningen voor het bepalen van deze nieuwe gegevens en dimensies worden hieronder uitgevoerd.

- 1) Breedte spoelen, w

$$w = \frac{\pi \times 300 \text{ mm}}{48} \times 0,7 = 13.70 \text{ mm}.$$

- 2) Oppervlakte spoelen, S :

$$S = 13,7 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} = 822 \text{ mm}^2$$

- 3) Nieuwe dikte spoel, t_M

$$t_M = 15 \times 0,35 \text{ mm} = 5,25 \text{ mm}$$

- 4) Dikte luchtspleet van de spoel, t_{LS} :

$$t_{LS} = 13,7 \text{ mm} - (11 \times 0,35 \times 2) = 6 \text{ mm}$$

- 5) Hoogte luchtspleet van de spoel, h_{LS} :

$$h_{LS} = 60 \text{ mm} - (11 \times 0,35 \times 2) = 52,3 \text{ mm}$$

- 6) Oppervlakte doorsnede van de spoel, A_c :

$$A_c = 822 \text{ mm}^2 - (6 \text{ mm} \times 52,3 \text{ mm}) = 508,2 \text{ mm}^2$$

- 7) Nieuwe lengte van de draad, l

$$l = 36 \times 165 \times (0,0137 \text{ m} \times 2 + 0,06 \text{ m} \times 2) = 875,556 \text{ m}$$

8) Nieuwe resistieve component, R

$$R = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{m} \times \frac{24,321 \text{ m} \times 36}{9,62 \times 10^{-8} \text{ m}^2} = 156,54 \Omega$$

9) Nieuwe inductie van de spoelen, L

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \times 1 \times \frac{165^2 \times 0,0005082 \text{ m}^2 \times 36}{875,556} = 7,149 \times 10^{-7} \text{ H}$$

10) Nieuwe inductieve component, X

$$X = 2\pi \times 40 \text{ Hz} \times 7,149 \times 10^{-7} \text{ H} = 1,797 \times 10^{-4} \Omega$$

11) Nieuwe impedantie, Z

$$Z = \sqrt{156,54 \Omega^2 + 1,797 \times 10^{-4} \Omega^2} = 156,54 \Omega$$

12) Nieuwe opgewekte stroom, I

$$I = \frac{0,248 \text{ T} \times 0,0005082 \text{ m}^2 \times 36 \times 10,47 \text{ rad/s} \times 165}{156,54 \Omega} = 0,05 \text{ A}$$

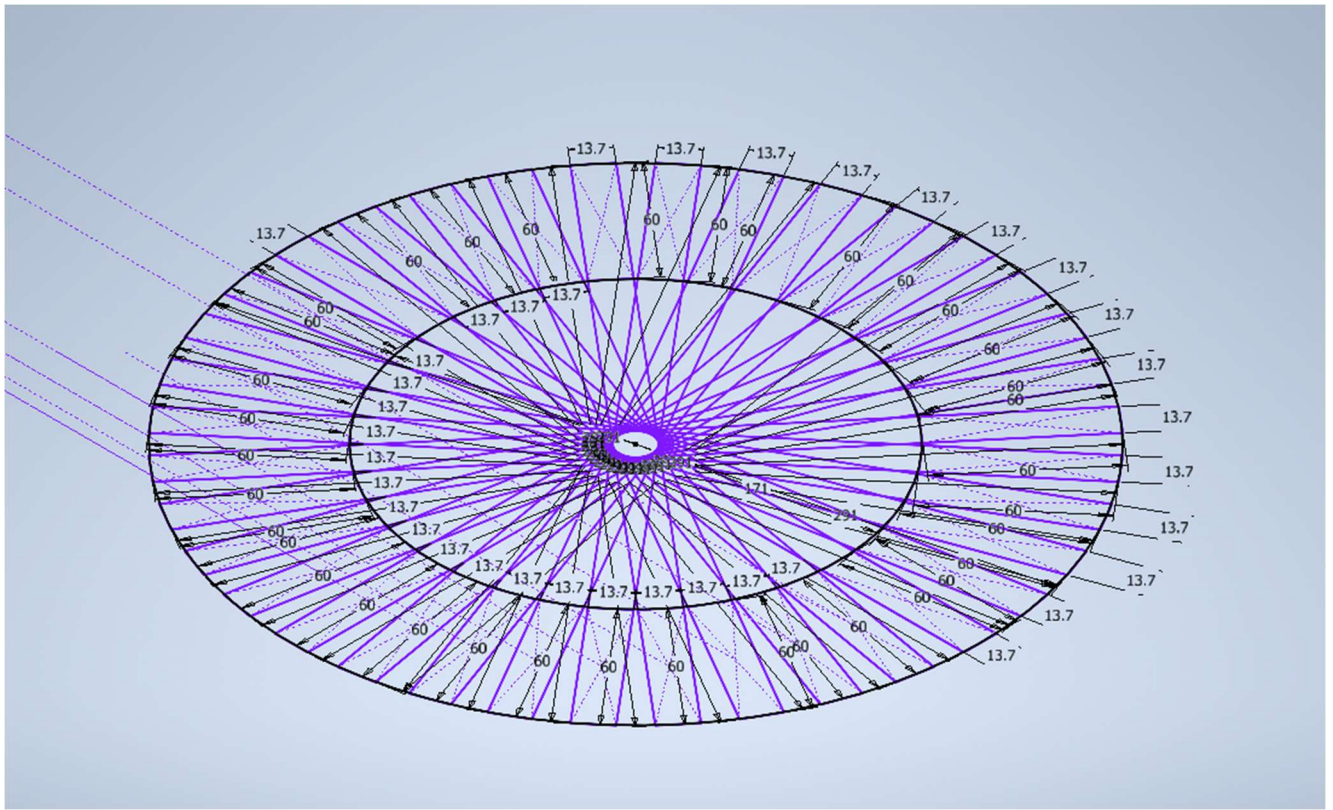
13) Nieuw opgewekt vermogen, P

$$P = \sqrt{3} \times 12 \text{ V} \times 0,05 = 1,04 \text{ W}$$

Het gebruiken van deze methode geeft een verwacht vermogensverlies van 0,33 W, maar het uiteindelijke resultaat scoort nog steeds boven de gevraagde 1 W. Het blijft belangrijk om te benadrukken dat deze waarden puur theoretisch zijn en het afwachten is tot de generator in praktijk getest wordt om te weten te komen hoeveel vermogen ze kan opwekken.

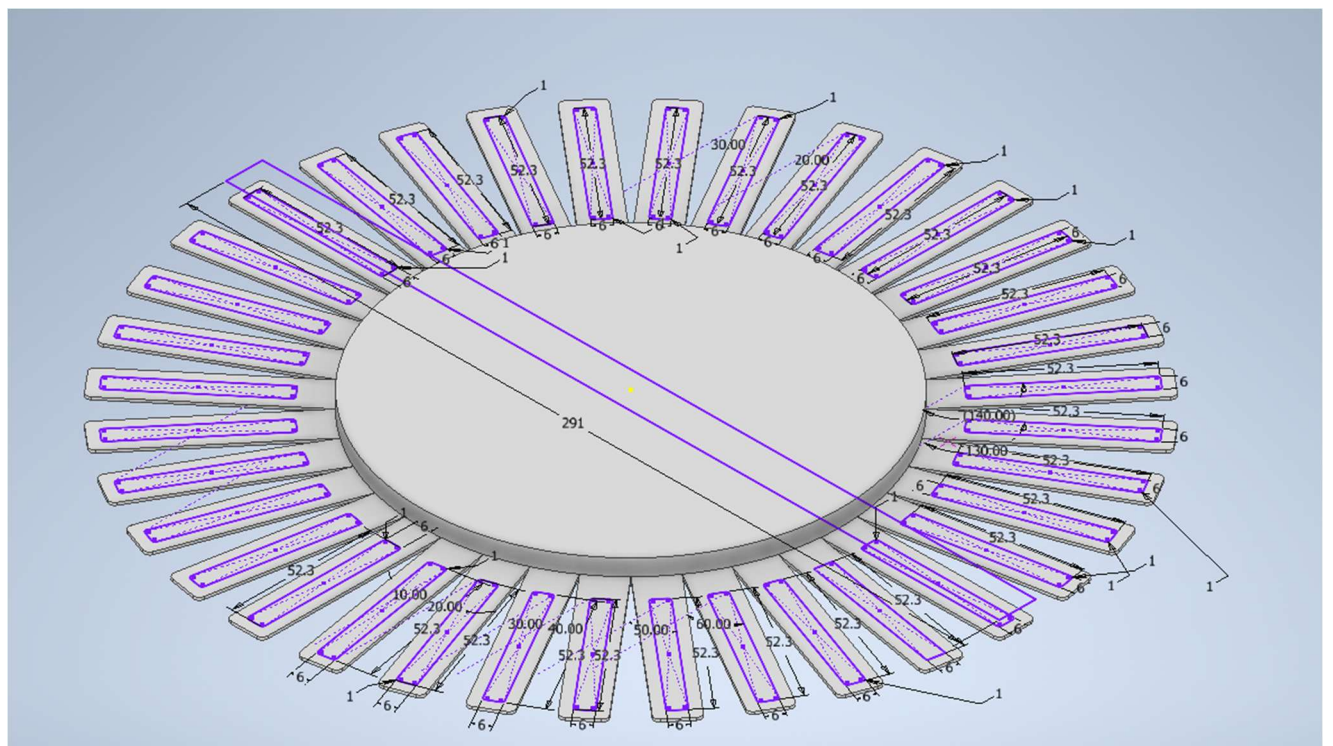
3.2.2 Verder ontwerp stator

Nu de nieuwe gegevens berekend zijn, kan het ontwerpen van de generator verdergezet worden. De volgende stap was het verder uittekenen van de statorsloten en deze vervolgens door te trekken tot aan het tegenovergestelde slot om een soort van rad te bekomen zoals te zien op figuur 18. Deze rechthoeken werden afgerond met 2 mm doormiddel van de “filet” functie



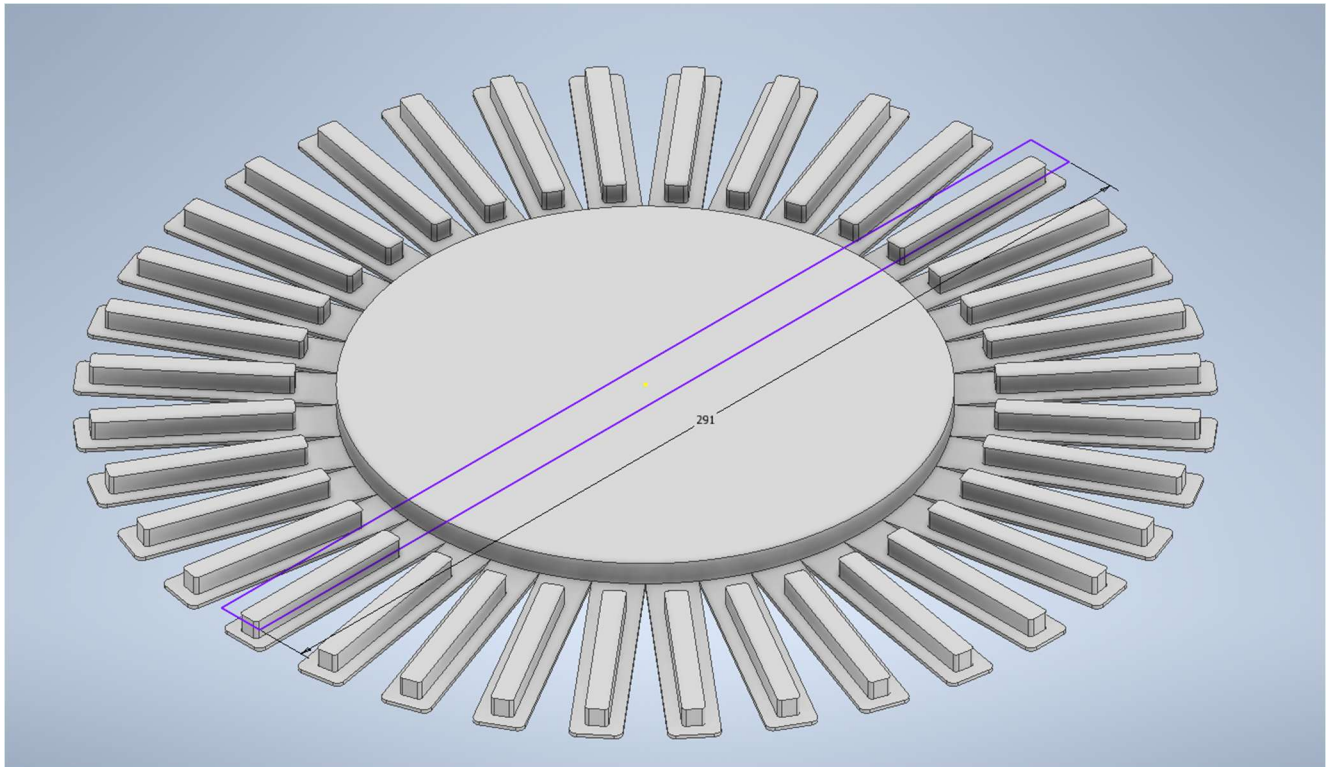
Figuur 18: Uittekenen stator, Bron: eigen werk

Hierna werden deze rechthoekige balken “extruded” met 1 mm en de centrale cirkel met 7,25 mm. Deze cirkel zal later gebruikt worden om de latten voor de bovenkant op te tekenen. Op de stukken met een dikte van 1 mm werden vervolgens kleinere rechthoeken getekend met een breedte van 6 mm, een lengte van 52,3 mm en hoeken afgerond met 1 mm door de “fillet” functie waarrond de spoelen van de stator gewikkeld zullen worden. Deze afmetingen werden in het vorige deel berekend en het resultaat van deze stappen valt te zien in onderstaande figuur 19.



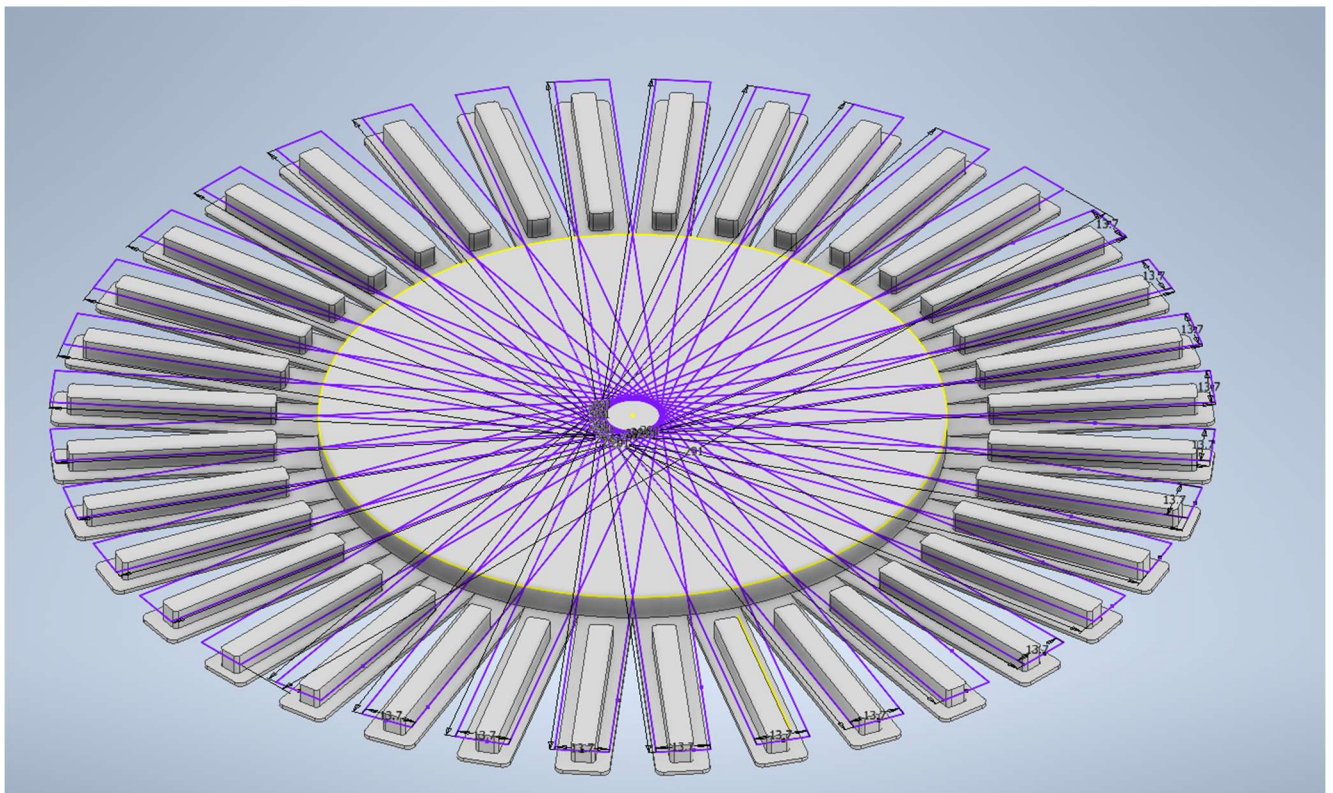
Figuur 19: Uittekenen statorsloten, Bron: eigen werk

De volgende stap was het verhogen van de statorsloten met 6,25 mm doormiddel van de “extrude” functie. Het resultaat hiervan valt te zien in onderstaande figuur 20.



