

# Amorfe magnetische materialen voor elektrische machines

Jonas Celie, Marnix Stie

Promotoren: prof. dr. ir. Peter Sergeant, dr.ir. Jan Rens (OCAS)

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Vakgroep Elektrische energie, Systemen en Automatisering

Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2015-2016





# Amorfe magnetische materialen voor elektrische machines

Jonas Celie, Marnix Stie

Promotoren: prof. dr. ir. Peter Sergeant, dr.ir. Jan Rens(OCAS)

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Vakgroep Elektrische energie, Systemen en Automatisering

Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2015-2016



## Abstract

Deze thesis handelt over het mogelijk gebruik van amorfe materialen in elektrische machines. De twee partijen die meegewerkt hebben aan het tot stand komen van deze thesis zijn, de UGent (Sergeant P.) en OCAS (Rens J.). Deze is geschreven ter afronding van het masterjaar industrieel ingenieur elektromechanica van de studenten (Celie J. & Stie M.).

Energie-efficiëntie in industriële toepassingen is in de huidige maatschappij een belangrijke pijler waarnaar dient gestreefd te worden. Deze thesis handelt over een onderzoek dat als doelstelling heeft het rendement van elektrische machines te verbeteren. Amorf materiaal, een materiaal met betere magnetische eigenschappen dan conventioneel silicium staal kan hiervoor een oplossing bieden. Het gebruikte materiaal in deze thesis is 1K101 van de producent Catech, een vergelijking met het meest gekend Metglas materiaal 2605HB1M wordt gemaakt. Indien gebruik gemaakt wordt van amorf materiaal in elektrische machines zijn de ijzerverliezen vaak hoger dan verwacht, in deze thesis is onderzocht welke effecten verschillende technieken van versnijden en uitgloeien hebben op de magnetische eigenschappen van dit materiaal.

Zowel voor als na een gloeibehandeling worden de  $BH$ -curves en de verliezen vergeleken. Verder wordt onderzocht wat het verschil is tussen het versnijden van het materiaal met een laser, een plaatschaar en draadvonken. De invloed van een gloeibehandeling na deze bewerkingen wordt vervolgens onderzocht. Een case studie is opgestart voor een hoge snelheidsmotor waarbij amorf materiaal vergeleken wordt met conventioneel silicium staal. Via een EEM analyse is door gebruik te maken van amorf materiaal een daling in ijzerverlies met een factor 15 gevonden voor plaatschaar gesneden materiaal t.o.v. het conventioneel silicium staal. Voor lasersnijden liggen de verliezen veel hoger, de factor 15 verlaagt naar een factor 7.

## Extended abstract

# Effects of cutting and annealing of amorphous materials for high speed permanent magnet machines

Jonas Celie, Marnix Stie, Jan Rens, Peter Sergeant

**Abstract** – When using amorphous material in an electric motor, the losses are often higher than expected. This paper investigates the effect of cutting and annealing on the performance of amorphous material. The  $BH$ -curve and losses are compared before and after an annealing treatment. Furthermore, the properties are compared for material cut with a plate shear and cut by laser, followed by an annealing treatment. A case study is done for a high speed motor, comparing the amorphous material with a conventional silicon steel grade. Based on a FEM analysis, a reduction of iron loss by a factor 7 is found through the use of an amorphous material instead of a conventional silicon steel.

**Index Terms**— Amorphous magnetic material, Degradation, High speed permanent magnet machines, Magnetic cores, Magnetic losses

## I. INTRODUCTION

Amorphous materials are known for their low iron losses especially at very high frequencies. The materials have multiple applications in power electronics, such as sensors and transducers as well as distribution transformers. In transformers, it has been shown that the replacement of non-oriented silicon steel by amorphous material, can lead to a reduction in no-load losses of up to 70% [1] [2]. Since amorphous materials have high electrical resistivity, low coercive force and very low losses at high frequencies [3], it can improve the efficiency of high speed electrical machines. In the literature, several prototypes of electrical motors using amorphous materials as stator core have been presented [4] [5]. During the

construction of these stator cores, a number of difficulties were encountered, mainly due to the thickness of the material, typically about 25 microns and the extreme brittleness. This results in a difficult process to manufacture a stator core. The amorphous material is also sensitive to mechanical stress. As a result, the iron loss is generally increased following the manufacture of the stator core [6] [7]. Further, a suitable heat treatment of the amorphous material should be applied, as it has a positive influence on the magnetic properties such as permeability, coercive force and core losses [8]. Recently, a study was reported where the stator of an Interior Permanent Magnet Machine was built using amorphous material (Metglas 2605HB1M), and compared with a stator that was made with conventional non-oriented electrical steel [4]. Both rotors were made of conventional non-oriented steel. Measurements showed that the total core losses in stator and rotor are 2 times lower in the motor with amorphous material in the stator compared to the motor with the stator built from NO silicon steel. However, numerical calculations lead to a decrease by a factor 3. This difference is probably caused during the fabrication of the amorphous core: it may be due to the cutting and/or the mechanical stress. It can be assumed that the deterioration of the material results in an increase in iron losses. In this paper, this degradation of magnetic properties will be discussed. Also, it will be investigated if there is a possibility to reduce or even eliminate these adverse effects. Furthermore, the influences of different mechanical cutting operations are compared. The influence of laser cutting and cutting with plate shear will be examined and the influence of an annealing treatment will be discussed. The amorphous material used in this paper is 1K101 produced by Catech. Finally, as a case study, the core losses are evaluated for a high speed motor in no load conditions.

## II. PROPERTIES OF AMORPHOUS MATERIAL

In unannealed state, the material is ductile and easy to handle. After the annealing treatment, the mechanical properties change drastically, and the

---

The authors acknowledge the Research Foundation - Flanders (FWO) projects G.0110.13 and G.0083.13, and the Strategic Research Centre Flanders Make for the financial support.

J. Celie, M. Stie and P. Sergeant are with the Electrical Energy Laboratory, Ghent University, Technologiepark 913, 9052 Zwijnaarde, Belgium (email: peter.sergeant@ugent.be). Jan Rens is with OCAS NV, Technologiepark 935, 9052 Zwijnaarde, Belgium.

material becomes highly brittle. Therefore, it is