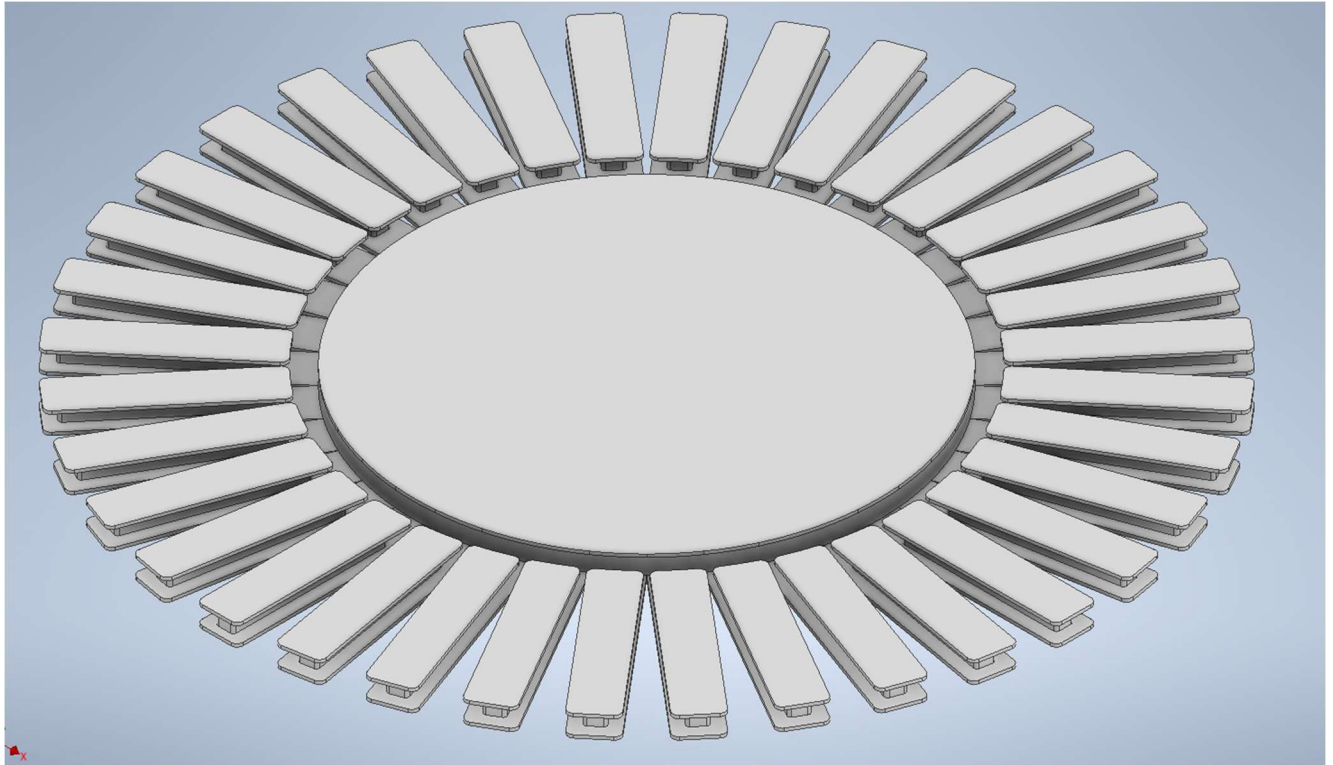
Figuur 20: Verhogen statorsloten, Bron: eigen werk

Hierna werden de latten voor de bovenkant van de stator getekend zoals te zien op onderstaande figuur 21.



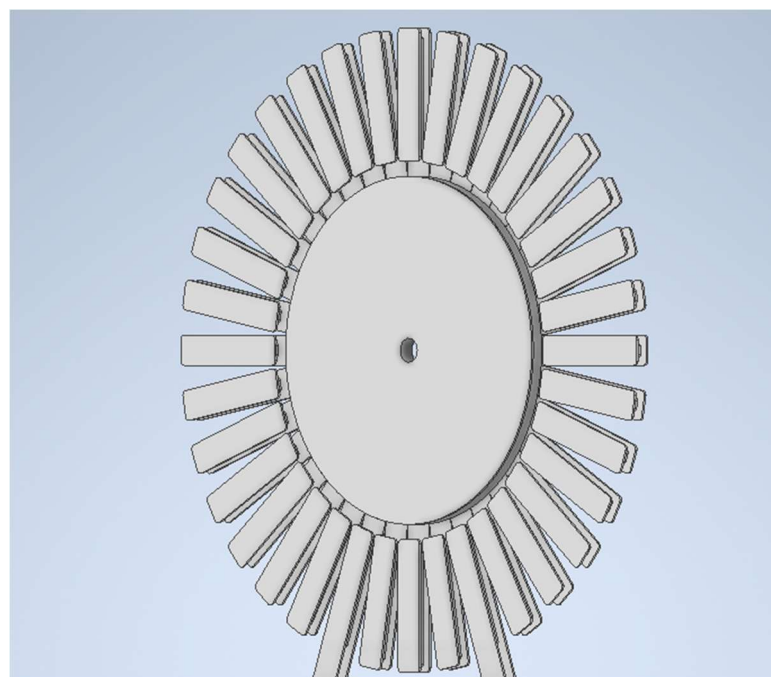
Figuur 21: Bovenkant stator, Bron: eigen werk

Hierna werden deze rechthoekige latten eveneens “extruded” met 1 mm. Vervolgens werd er een cirkelvormige band uitgesneden met een breedte van 6,905 mm om het wikkelen van de spoelen te vergemakkelijken. Uiteindelijk werden de hoeken van de rechthoeken net zoals deze aan de bodem afgerond met 2 mm door de “fillet” functie te gebruiken. Het eindresultaat van deze bewerkingen valt te zien op figuur 22.



Figuur 22: Stator model, Bron: eigen werk

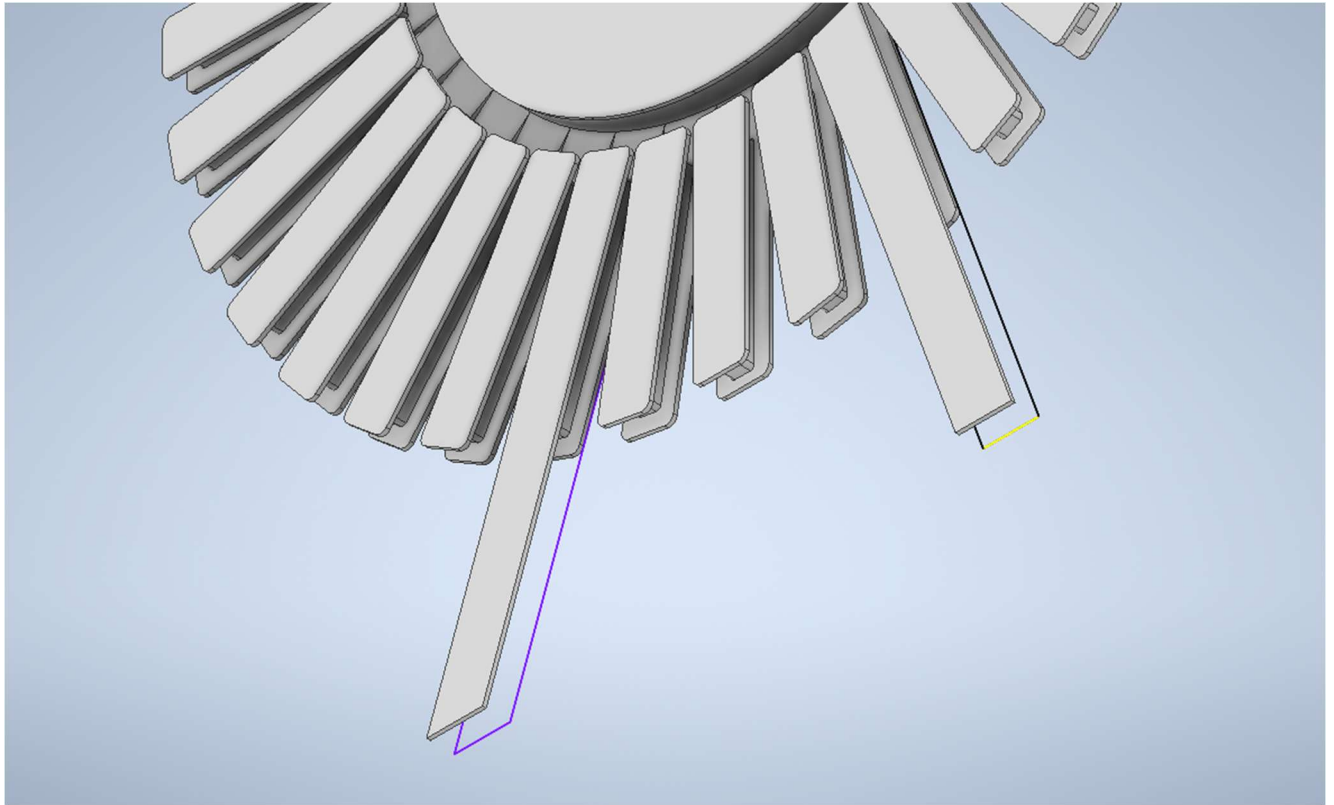
Als laatste werd er een gat gecreëerd van 11 mm in het midden van de stator waar de as vlotjes door kan lopen zonder in contact te komen met de stator, figuur 23.



Figuur 23: Centrum gat, Bron: eigen werk

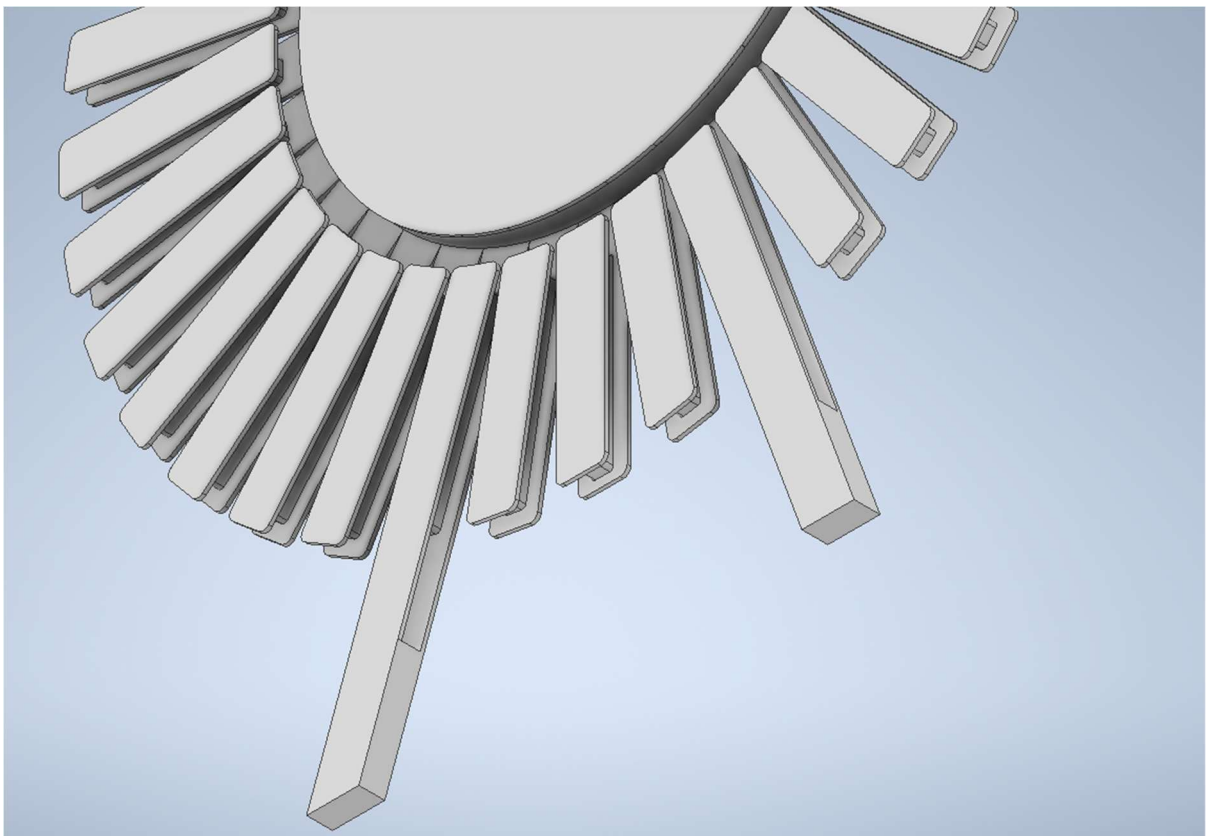
3.3 Steunpalen tekenen

Om de stator te kunnen bevestigen in het model van de golfenergieomzetter werd besloten om deze te bevestigen aan de bodemplaat door middel van 2 steunpalen. Deze steunpalen bestaan uit het verlengen van de buitenkant van de statorsloten en deze daarna te “extruderen” met 1 mm, zoals te zien op onderstaande figuur 24.

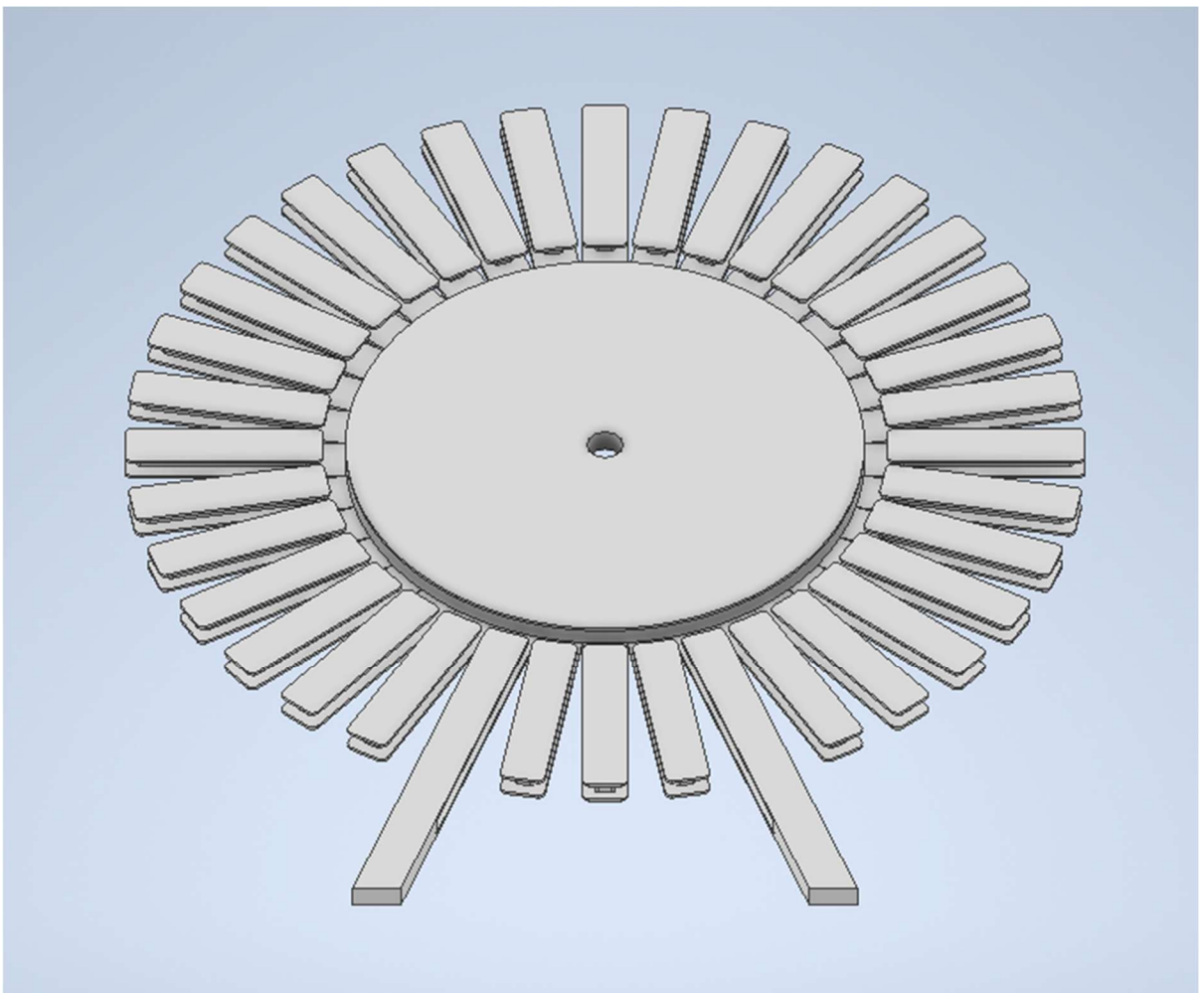


Figuur 24: Tekenend steunpalen, Bron: eigen werk

Vervolgens werd er ter hoogte van 3 cm vanaf de bodem gezien een kleiner parallellogram getekend op de uitstekende latten om deze helemaal op te vullen ter extra versteviging. Het idee is om vervolgens deze verstevigde bodem te gebruiken om de stator in het model te bevestigen door een vijs te boren of het vast te lijmen. In beide gevallen zal het ook nodig zijn om houten latjes aan weerskanten van deze steunpalen te plaatsen voor het creëren van extra versteviging en een betere stabiliteit aangezien het materiaal vrij dun is, slechts 1 mm. Het eindresultaat van deze stappen valt te zien op onderstaande figuur 25. Het volledige eindresultaat van de stator is zichtbaar op figuur 26.



Figuur 25: Verstevinging steunpalen, Bron: eigen werk



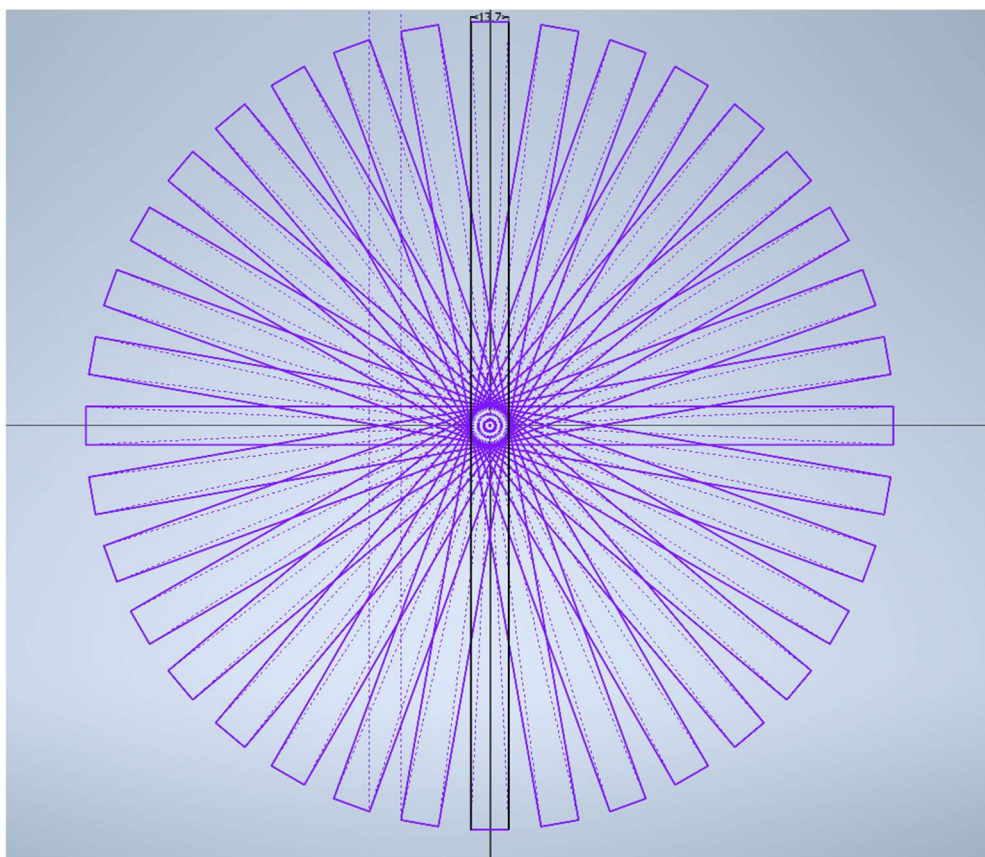
Figuur 26: Finaal ontwerp Stator, Bron: eigen werk

3.4 Herontwerpen stator

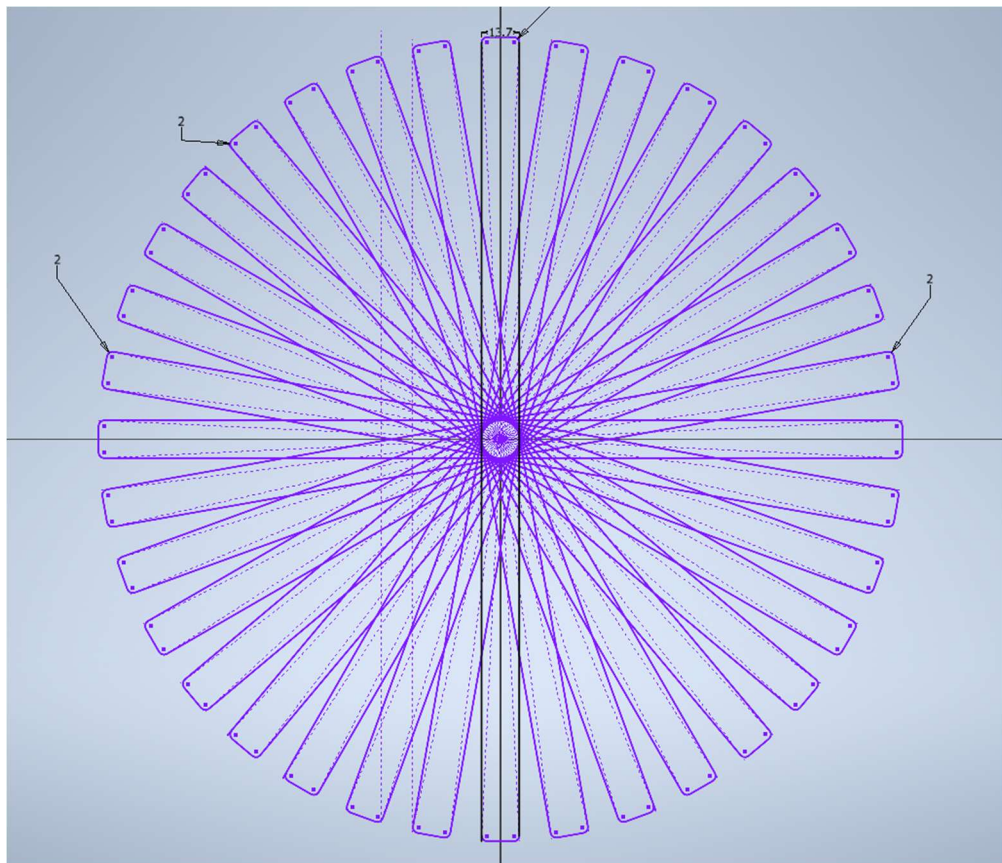
Bij het printen van de stator is ontdekt dat dit ontwerp niet ideaal was. Bij het printen van de stator liep het namelijk mis door verschuivingen van de printnaald en het krommen van de statorplaten vanwege de zeer beperkte dikte en de warmte. Om deze problemen op te lossen werd besloten om de stator te herontwerpen en van de gelegenheid gebruik te maken om een paar aanpassingen door te voeren. Zo zal de stator nu opgesplitst worden in een bodem- en bovenplaat om het wikkelen hiervan makkelijker te maken. In beide platen zullen uitsparingen gemaakt worden om deze vlot en precies in elkaar te laten passen. Ook de steun werd herwerkt om de stevigheid en stabiliteit te verbeteren.

3.4.1 Ontwerpen bovenplaat stator

Eerst werd de bovenkant van de stator ontworpen. De eerste stap hiervoor was het uittekenen van de 36 latjes waarop de spoelen geplaatst werden met een lengte van 291 mm en een breedte van 13,7 mm. Zie figuur 27. Vervolgens werden deze latjes terug afgerond met de “filet” functie op 2mm, figuur 28.

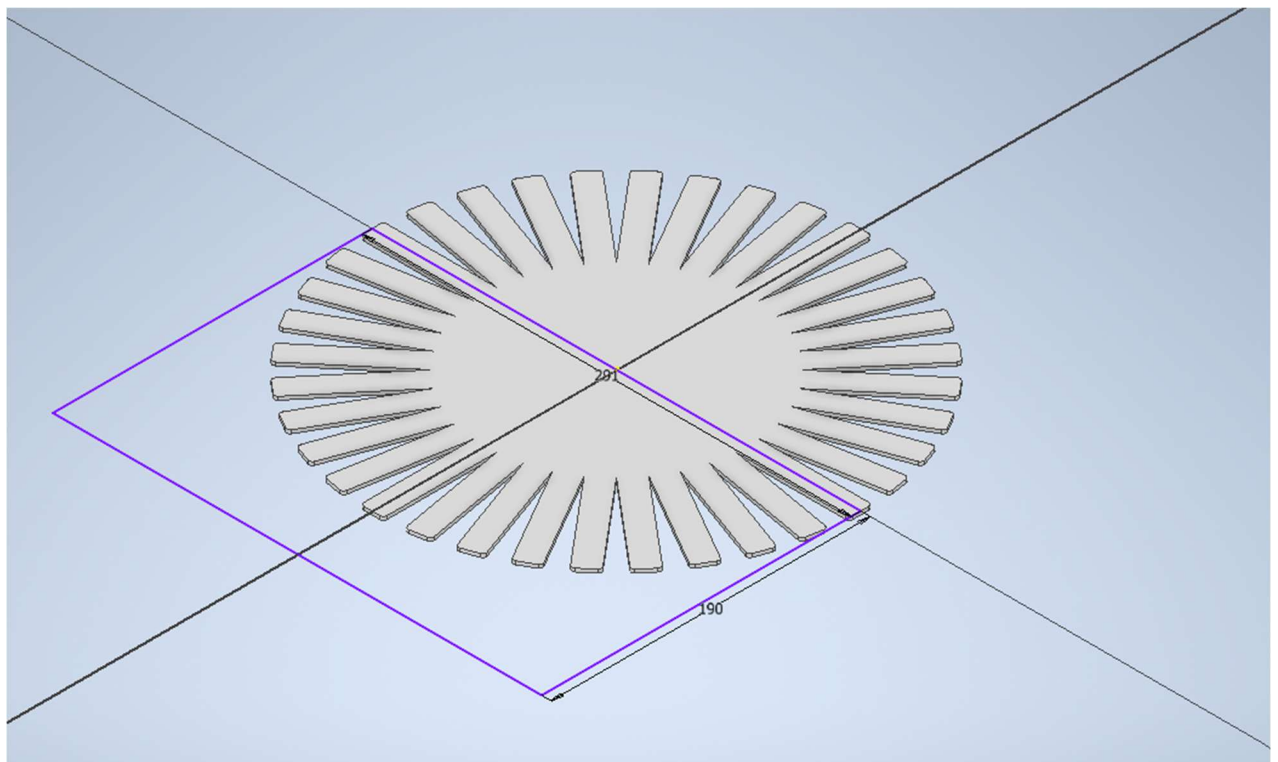


Figuur 27 Herontwerp Stator, Bron: eigen werk



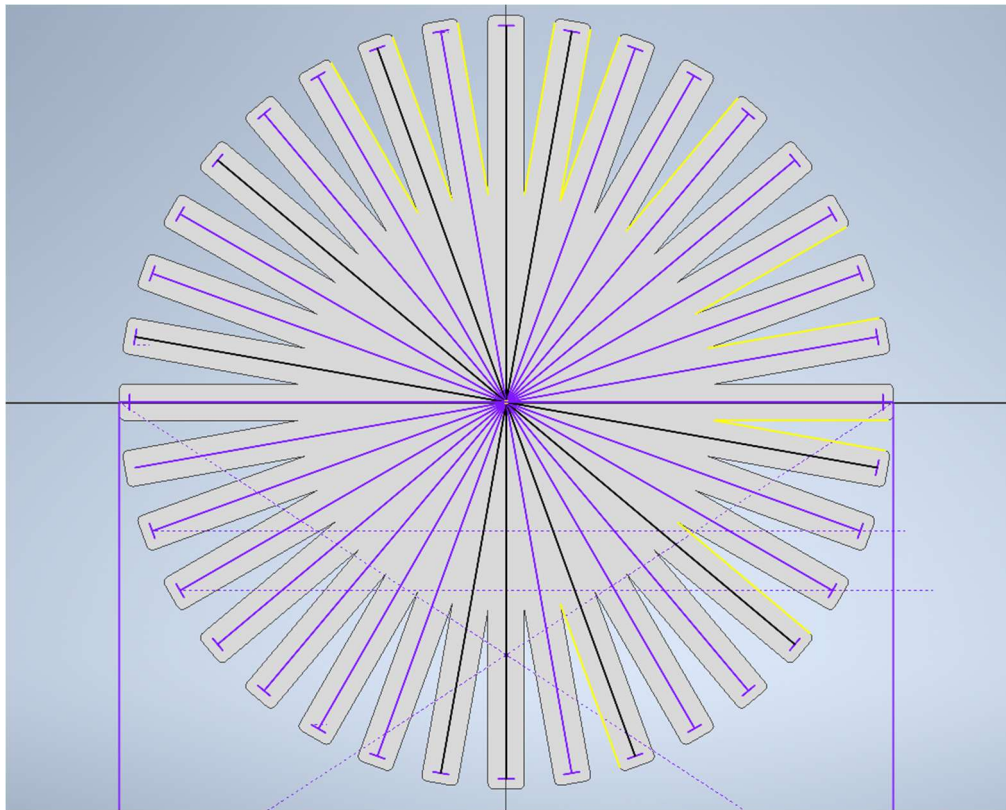
Figuur 28: Afronden basislatten, Bron: eigen werk

Vervolgens werd de basis uitgetekend als een rechthoek van 291 mm op 190 mm, en werden de latjes “extruded” met deze keer 2 mm voor extra stevigheid, figuur 29.



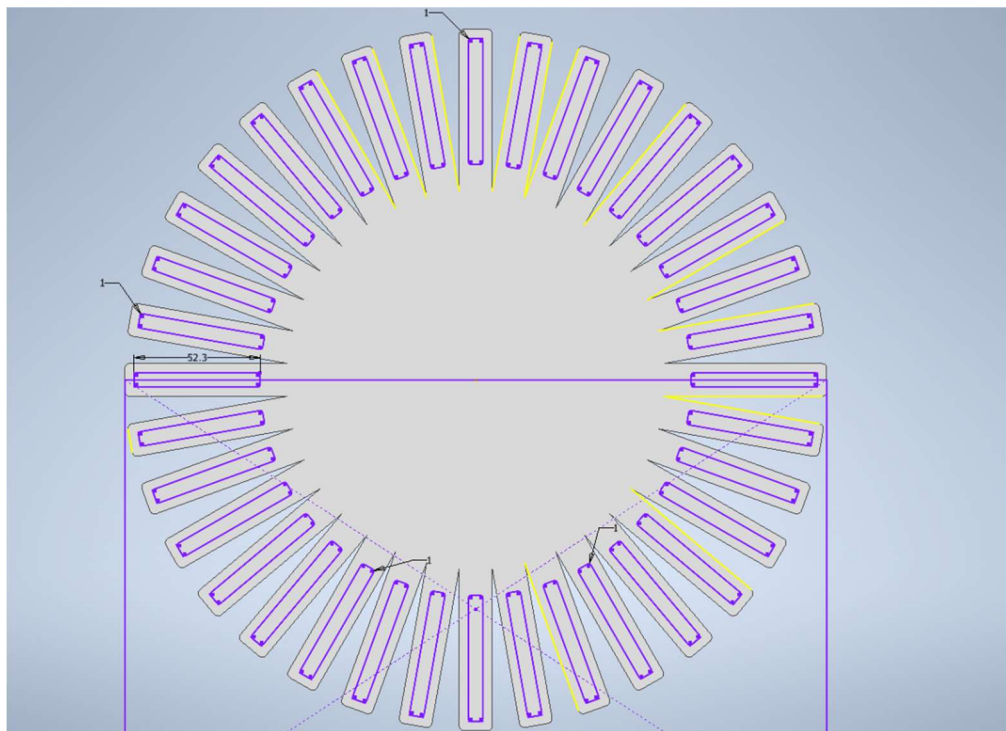
Figuur 29: Statorbasis tekenen, Bron: eigen werk

Hierna werd op de latjes van de stator de hulplijnen uitgetekend voor het kunnen tekenen van de blokjes, zie figuur 30.



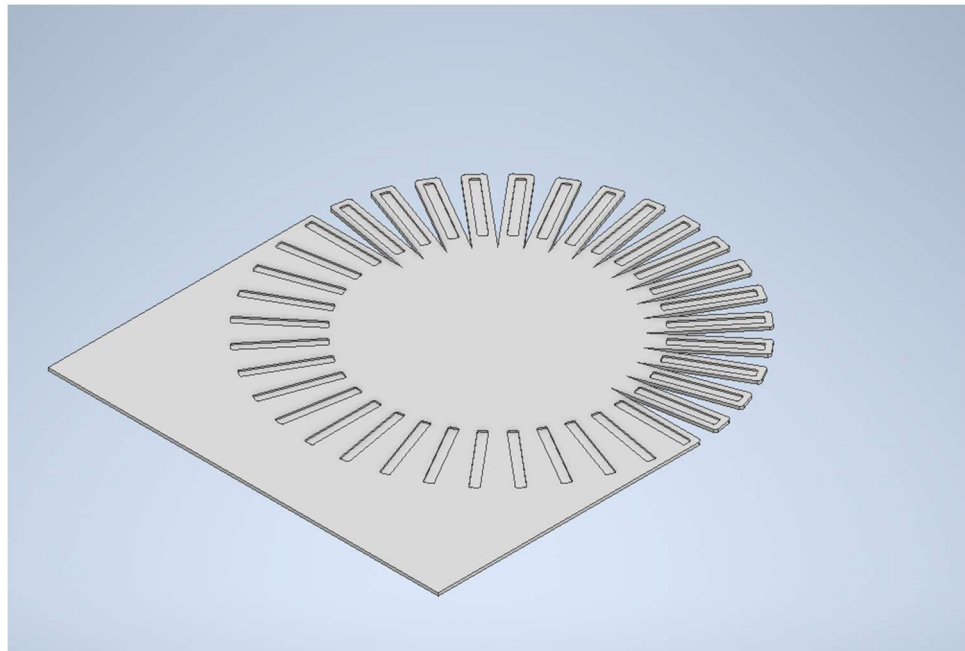
Figuur 30: Teken en hulplijnen, Bron: eigen werk

Met behulp van deze hulplijnen werden vervolgens de rechthoeken voor het rondwikkelen van de koperdraad getekend, met een lengte van 52,3 mm. Deze rechthoeken werden vervolgens ook afgerond met de “filet” functie, op 1 mm. Deze stap valt te zien op figuur 31.



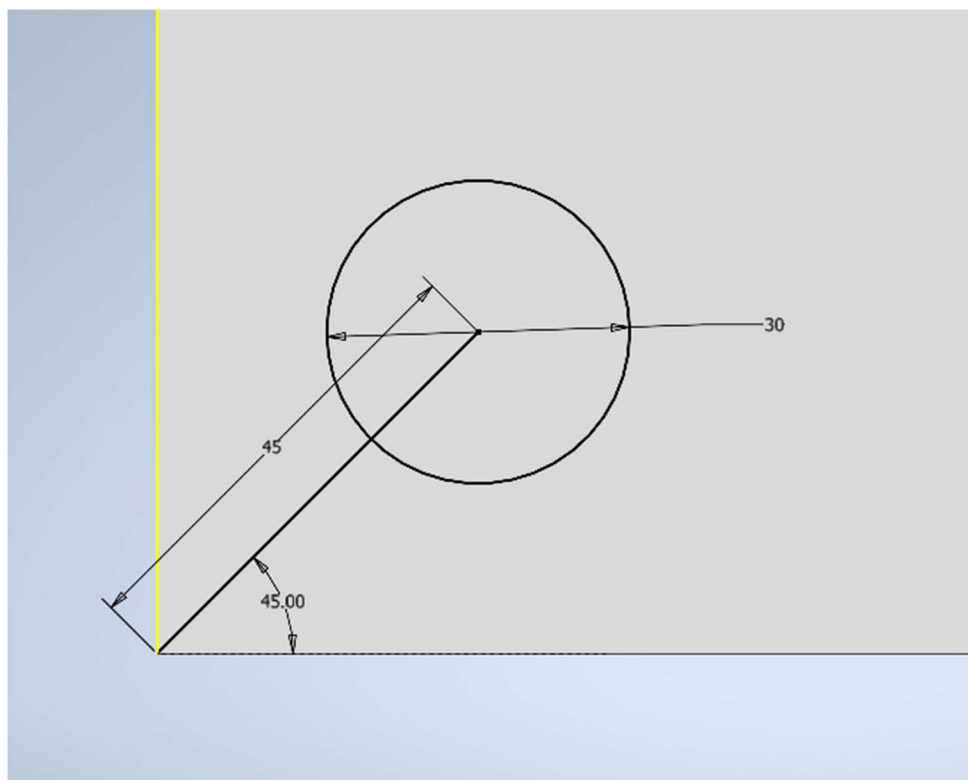
Figuur 31: Teken en rechthoeken, Bron: eigen werk

Nu dat alles uitgetekend was kon door middel van de “extrude” functie de basis een dikte gegeven worden van 2 mm en de rechthoekjes een uitsparing van 1 mm zodat de rechthoekjes op de bodem hier mooi in zouden passen. Zie figuur 32.



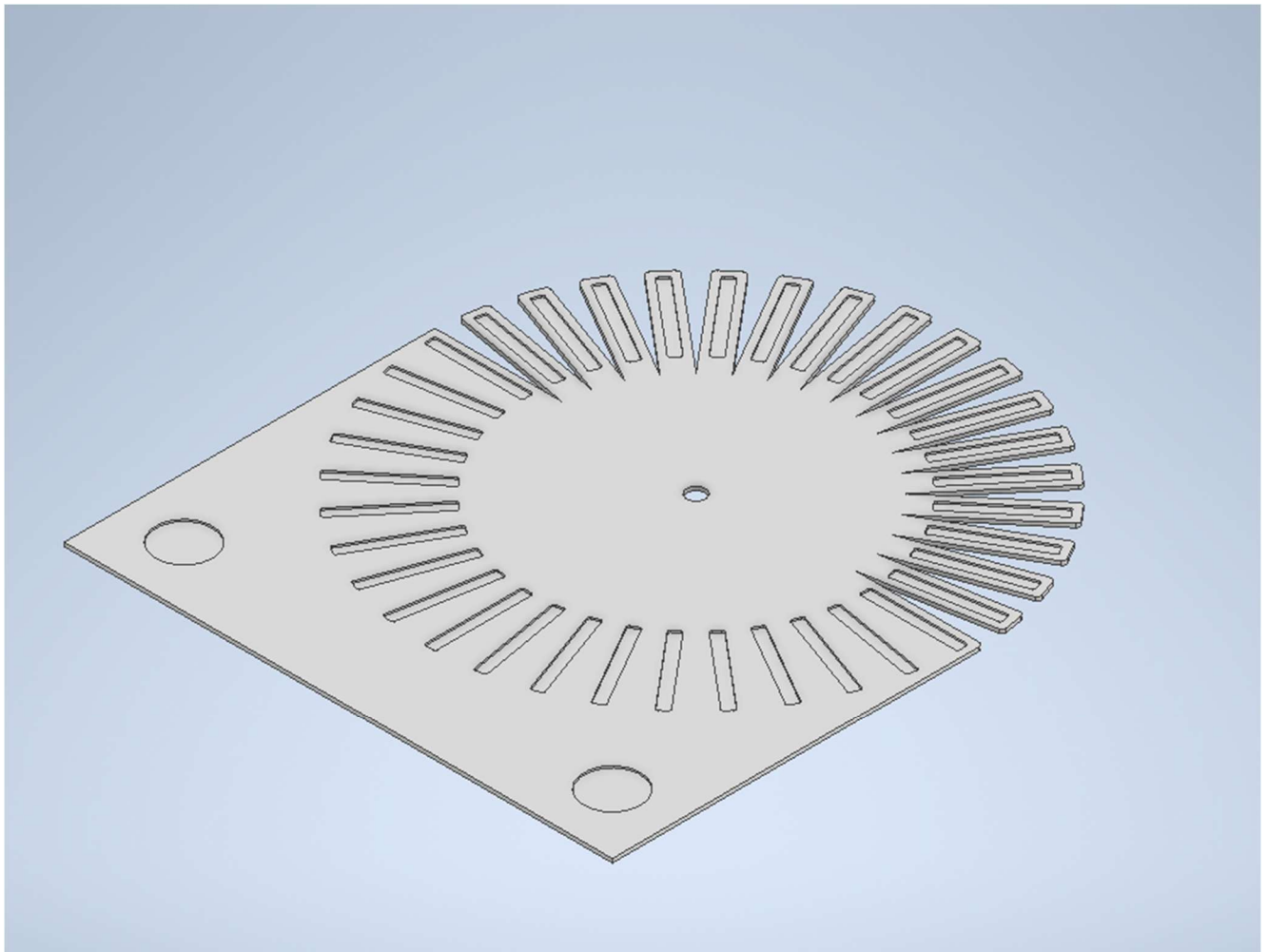
Figuur 32: "Extrude" van tekening, Bron: eigen werk

Vervolgens werden langs beide kanten van de basis een cirkel met een diameter van 30 mm getekend op een afstand van 45 mm onder 45°. Het doel van deze cirkels is om ervoor te zorgen dat ook langs de basis de 2 platen mooi in elkaar passen om een goede uitlijning te bekomen, figuur 33.



Figuur 33: Plannen cirkel, Bron: eigen werk

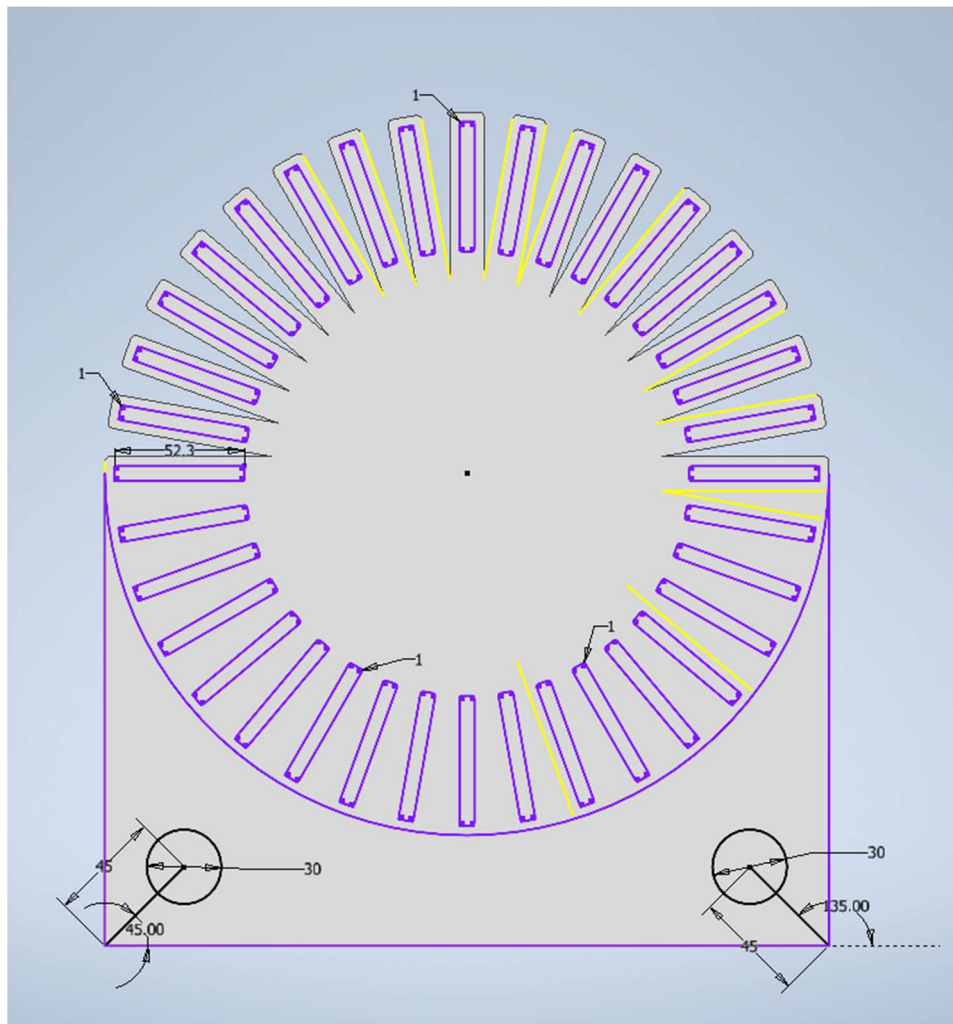
Tenslotte werd op de plaats van de cirkels eveneens een uitsparing gemaakt van 1 mm en werd er in het centrum een gat met een diameter van 10 mm voorzien waar de as vlot door kan lopen. Het eindresultaat valt te zien op figuur 34.



Figuur 34: Eindresultaat bovenplaat stator, Bron: eigen werk

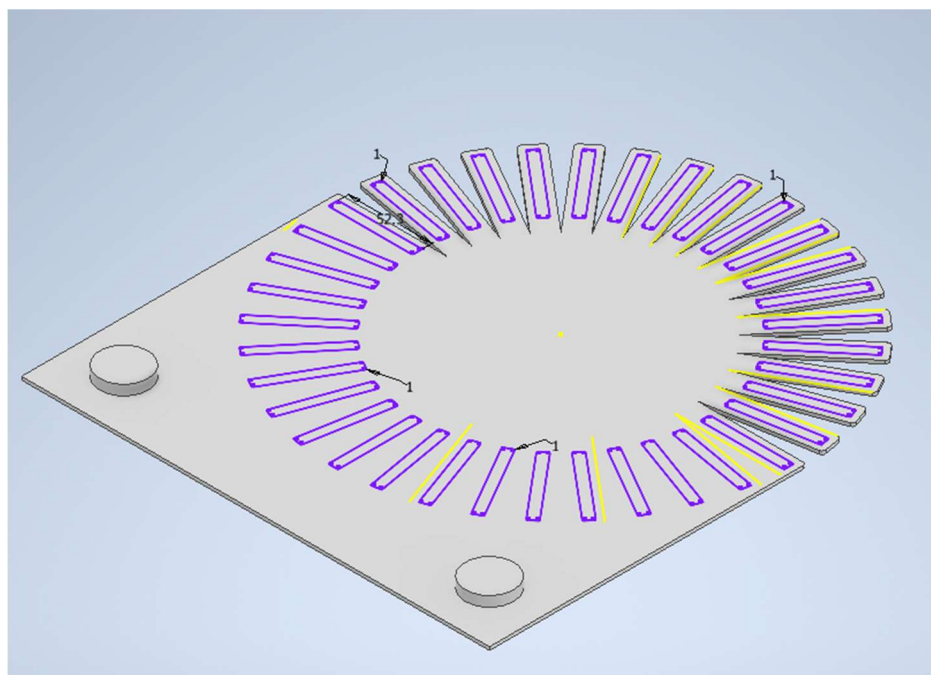
3.4.2 Ontwerpen bodemplaat stator

Voor het ontwerpen van de bodemplaat kon gebruik gemaakt worden van de tekening van de bovenplaat. Dit bestand werd gekopieerd en er werd verder ontworpen vanaf het punt te zien in onderstaande figuur 35.



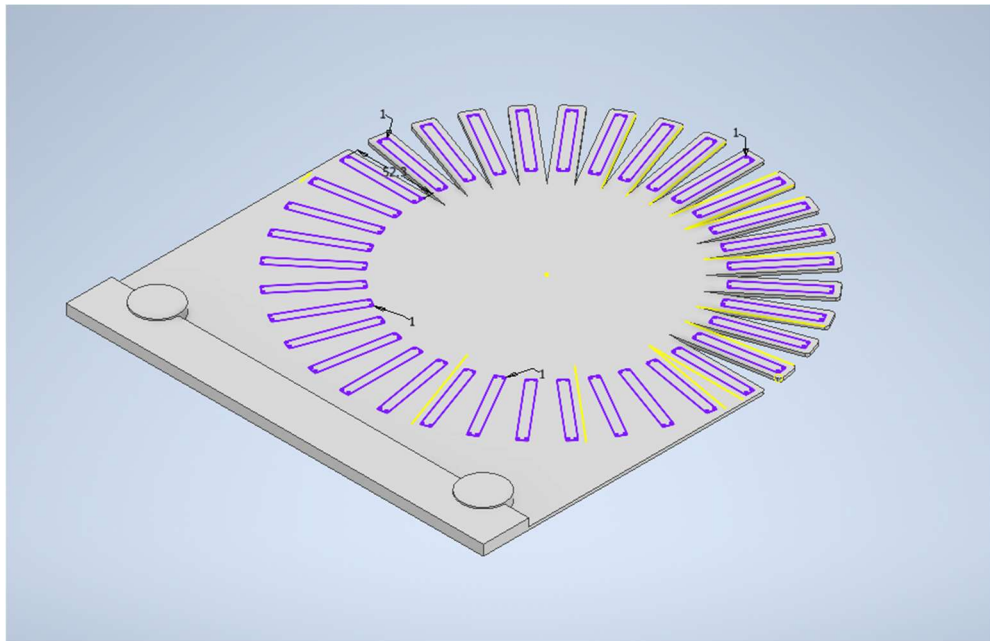
Figuur 35: Vertrekpunt bodemplaat stator, Bron: eigen werk

De cirkels werden vervolgens “extruded” met 6,25 mm om mooi in de bovenplaat van de stator te kunnen passen met 1 mm en om nog genoeg ruimte over te laten voor de spoelen zelf. Deze stap valt te zien op figuur 36.



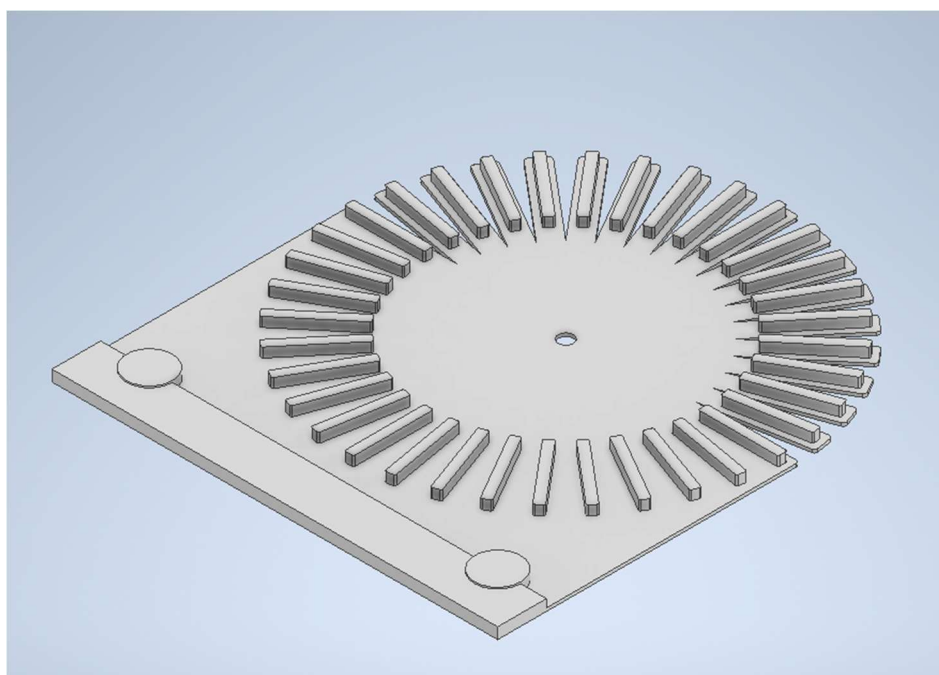
Figuur 36: Extruden cirkels, Bron: eigen werk

Vervolgens werd er op de basis een iets kleinere rechthoek getekend met een breedte van 30 mm om de onderkant van de constructie steviger te maken. Deze rechthoek werd vervolgens “extruded” met een hoogte van 5,25 mm om perfect tegen de bovenplaat aan te passen. Deze stap is zichtbaar op figuur 37.



Figuur 37: Versteving basis, Bron: eigen werk

Hierna was het tijd om de rechthoeken, waarrond de koperdraad gewikkeld moet worden om de spoelen te maken, te tekenen. Dit werd gedaan door de rechthoeken te “extruden” met 6,25 mm in de hoogte zodat deze mooi in de uitsparingen van de bovenplaat zouden passen. De laatste stap bestond eruit om ook hier een gat van 10 mm te voorzien in het center waar de as door kan lopen. Het finale ontwerp valt te zien in onderstaande figuur 38.



Figuur 38: Bodemplaat stator, Bron: eigen werk

3.4.3 Uiteindelijk model

Omwille van het blijven foutlopen van het printen van de statormodellen werd besloten om over te schakelen naar het lasercutten van twee houten modellen en hiertussen de spoelen te plakken. De spoelen zullen gewikkeld worden rond houten blokjes van 6 x 6 mm met een lengte van 52,3 mm. De wikkelingen zullen dus iets hoger zijn dan oorspronkelijk gepland. Echter werd er ook ondervonden dat er niet genoeg koperdraad was voorzien. Er werden dus 2 bobijnen koperdraad met een lengte van 721 m en een dikte van 0,315 mm besteld om genoeg koper te hebben voor alle spoelen te kunnen wikkelen. Aangezien de dikte en hoogte gewijzigd werd, is het ook mogelijk om meer wikkelingen te halen wat kan leiden tot een nieuw vermogen.

3.4.3.1 Nieuw vermogen

- 1) Nieuw aantal wikkelingen, N

$$\frac{6 \text{ mm}}{0,315 \text{ mm}} \times \frac{3,85 \text{ mm}}{0,315 \text{ mm}} \approx 19 \times 12 = 228$$

- 2) Nieuwe lengte van de draad, l

$$l = 36 \times 228 \times (0,0137 \text{ m} \times 2 + 0,06 \text{ m} \times 2) = 1209,86 \text{ m}$$

- 3) Nieuwe resistieve component, R

$$R = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{m} \times \frac{1209,86 \text{ m}}{9,62 \times 10^{-8} \text{ m}^2} = 216,316 \Omega$$

- 4) Nieuwe inductie van de spoelen, L

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \times 1 \times \frac{228^2 \times 0,0005082 \text{ m}^2 \times 36}{1209,86 \text{ m}} = 1,365 \times 10^{-6} \text{ H}$$

- 5) Nieuwe inductieve component, X

$$X = 2\pi \times 40 \text{ Hz} \times 1,365 \times 10^{-6} \text{ H} = 3,43 \times 10^{-4} \Omega$$

- 6) Nieuwe impedantie, Z

$$Z = \sqrt{216,316 \Omega^2 + 3,43 \times 10^{-4} \Omega^2} = 216,316 \Omega$$

7) Nieuwe opgewekte stroom, I

$$I = \frac{0,248 \text{ T} \times 0,0005082 \text{ m}^2 \times 36 \times 10,47 \text{ rad/s} \times 228}{216,316 \Omega} = 0,05 \text{ A}$$

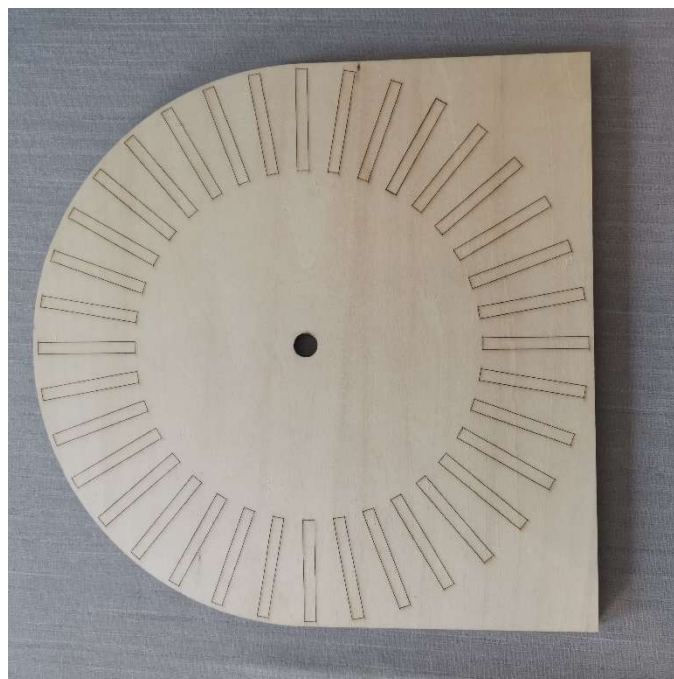
8) Nieuw opgewekt vermogen, P

$$P = \sqrt{3} \times 12 \text{ V} \times 0,05 = 1,04 \text{ W}$$

Uit de nieuwe berekeningen blijkt dus dat het extra aantal wikkelingen weinig effect zal hebben op de verwachte vermogensoutput.

3.4.3.1 Uiteindelijk stator model

Het uiteindelijke statormodel zal dus bestaan uit 2 houten platen, die “gelasercut” werden op maat en een graving om aan te duiden waar de spoelen geplakt moeten worden. De blokjes voor de spoelen werden op maat gezaagd op afmetingen van 6 x 6 x 52,3 mm uit afvalhout van de schrijnwerker. Het doel is nu om de spoelen te wikkelen en alles vervolgens samen te plakken. Deze constructie moet dan vervolgens op een houten basis gezet worden om stabiel in het model voor de golfenergie omzetter geplaatst te kunnen worden. Nu alle onderdelen ontworpen zijn kan het fabriceren van de generator beginnen. De uiteindelijke platen uit hout zijn zichtbaar op onderstaande figuur 39.



Figuur 39: Houten Statormodel, Bron: eigen werk

4. Fabriceren Generator

Nu alle nodige berekeningen zijn uitgevoerd en de onderdelen ontworpen bestond de volgende stap eruit om de DRAFPM-Generator in praktijk te realiseren. Hiervoor moesten eerst de getekende modellen uitgeprint worden. Vervolgens worden de magneten in de rotor bevestigd en de spoelen gewikkeld. Als alle onderdelen voorbereid zijn kunnen deze uiteindelijk geïnstalleerd worden in het model zelf. Deze stappen worden individueel en gedetailleerd besproken in dit hoofdstuk.

4.1 Spoelen wikkelen

Het plan is om 36 spoelen te wikkelen rond houten blokjes van 6 mm x 6 mm met een lengte van 52,3 mm. Het bleek een hele uitdaging om de spoelen rond houten blokjes van 6 mm x 6 mm te wikkelen en van dit oorspronkelijke plan werd afgestapt omdat het met de hand nagenoeg onmogelijk was om dit precies uit te voeren. Bij het wikkelen van spoelen is het namelijk belangrijk dat de koperdraad mooi parallel naast elkaar loopt om de kans op kortsluitingen en verstoringen in het magnetisch veld te verkleinen. Er werd dus overgeschakeld naar blokjes van 6 mm x 17 mm. Het wikkelen van de spoel hierop verliep eveneens moeizaam maar toch iets vlotter. Een afgewerkt resultaat hiervan valt te zien in figuur 40. Zoals te zien op de foto, is het wikkelen van de spoel op deze manier nog steeds niet mooi parallel en dus niet naar wens. Het blijven tegenkomen van problemen bij het wikkelen van de spoelen op deze manier heeft ertoe geleid dat het huidige concept van een 3-fasige in ster geschakelde generator wordt heroverwogen.



Figuur 40: Spoel voor stator, Bron: eigen werk

Uit voorafgaand onderzoek, eveneens neergeschreven in deze thesis blijkt dat het ontwerpen van een 3-fasige in ster geschakelde DRAFPM-Generator een uitstekende optie is voor het opwekken van een elektrisch vermogen met behulp van de golfenergieomzetter. Het doel voor dit onderzoek is om met de gebruikte golfenergieomzetter 1W aan elektrisch vermogen op te wekken en hiermee eventueel een batterijpakket op te laden. Voor een dergelijk klein vermogen en het uitvoeren van deze toepassingen is het gebruik van een 3-fase systeem niet noodzakelijk en nodeloos ingewikkeld met een grotere kans op fouten zoals te zien in figuur 40 van de spoel.

Om dus de eenvoud van de constructie te vergroten, en zo ook de kans op mogelijke fouten in de uitvoering te vermijden wordt besloten om toch te opteren voor een 1-fase systeem.

4.1.1 Serpentine Coil

Nu er besloten is om over te stappen naar een 1-fasige uitvoering voor de DRAFPM-Generator is het mogelijks een betere keuze om terug voor het gebruik van een “Serpentine Coil” te opteren. Het gebruik van dit type spoel leidt zoals eerder vermeld tot een verlaging van de gebruikte hoeveelheid koper door de hoeveelheid inactief materiaal te verkleinen. De grootste moeilijkheid bij het gebruik van dit type spoel was het creëren van een perfecte verschuiving van 120°, iets dat bij een 1-fase systeem niet van toepassing is. Het wikkelen van dit type spoel is ook veel eenvoudiger aangezien men hiervoor slechts 1 grote spoel moet wikkelen en deze vervolgens omplooien om in de stator te passen. Er moet wel opgelet worden om bij dit omplooien de spoel niet te beschadigen om kortsluitingen te vermijden. De grootste moeilijkheid was de exacte lengte van de spoel te bepalen. Voor het wikkelen van de spoel werd er eerst een testversie gemaakt rond 2 nagels die 125cm uit elkaar stonden. Deze versie paste echter niet rond de statorsloten en was 5cm te kort. Er werd vervolgens dus een 2^{de} versie gemaakt met deze keer de nagels 128 cm uit elkaar om zo een spoel te maken die 6cm langer was. Deze versie werd gemaakt met de volledige 721m en was dus ook dikker dan de vorige. Deze extra dikte zorgde ervoor dat de spoel minder flexibel was en daardoor ook niet paste met een opmerkelijk verschil van 5 centimeter te kort. Dit zorgde voor een vertraging van een aantal dagen aangezien er een nieuwe koperrol besteld moest worden. Na levering werd een



Figuur 41: Spoel wikkel constructie, Bron: eigen werk

nieuwe spoel vervaardigd waarbij de nagels deze keer 135 cm uit elkaar werden geplaatst om voldoende marge te garanderen. De constructie gebruikt voor het wikkelen van de spoelen is te zien op figuur 41. Bij het wikkelen van deze spoel werd zowel aan het uiteinde als aan het begin een meter koperdraad overgelaten om de aansluitingen van de generator op een belasting te kunnen voorzien. Vervolgens werd deze spoel in de stator ingebracht en werd de stator dichtgeplakt zoals te zien op onderstaande figuur 42. Om dit ordelijk en netjes te kunnen doen wordt de spoel bijeengehouden met isolatietape, die op regelmatige afstanden werd gekleefd.



Figuur 42: Plakken van de stator en inbrengen van de spoel, Bron: eigen werk

4.2 Magneten bevestigen

Nu de stator is afgerond kon er overgestapt worden op het in elkaar zetten van de rotor. De eerste stap hiervoor was de gaten in het midden vergroten met schuurpapier aangezien deze kleiner dan 8mm waren. Het originele idee om de rotors met draad te bevestigen aan de as was niet meer mogelijk aangezien deze uit hout waren geprint en het niet mogelijk is om draad in hout te tappen. Eens de gaten groot genoeg waren voor de as om door te passen werden de 2 rotor onderdelen aan elkaar bevestigd door middel van houtlijm. Eens de lijm gedroogd was werden de magneten aangebracht in de hiervoor voorziene sloten. Het was belangrijk dat de magneten alternerend in de noord en zuid richting geplaatst werden voor het bekomen van een frequent wisselend magnetisch veld. Eerst werden de magneten in de noordelijke richting geplaatst en gemarkeerd met een N. Vervolgens werden de aanvullende sloten opgevuld met magneten gepositioneerd met de zuidpool naar omhoog. Het volledige resultaat valt te zien op onderstaande figuur 43.



Figuur 43: Afgewerkte rotorconstructie, Bron: eigen werk

4.3 Nieuwe vermogensberekening

Omwille van deze nieuwe constructie, moest ook het verwachte te bekomen vermogen opnieuw berekend worden. Hierbij werd vertrokken vanuit het aantal wikkelingen. Het aantal wikkelingen kan bepaald worden met behulp van de lengte van de koperdraad en de afstand van de nagels.

$$N = \frac{721 - 2 \text{ m}}{1,35 \text{ m} \times 2} \approx 266$$

Van de originele 721 m wordt 2 m afgetrokken aangezien er 2 m overgehouden werd om de connecties te maken. Het uitvoeren van deze berekening geeft ons 266 wikkelingen.

Vervolgens kan de spanning berekend worden met behulp van volgende formule (LeVasseur, 1998).

$$E = 4,44 \times f \times N \times \Phi$$

$$E = 4,44 \times 40 \text{ Hz} \cdot 266 \times 0,00028735 \text{ Wb} = 13,57 \text{ V}$$

Dit geeft ons een nieuwe verwachte spanning van 13,57 V, wat iets hoger ligt als de oorspronkelijk beoogde 12 V maar wel nog aanvaardbaar is. Nu de spanning gekend is moet de impedantie van de wikkeling bepaald worden.

Aangezien de gebruikte koperdraad een doorsnede heeft van 0,315 mm moet ook de oppervlakte van de draad opnieuw berekend worden

Nieuwe oppervlakte draad, A_w

$$A_w = \pi \times \left(\frac{0,000315}{2} \right)^2 = 7,79 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

Nieuwe resistieve component, R

$$R = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{m} \times \frac{719 \text{ m}}{7,79 \times 10^{-8} \text{ m}^2} = 158,75 \Omega$$

Uit voorgaande berekening is gebleken dat de inductie weinig effect heeft op de totale impedantie. Om onnodige complexiteit te vermijden zal voor deze berekening enkel de resistieve component in rekening gebracht worden. Nu alle gegevens berekend zijn kan het te verwachte vermogen berekend worden met onderstaande formule.

$$P = \frac{E^2}{Z}$$

$$P = \frac{13,57^2 V}{158,75 \Omega} = 1,17 W$$

Dit nieuwe vermogen is een verdubbeling van ons oorspronkelijk verwachte vermogen, maar het is belangrijk om mee te nemen dat deze berekening een zeer simplistische benadering is. Er wordt namelijk geen rekening gehouden met de luchtspleet of het feit dat de magneten en spoelen worden gescheiden doormiddel van een houten barrière. Iets wat ongetwijfeld ook effect zal hebben op het geleverd vermogen door de generator.

4.4 Constructie van de generator

Nu alle onderdelen uitzonderlijk afgewerkt zijn was de volgende stap om alles samen te brengen en zo een functionele generator te bekomen. Aangezien de onderdelen uit hout werden gemaakt

kon er geen draad meer in getapt worden. Het eerste idee was om een stoppermoer te lijmen aan de rotors om deze met behulp van draad te bevestigen. Deze manier bleek al snel geen geschikte oplossing om dat de te lijmen oppervlakte op de moer te klein was om het gewicht van de rotor te kunnen dragen. Als oplossing werd er dus geopteerd om met behulp van rondellen en een stoppermoer de rotor zo dicht mogelijk bij de stator op de as vast te klemmen, zie figuur 44. Alhoewel deze manier erin slaagde om de rotors succesvol op de as te bevestigen creëerde het echter ook heel veel wrijving



Figuur 44: Bevestiging van de rotor, Bron: eigen werk

tussen stator en de rondellen waardoor het model een te grote wrijvingskracht moest overwinnen om te kunnen draaien. Om dit probleem op te lossen werden er 3 kogellagers tussen de respectievelijke rondellen voor elke rotor geplaatst om zo de wrijving te verminderen. Dit vereiste een kleine aanpassing aan de stator aangezien deze een oorspronkelijk gat met een diameter van 10 mm had. Dit gat werd uitgeboord tot 22 mm zodat de kogellagers hier precies in pasten. Deze stappen zijn terug te vinden op figuren 45 en 46.



Figuur 46: Vergroten centergat stator, Bron: eigen werk



Figuur 45: Kogellagers, Bron: eigen werk

De constructie met de 3 kogellagers zorgde ervoor dat de rotors vrij rond konden draaien. Tussen de lagers en de rotors werd langs elke kant 3 rondellen met een dikte van 1,5 mm gestoken. Wetende dat de dikte van de houten plaat 5 mm is en de lagers elk 7 mm dik zijn geeft dit ons een luchtspleet van:

$$\left(\frac{7 \text{ mm} \times 3}{2} + 1,5 \text{ mm} \times 3 \right) - 6 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$$

De breedte van de luchtspleet is dus 7 keer groter dan oorspronkelijk verwacht, wat ook zeker zijn invloed zal hebben op het geleverd vermogen van de generator. Alvorens alles op de as werd uitgebracht werd deze ook op maat gezaagd. De draadstang van M8 werd op lengte gezaagd van 25 cm zodat deze nog in het model van de golfenergieomzetter zou passen. Bij het inspannen van de rotors is het ook belangrijk dat deze correct afgelijnd staan zodat de noord- en zuidpolen respectievelijk tegenover dezelfde pool staan van de andere rotor om zo te garanderen dat elk deel van de spoel dezelfde flux verandering meemaakt en hier geen destructieve interferentie optreedt. De complete constructie van de generator is te zien in figuur 47.



Figuur 47: Constructie van de generator, Bron: eigen werk

5. Testen van de generator

Nu de constructie van de generator compleet is kon deze een eerste keer getest worden om te weten te komen welk vermogen de generator nu effectief kan leveren. In dit deel zullen deze testen van de generator besproken worden, maar ook de aanpassingen die aan het model werden aangebracht om betere resultaten te bekomen.

5.1 Test oorspronkelijke constructie

De eerste test die werd uitgevoerd was het meten van de spanning met een multimeter. Deze test werd uitgevoerd om te weten te komen welk vermogen de DRAFPM-generator kan leveren zonder deze hiervoor in het model te moeten installeren. De as werd ingespannen in een elektrische boormachine om zo de as te laten ronddraaien. De koperdraad voorzien voor de aansluiting werden verbonden aan de meetnaalden van de multimeter. Deze werd op de mV, wisselspanningstand gezet. De meting zelf gaf een lezing van slechts 20 mV, wanneer de boormachine op een laag toerental draaide. Bij het verhogen van het toerental werd erin geslaagd om tot 50 mV te gaan wat nog steeds veel te weinig is. Er moest dus bekeken worden welke mogelijke aanpassingen er aan de generator konden worden gedaan om de spanning en de efficiëntie van het model te verhogen.

5.2 Test enkelvoudige generator

Zoals eerder vermeld is de luchtspleet tussen de spoelen en de magneten een belangrijke factor bij het ontwerpen van een Axiale flux generator. Het gebruik van de houten stator geeft echter een luchtspleet van 7,3 mm, deze luchtspleet is dus veel te groot voor het bekomen van een efficiënt model. Er werd besloten om een houten plaat te verwijderen en te werken met slechts 1 rotor en deze zo dicht mogelijk bij de wikkelingen te proberen krijgen en zo de luchtspleet zo klein mogelijk te maken. Het model wordt dus aangepast van een DRAFPM lay-out naar een SAFPM lay-out, met slechts 1 stator en 1 rotor.

Het model werd opnieuw gemonteerd met een zo klein mogelijke luchtspleet om de efficiëntie zo hoog mogelijk te houden. Deze aangepaste versie van de generator valt te zien in figuur 48. Deze generator werd opnieuw getest en gaf een beduidende verbetering aan van 200 mV ten opzichte van de hiervoor gemeten 20 mV. Bij het verhogen van het toerental van de boormachine kon er een maximale spanning gemeten worden van 0,5 V. Dit is nog steeds heel wat minder dan de voorspelde spanning maar toont wel aan dat het verkleinen van de luchtspleet een groot

effect heeft op de generator efficiëntie. Om het ontwerp dus nog verder te verbeteren werd er nagedacht over hoe de luchtspleet nog verder te verkleinen. Na verder bestuderen werd vastgesteld dat de wikkelingen niet overal even dicht bij de magneten op de rotor kwamen. Dit zorgde ervoor dat de luchtspleet op sommige plaatsen met een aantal mm groter was. Wat zoals aangetoond een nadelig effect heeft op de efficiëntie van de generator. Om dit probleem op te lossen werd besloten om de generator terug te demonteren en de wikkelingen te reviseren.



Figuur 48: SAFPM lay-out, Bron: eigen werk

5.3 Test verbeterde wikkelingen

Om het probleem van de onregelmatige luchtspleet op te lossen werd besloten om de wikkeling nog strakker bij elkaar te plakken door gebruik te maken van meer isolatietape om zo de koperdraad beter bijeen te houden. De spoel werd uit het model gehaald en opnieuw opgespannen tussen 2 nagels. Vervolgens werd er nieuwe isolatietape rond de spoel gewikkeld op verscheidene plaatsen om de koperdraad over heel de spoel zo goed mogelijk bijeen te houden. De oude tape werd op sommige plaatsen verwijderd en opnieuw gedaan om een zo egaal mogelijke dikte over de spoel te bekomen. Het doel van de extra tape is dat bij het omplooien van de spoel om deze in vorm te krijgen uitstulpingen vermeden worden waardoor de dikte van de spoel over heel de oppervlakte van de stator gelijkmatiger zou zijn. Aangezien de dikte van de stator nu aanmerkelijk minder is kon er opnieuw getest worden. Bij het testen van de generator met verbeterde wikkelingen gaf de multimeter op zeer hoge toerentallen een lezing aan van 1V en 0,4 V bij lagere toeren. De meetopstelling en resultaat zijn te zien in onderstaande figuur 49.



Figuur 49: Test met verbeterde wikkeling, Bron: eigen werk

Bij de constructie werden slechts 2 kogellagers gebruikt, 3 kleine rondellen en 1 grotere rondel, voor een betere verdeling van de krachten bij het inspannen. Wetende dat de dikte van de grotere rondel 2 mm bedraagt en de dikte van de houtenplaat bij de stator 5 mm kan de nieuwe luchtspleet berekend worden.

$$((2 \times 7) + (3 \times 1,5) + 2) - (5 + (2 \times 6)) = 3,5 \text{ mm}$$

Deze luchtspleet is echter nog steeds te groot en zou nog verder verkleind moeten worden. Wetende dat de dikte van de stator 17 mm bedraagt. Kan met de hoeveelheid rondellen gespeeld worden om de luchtspleet verder te verkleinen.

5.4 Verder verkleinde luchtspleet

Om te proberen de efficiëntie van de generator nog meer te verhogen werd de luchtspleet van de generator verkleind tot 1,5 mm. Dit werd bereikt door 1 kogellager met een dikte van 7 mm te vervangen door 2 kleine rondellen met een dikte van 1,5 mm en een grotere rondel met een dikte van 2 mm, wat in totaal uitkomt op 5 mm dus 2 mm minder. De generator werd opnieuw gemonteerd en getest. Het resultaat hiervan is te zien in onderstaande figuur 50.



Figuur 50: Testopstelling met verkleinde luchtspleet, Bron: eigen werk

Deze nieuwe test gaf ongeveer hetzelfde resultaat met een zeer minimale verbetering. Het verder proberen verkleinen van de luchtspleet zal dus weinig effect hebben en wordt ook moeilijk aangezien het rotorblad gekromd is wat ervoor zorgt dat het op sommige plaatsen in contact zou komen met de stator en zo de spoel kan beschadigen.

5.5 Test met verlaagd aantal magneten

Aangezien het verlagen van de luchtspleet niet leidde tot verbeteringen werd er geredeneerd dat de fout misschien in de constructie zelf zat. Zo zou het misschien mogelijk kunnen zijn dat de magneten te dicht bij elkaar staan wat zorgt voor een destructieve interferentie in het magnetisch veld en dus een zeer lage fluxverandering in de spoelen wat volgens de wet van Faraday zou leiden tot de lage spanningsopwekking. Er werd dus een nieuwe rotor geconstrueerd met 36 magneten, evenveel als het aantal spoelen. Deze keuze werd gemaakt gebaseerd op de video's van Robbert Murray Smith, (Robert Murray-Smith, n.d.). Deze wijziging heeft vooral als doel het model van de AFPMG te vereenvoudigen en om deze manier te weten te komen waar de fout ligt. Het testen van de generator met deze aanpassingen leidde echter tot hetzelfde resultaat. Hieruit kon dus geconcludeerd worden dat er iets mis was met de constructie van de generator zelf. Een mogelijkheid was dat de lak op de spoel zelf beschadigd was waardoor er ergens kortsluiting ontstond tussen de koperwikkelingen. Dit kon getest worden door gebruik te maken van de continuïteits-test op de multimeter. Deze zou namelijk een constante toon moeten maken als er geleiding is tussen deze uiteindes. Bij het testen

hiervan bleek dat dit niet het geval was en de spoel dus beschadigd was. Na deze ontdekking werd besloten om met een kleine rol koper van zo een 30m een tijdelijke spoel te maken om toch een idee te kunnen krijgen van wat de AFPMG zou kunnen produceren van spanning. De nieuwe spoel werd vervolgens gewikkeld, getest en in de stator aangebracht. Bij het testen van de generator leverde deze vervolgens 1,5 V, een veelbelovende stap om verder mee te gaan. Deze testopstelling is zichtbaar in figuur 51. Om de hoeveelheid opgewekte spanning nog te verhogen werd besloten om een oudere spoel, gebruikt als testversie voor de oorspronkelijke te gebruiken. Deze bevat wel een kleinere hoeveelheid aantal wikkelingen als de oorspronkelijke spoel van 721m, maar zou nog steeds een hogere hoeveelheid aan spanning kunnen produceren dan de testspoel van slechts 30m. Deze nieuwe spoel had een interne weerstand van $87,6 \Omega$, hiermee kon de hoeveelheid wikkelingen bepaald worden om toch een idee te krijgen voor de verwachtingen van de AFPMG.



Figuur 51: Testopstelling met 36 magneten en verkleinde spoel, Bron: eigen werk

Aantal wikkelingen, N

$$N = \frac{\frac{87,6\Omega}{1,72 \times 10^{-8}\Omega m} \times 7,79 \times 10^{-8}m^2}{1,25m} \approx 158$$

Frequentie met 36 magneten, f

$$f = \frac{100 \times 36}{120} = 30 \text{ Hz}$$

Nu het aantal wikkelingen en de frequentie bepaald is kan de verwachte spanning bepaald worden.

Geleverde spanning, E

$$E = 4,44 \times 30 \text{ Hz} \cdot 158 \times 0,00028735 \text{ Wb} = 6,07 \text{ V}$$

Verwacht vermogen, P

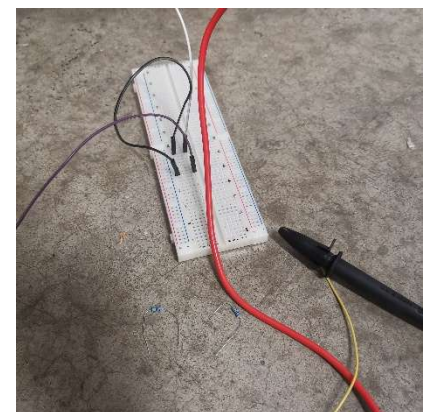
$$P = \frac{6,07^2 \text{ V}}{87,6 \Omega} = 0,42 \text{ W}$$

Uit deze berekeningen valt dus te zien dat het te verwachte doel van 1 W niet mogelijk is met de nieuwe spoel. Desondanks werden er toch nog testen gedaan om een idee te krijgen van de mogelijke verliezen. De spoel zelf werd eerst beter afgewerkt met tape om de wikkelingen goed bij elkaar te kunnen houden en vervolgens in het model van de stator geïnstalleerd. Bij het testen van deze spoel werd een gemiddelde spanning van 5,6 V, wat toch een aantal volt lager is als verwacht. Vervolgens werd ook de stroom geleverd door de generator gemeten met behulp van een multimeter. Deze was afhankelijk van de belasting en hoe hoger de belasting hoe lager de stroom was. De resultaten zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 4: Resultaten generatortest, Bron: eigen werk

Weerstand in Ω	Stroom in milliampère	Spanning in volt
420	12	5,6
310	15	5,6
90	45	5,6

Voor het verhogen van de weerstand werd gebruik gemaakt van weerstanden aangesloten op een “breadboard” in serie geschakeld met de generator. Voor de weerstand van 90 Ω werd de weerstand vervangen door een klein kabeltje om zo de interne weerstand van de generator van 87,6 Ω toch een klein beetje te verhogen, zie figuur 52. Echter uit deze resultaten valt te zien dat de generator zoals verwacht te weinig stroom levert om bij deze spanning 1 W te kunnen produceren, met een vermogen van slechts 0,2 W in



Figuur 52: Belasting van de generator, Bron: eigen werk

onbelaste toestand. Om te proberen om dit te verhogen werd de rotor met 48 magneten terug geïnstalleerd in het model van de APMG. Echter met deze rotor werd er terug een extreem lage spanning gemeten van 400 mV. Hoogstwaarschijnlijk zal er dus iets mis zijn met de plaatsing van de magneten in de rotor aangezien in theorie het sterkere magnetisch veld van deze rotor zou moeten leiden tot een hogere spanningsopwekking en meer stroom door de spoelen omwille van de grotere fluxverandering. Ook werd er nog geprobeerd om de luchtspleet te verkleinen door een kleine rondel minder tussen de stator en rotor te plaatsen, maar deze verkleining had geen effect. De enige mogelijk manier om toch aan 1 W te geraken zou zijn door het toerental te verhogen, maar aangezien dit de limiterende factor is van onze AFPMG is dit geen uitvoerbare oplossing.

6. Verder onderzoek

In dit deel wordt besproken hoe er verder gegaan kan worden met dit onderzoek in de toekomst. Alhoewel het origineel doel niet behaald is zijn er toch een paar zaken die meegenomen kunnen worden naar de toekomst toe om bij verder onderzoek tot een succesvol resultaat te komen. Zo zijn er een paar kritische punten, zoals het gebruikte materiaal, het aantal magneten en de hoeveelheid wikkelingen. Elk van deze punten zal in dit hoofdstuk kort toegelicht worden om te reflecteren op wat er beter kan naar de toekomst toe.

6.1 Gebruikt materiaal

Voor het construeren van de AFPMG zijn eigenlijk 3 hoofdmaterialen gebruikt: Hout, koperdraad en neodymiummagneten. De koperdraad is het meest essentiële materiaal voor de werking van de generator en hieraan kan dus weinig worden aangepast. Het is vooral belangrijk dat er koperdraad gebruikt wordt met een voldoende grote doorsnede om de verwachte stroom aan te kunnen om oververhitting en zo beschadiging van het isolatiemateriaal te voorkomen. Ook moet er bij het wikkelen en het uitvoeren van de testen goed opgelet worden dat de draad niet beschadigd raakt aangezien dit zoals in het huidige geval kan leiden tot een kortsluiting in de spoel, wat deze onbruikbaar maakt. Voor de magneten wordt aangeraden om te werken met een zo sterk mogelijk magnetisch materiaal. Hiervoor zijn neodymium magneten wel degelijk geschikt en volgens verschillende bronnen de beste keuze (Shewane et al., 2014; Soderlund et al., 1996). Het is vooral het 3^{de} hoofdmateriaal, hout dat niet ideaal is voor de constructie van de generator. Het gebruik van de houten platen in het origineel model van de DRAFPMG zorgde voor een grote luchtspleet en een nadelige permeabiliteit voor het magnetisch veld om te penetreren. Ook waren de houten platen gekromd wat leidde tot een ongelijke luchtspleet op verschillende plaatsen wat een nadelig effect had op de efficiëntie van de generator. Hierdoor waren er namelijk bepaalde gebieden waar het magnetisch veld minder invloed had op de spoelen wat zorgde voor een kleinere fluxverandering. Een mogelijke verklaring voor het krommen van de platen is mogelijks omwille van de warmte die het hout ondergaat bij het “*lasercutten*”. Een ander mogelijk nadeel aan het gebruik van hout als kern is dat het de magnetische veldlijnen uit de magneten niet kan concentreren op de spoelen. Bij klassieke generators worden namelijk kernen gebruikt van magnetisch materiaal om de concentratie van veldlijnen beter naar de spoelen te geleiden. Hierdoor is er een grotere fluxdichtheid op de spoel en dus ook meer verandering wat zou leiden tot betere prestaties. Alhoewel het gebruik van een magnetische

kern kan leiden tot “cogging” zoals eerder onderzocht is het naar de toekomst toe toch een mogelijkheid om gebruik te maken van een magnetische kern aangezien er andere mogelijkheden zijn om het “cogging”-effect te verminderen. Dit is echter een afweging die gemaakt moet worden op basis van verschillende parameters zoals: de vermogensdichtheid van de generator, materiaalkost en constructiemogelijkheden.

6.2 Spoel en wikkelingen

Het originele ontwerp voor de generator was een 3 fasig-systeem met elke spoel zijn eigen statorslot. Alhoewel een 3-fasig systeem verschillende voordelen biedt zoals een stabielere en hogere vermogensoutput is de constructie van deze spoelen lastig zelf te realiseren en verhoogt het ook de kans op mogelijke fouten. Om deze redenen is er besloten om over te stappen naar het gebruik van een “*serpentine coil*”. Het gebruiken van deze spoel zorgde er natuurlijk ook voor dat er nu gewerkt werd met een 1-fasig systeem. Dit had als voordelen een simpelere constructie, kleinere kans op fouten en een vermindering van het gebruikte materiaal. Een mogelijke tussenweg naar de toekomst toe is om ook te werken met dit type spoel, maar dan in een 3-fasig systeem om zo de voordelen van beide te combineren. Dit kan gerealiseerd worden door 3 van dit soort spoelen bij wijze van spreken tegen elkaar te plakken en elke spoel 120° te verdraaien van elkaar. Dit brengt echter weer moeilijkheden met zich mee in de constructie van stator. Het aantal wikkelingen zelf wordt best zo hoog mogelijk gehouden. Een hoger aantal wikkelingen leidt namelijk tot meer spanning zoals aangetoond in het experiment met een verlaagd aantal magneten. Afhankelijk van het verkozen systeem zou er dan besloten kunnen worden om deze hoeveelheid wikkelingen gelijk te verdelen over de 3 verschillende spoelen of om alles in 1 spoel te wikkelen.

6.3 Aantal magneten

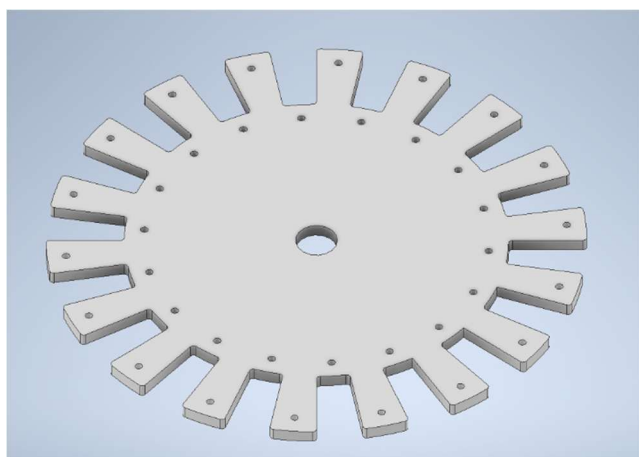
Tijdens de laatste test werd er vastgesteld dat de roterschijf met 48 magneten veel minder spanning opwekte dan deze met 36 magneten. Echter volgens de wet van Faraday zou dit niet het geval mogen zijn aangezien een groter aantal poolparen net zou zorgen voor een grotere verandering in magnetische flux en dus meer spanningsopwekking. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de magneten slecht gepositioneerd zouden staan ten opzichte van de spoel. Hierdoor is er slechte uitlijning van de magneten ten opzichte van de spoel. Een slechte uitlijning tussen spoel en magneten kan namelijk leiden tot destructieve interferentie en harmonische distorsie van het magnetisch veld. Deze ongewenste effecten zullen de magnetische veldsterkte aanzienlijk verminderen wat ervoor zorgt dat er uiteindelijk minder fluxverandering plaatsvindt en er dus minder spanning opgewekt zal worden. Ook kan een slechte uitlijning zorgen voor een

verhoogd aantal koperverliezen. Verschillende onderzoeken wijzen dan ook op het belang van een goede verhouding en uitlijning tussen de magneten en de spoelen.(Peng et al., 2023; Tobar et al., 2019). Voor het bekomen van een zo goed mogelijke fluxverandering is het belangrijk dat de verhouding tussen het aantal polen en het aantal spoelen een geheel getal is(Borsboom et al., 2024). In het geval van 48 polen is dit niet het geval en heeft de AFPMG een verhouding van 1,33 polen per spoel. Hierdoor zal er dus altijd een pool met tegenovergestelde polariteit deels inwerken op de spoel wat zorgt voor een destructieve interferentie in het magnetisch veld rondom deze spoel. Hierdoor zal het magnetisch veld afzwakken en zal er dus minder fluxverandering optreden wat leidt tot een lagere spanning. Bij 36 magneten is er een 1 op 1 verhouding en zal elke pool dus effect hebben op slechts 1 spoel op hetzelfde moment. Hierdoor treedt er in dit geval geen destructieve interferentie op en zal het magnetisch veld van de permanente magneten onverstoord inwerken op de spoelen. Naar de toekomst toe is het dus belangrijk om een goede verhouding tussen magneten en polen te respecteren om dit probleem te vermijden.

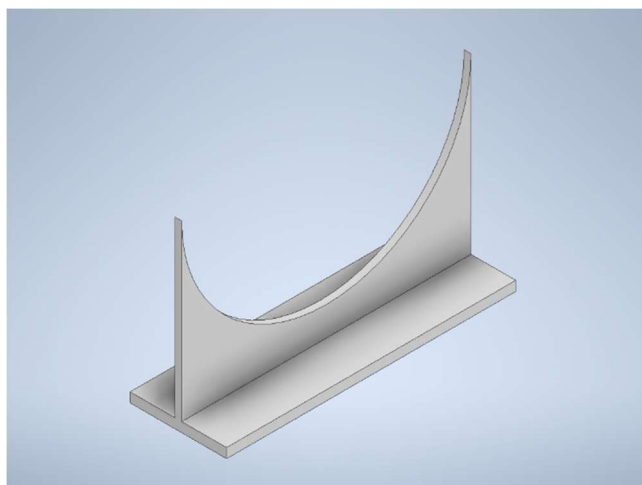
6.4 Nieuw ontwerp

Uit de verscheidene opmerkingen hierboven kan een nieuw ontwerp gemaakt worden voor de AFPMG. Het uitvoeren van de proeven besproken in hoofdstuk 5 heeft geleid tot de inzichten hierboven besproken. Deze inzichten werden dan ook meegenomen in het laatste ontwerp, dat gebruikt kan worden naar de toekomst toe als een vertrekpunt voor het realiseren van een efficiëntere AFPMG. Zoals besproken hierboven is het belangrijk dat de verhouding tussen magneten en spoelen een geheel getal blijft. Hierdoor zal het toekomstig model 36 magneten hebben op de rotor en 36 spoelen op de stator. De rotor zelf kan dus behouden blijven. Naar de toekomst toe wordt het nog steeds aangeraden om te werken met een dubbele rotor en dus nog steeds voor het gebruik van een DRAFPNG te gaan. Hierdoor is er namelijk een verdubbeling van het aantal magneten en dus ook van de magnetische veldsterkte. Een grotere magnetisch veldsterkte leidt dan weer tot meer fluxverandering, wat op zijn beurt zorgt voor een grotere opgewekte spanning. Een ander belangrijk detail is het bekomen van een zo klein mogelijke luchtspleet, best 1-3 mm om zo veel mogelijk magnetische veldlijnen te kunnen benutten. Omwille van deze reden wordt aangeraden om de onderdelen toch te 3D-printen aangezien dit zou leiden tot stevigere onderdelen. Ook moet het model van de stator aangepast worden. De toekomstige stator zou geen steunplaten meer mogen hebben aangezien dit zorgt voor een vergroting van de luchtspleet. Ook verandert het de permeabiliteit van de ruimte tussen magneet en spoel wat een nadelig effect heeft op de magnetische veldsterkte en de fluxdistributie. Een toekomstig statormodel zou dus geen steunplaten meer hebben maar

ondersteund worden door de as en een steun op de bodem om zo de spleet tussen spoel en magnetische polen zo klein mogelijk te houden. Een mogelijk ontwerp voor deze 2 onderdelen valt terug te vinden in onderstaande figuur 53 en figuur 54



Figuur 53: Toekomstig model stator



Figuur 54: Toekomstig model statorsteun

Op figuur 53 valt het nieuwe model voor de stator te zien. Hierbij is het de bedoeling om de spoel rond de tanden van de stator te leggen om zo terug tot een “*serpentine coil*” configuratie te bekomen. De kleine gaten bij de tanden hebben als doel dat hierdoor eventueel kabelbinders zouden komen om de spoel zo op de stator te bevestigen zonder deze tussen twee platen te moeten klemmen. Op deze manier zou de luchtspleet en de permeabiliteit hiervan zo gunstig mogelijk gehouden kunnen worden om zo verliezen hier te vermijden. Het grote gat in het midden van de stator heeft als doel dat hier een lager in zou kunnen passen om zo de stator op de as te laten steunen. Het onderdeel te zien op figuur 54 heeft als functie om de stator extra te ondersteunen en ongewilde rotatie van de stator tegen te gaan. Het gebruikt eigenlijk wrijvingskracht om de stator op zijn plaats te

houden. De halve cirkel is namelijk zo ontworpen dat een gewikkelde stator deze ruimte kan opvullen en rusten op de steun. Zo wordt de stator extra ondersteund wat belasting op de as vermindert en wordt deze tegelijkertijd op zijn plaats gehouden. Het is belangrijk op te merken dat deze modellen enkel een concept zijn en er bij de verdere uitwerking eventuele aanpassingen nodig zijn om een perfect model te bekomen. Voor een toekomstig model zou de hoeveelheid wikkelingen zeker niet lager mogen zijn dan het huidige model aangezien hier het gewilde vermogen, maar niet bereikt werd met een hogere frequentie. De hoeveelheid wikkelingen voor dit toekomstige model hangt af van de gewenste spanning, interne weerstand van de draad, lengte van de draad en grootte van de AFPMG zelf. Er zal dus een goede afweging gemaakt moeten worden tussen deze verschillende factoren voor het bekomen van een succesvol model.

Conclusie

Op basis van de uitgevoerde tests kan worden geconcludeerd dat het ontwerp van de generator voor het omzetten van golfenergie naar elektrische energie niet succesvol was, aangezien het doel om 1 W op te wekken met een zelfgebouwde generator niet werd bereikt. Desalniettemin zijn er enkele bevindingen gedaan die van belang kunnen zijn voor toekomstig onderzoek op dit gebied.

Het hoofdpunt om mee te nemen uit dit onderzoek is dat het belangrijk is om een generator te ontwerpen met een juiste hoeveelheid magneten en wikkelingen aangezien deze van cruciaal belang zijn voor het bekomen van een voldoende vermogen. Zo zijn er bij de huidige generator niet genoeg wikkelingen in de spoel om aan een laag toerental een voldoende hoge spanning op te wekken voor het bekomen van het gewenste vermogen. Uit de oorspronkelijke berekening werd verwacht dat dit wel het geval zou zijn met een verwachte output van 1,17 W exclusief mogelijke verliezen en efficiëntie verliezen omwille van de constructie. Helaas is deze spoel beschadigd geraakt en bestond de vervangspoel uit een lager aantal wikkelingen waardoor de verwachte hoeveelheid vermogen niet behaald kon worden. Toch is er door het uitvoeren van deze testen een aantal problemen ontdekt met de constructie van de generator. Zo is hout geen geschikt materiaal omwille van een te grote gevoeligheid bij het “*lasercutten*”. Hierdoor kromde de rotorschijven en ontstond er een niet-uniforme luchtspleet wat leidde tot verliezen op bepaalde plaatsen in de rotatie. Op deze plaatsen was de luchtspleet namelijk groter wat zorgde voor een slechtere fluxdistributie op de spoel en dus een kleinere fluxverandering.

Het oorspronkelijke concept voor de AFPMG was om voor een 3-fase systeem te gaan met statorsloten. Het realiseren van dit systeem in de praktijk bleek echter moeilijk haalbaar en het bekomen van goede wikkelingen een zeer tijdrovend proces. Omwille van deze reden is het praktischer om te werken met een “*serpentine coil*”. Het gebruik van dit type spoel maakt dan wel dat er gewerkt werd met een 1-fase systeem. Dit is minder voordelig ten opzichte van de 3-fasige variant, maar het liet wel toe een eenvoudiger model te bekomen met een kleinere kans op fouten. Naar de toekomst toe is het ook zeker een mogelijkheid om 3 “*serpentine coils*” te gebruiken om zo de voordelen van deze uitvoering te combineren met de voordelen van een 3-fase systeem. Het gebruik van dit type spoel leidt zoals aangetoond in het experiment wel tot een aanvaardbaar resultaat met een iets lagere opgewekte spanning van 5,6 V ten opzichte van de verwachte 6,07 V. Dit kleine verschil kan te wijten zijn aan de verliezen veroorzaakt door de luchtspleet aangezien deze niet uniform was over de hele oppervlakte. Het is naar verdere

ontwerpen toe vooral belangrijk dat de luchtspleet zo klein mogelijk gehouden wordt. Om dit te bekomen zou de AFPMG gebruik moeten maken van een statormodel zonder platen gelijkaardig aan deze voorgesteld in hoofdstuk 6. Op deze manier kan ervoor gezorgd worden dat er zich enkel lucht bevindt tussen de spoel en magneten om op deze manier een voordeligere permeabiliteit te bekomen dan de originele constructie met houten steunplaten.

Het gebruik van een AFPMG is zoals aangetoond met de huidige versie van de generator een zinvolle piste om op verder te gaan omwille van de compacte constructie en het benaderen van de verwachte resultaten bij lage toerentallen, een toch wel cruciale parameter bij het ontwerpen van een generator voor de golfenergieomzetter. Het gebruiken van golfenergie zelf voor het opwekken van elektrisch vermogen is een interessant en milieuvriendelijker alternatief ten opzichte van klassieke technologieën. De bekomen generator uit het onderzoek is niet optimaal, maar legt wel een aantal aandachtspunten bloot voor verdergaand onderzoek. Het is vooral belangrijk om een goede afweging te maken tussen de hoeveelheid magneten, het aantal wikkelingen en de grootte van de generator. Het vinden van een goed evenwicht hierin is dan ook de sleutel tot succes voor het bekomen van een geschikte AFPMG voor de golfenergieomzetter. Hierdoor is het in de toekomst een interessante mogelijkheid om het originele concept van de DRAFPMG verder uit te werken rekening houdende met de verworven inzichten van dit onderzoek. Het gebruik van een DRAFPMG voor het opwekken van golfenergie is waardevol om verder te onderzoeken aangezien de verdubbeling van het aantal magneten zou moeten leiden tot nog betere resultaten.

Bibliografie

- Alsuwian, T., Habib, A., Mohd Zainuri, M. A. A., Ibrahim, A. A., Tousizadeh, M., Alhawari, A. R. H., Alkawgani, A. H. M., & Almasabi, S. (2024). Prototype development of a fully coreless multi-stage axial-flux permanent-magnet machine (AFPM) through the performance comparison between single-stator double-rotor (SSDR) and double-stator single-rotor (DSSR) configurations. *Alexandria Engineering Journal*, 92, 283–293.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.023>
- Ani, S. O., Polinder, H., & Ferreira, Jan. A. (2012). Low cost axial flux PM generator for small wind turbines. *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2350–2357.
<https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342461>
- Anvari, B., Guedes-Pinto, P., & Lee, R. (2021). Dual Rotor Axial Flux Permanent Magnet Motor using PCB Stator. *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449506>
- Asefi, T., Faiz, J., & Khan, M. A. (2018). Design of Dual Rotor Axial Flux Permanent Magnet Generators with Ferrite and Rare-Earth Magnets. *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 531–538.
<https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2018.8522004>
- Bageshwar, S. S., & Phand, P. V. (2017). *Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Low Wind Power Application*. 2(9).
- Bannon, N., Davis, J., & Clement, E. (2013). *Axial Flux Permanent Magnet Generator*.
- Borsboom, O., Bhadra, A., Salazar, M., & Hofman, T. (2024). *Geometric Scaling Laws for Axial Flux Permanent Magnet Motors in In-Wheel Powertrain Topologies* (Version 1). arXiv.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2409.01205>

- Bumby, J. R., Martin, R., Mueller, M. A., Spooner, E., Brown, N. L., & Chalmers, B. J. (2004). Electromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines. *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, 151(2), 151. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20031063>
- Debasish, D. (n.d.). Discuss the Principal of A.C Generator by labelled diagram. *Easy Physics Solution*. <https://withdebasishsir.wixsite.com/learnphysics/single-post/2016/08/08/discuss-the-principal-of-ac-generator-by-labelled-diagram>
- Faiz, J., Asefi, T., & Khan, M. (2020). Design of dual rotor axial flux permanent magnet generators with ferrite and rare-earth magnets. *Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics*, 33(4), 553–569. <https://doi.org/10.2298/FUEE2004553F>
- Habib, A., Che, H. S., Abd Rahim, N., Tousizadeh, M., & Sulaiman, E. (2020). A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 589–600. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.039>
- Hlaing, T. T. (2018). Design and Construction of Low Speed Axial Flux Generator with Stationary Bike. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 8(9). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.9.2018.p8135>
- Irasari, P., Hikmawan, M. F., Kasim, M., Widiyanto, P., & Alam, H. S. (2018). Effect of the Magnetic Properties on Generator Characteristic and Power Density. *2018 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT)*, 16–23. <https://doi.org/10.1109/AEMT.2018.8572327>
- Kamper, M. J., Rong-Jie Wang, & Rossouw, F. G. (2008). Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(5), 1495–1504. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2002183>
- Kucuk, F. (2016). Alnico magnet-based cost-efficient design of a permanent magnet reluctance generator for wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 11(S1). <https://doi.org/10.1002/tee.22251>

- Kutt, F., Blecharz, K., & Karkosiński, D. (2020). Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator for a Counter-Rotating Wind Turbine. *Energies*, 13(11), 2833. <https://doi.org/10.3390/en13112833>
- Latoufis, K. C., Messinis, G. M., Kotsampopoulos, P. C., & Hatziaargyriou, N. D. (2012). Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines. *Wind Engineering*, 36(4), 411–431. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.36.4.411>
- LeVasseur, D. (1998, October 13). *Why 4.44?* <https://davelevasseur.com/wp-content/uploads/2021/12/TN84-Why-4.44.pdf>
- Muljadi, E., & Green, J. (2002). *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator: Preprint*.
- Murphy, J. (n.d.). *Understanding AC induction, permanent magnet and servo motor technologies:* <https://www.cmafh.com/WebsiteCatalogs/VendorVideos/TechnicalDropDown/Electrical/Understanding%20Electric%20Motors.pdf>
- Peng, Q., Zhou, J., Tian, S., & Wang, Y. (2023). *Enhance the Field Strength by Adding Soft Iron in the Hybrid Permanent magnet* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2301.00532>
- Pop, A. A., Jurca, F., Oprea, C., Chirca, M., Breban, S., & Radulescu, M. M. (2013). Axial-flux vs. Radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application. *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634639>
- Pranjić, F., & Vrtič, P. (2024). Cogging Torque Reduction Techniques in Axial Flux Permanent Magnet Machines: A Review. *Energies*, 17(5), 1089. <https://doi.org/10.3390/en17051089>
- Prashanth, N. A. (2022). Flux maximization in wind turbine permanent magnet synchronous generator made of NdFeB permanent magnets. *Materials Today: Proceedings*, 49, 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.224>

- Premaratne, P., Kadhim, I. J., Abdullah, M. Q., Halloran, B., & James Vial, P. (2022). A survey on low speed low power axial flux generator design and optimization using simulation. *Neurocomputing*, 509, 272–289. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.07.004>
- Price, G. F., Batzel, T. D., Comanescu, M., & Muller, B. A. (2008). *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*.
- Radwan-Pragłowska, N., Węgiel, T., & Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 13(21), 5741. <https://doi.org/10.3390/en13215741>
- Robert Murray-Smith, • • 121 401 Weergaven 3 Jaar. (n.d.). *Robert Murray-Smith*. YouTube. Retrieved 20 May 2025, from <https://www.youtube.com/channel/UC4AkVj-qnJxNtKuz3rkq16A>
- Rotorjev, M. A., Sinhronskega, D., & Magnetnim, S. Z. A. (2017). *ROTOR MECHANICAL STRESS ANALYSIS OF A DOUBLE-SIDED AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MACHINE*.
- Shewane, P. G., Singh, A., Gite, M., & Narkhede, A. (2014). 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).
- Sitheswaran, B., Pandarinathan, S., Alagu, M., & Ponnusamy, P. (2021). Performance analysis of radial flux and axial flux permanent magnet generators for low- speed wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 65(1), 129–147. <https://doi.org/10.3233/JAE-190150>
- Soderlund, L., Eriksson, J.-T., Salonen, J., Vihriala, H., & Perala, R. (1996). A permanent-magnet generator for wind power applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(4), 2389–2392. <https://doi.org/10.1109/20.511354>
- Tobar, M. E., McAllister, B. T., & Goryachev, M. (2019). *The Electrodynamics of Free and Bound Charge Electricity Generators using Impressed Sources and the Modification to Maxwell's Equations*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1904.05774>

- Torkaman, H., Ghaheer, A., & Keyhani, A. (2019). Axial flux switched reluctance machines: A comprehensive review of design and topologies. *IET Electric Power Applications*, 13(3), 310–321. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5190>
- Yicheng Chen, Pillay, P., & Khan, A. (2004). PM wind generator comparison of different topologies. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 3, 1405–1412. <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348606>

Lijst van bijlagen

Rotor 48 MAGNETS: 1^{ste} versie van de rotor met 48 magneten

Rotor BOTTOM: Bodemplaat voor 2^{de} versie van de rotor met 36 magneten

Rotor 36 TOP: Topplaat voor 2^{de} versie van de rotor met 36 magneten

Stator 1: 1^{ste} versie van de stator

Stator 2 BOTTOM: Bodemplaat voor 2^{de} versie van de stator

Stator 2 TOP: Topplaat voor 2^{de} versie van de stator

Stator 3: 3^{de} versie van de stator

Stator 3 SUPPORT: steun voor 3^{de} versie van de stator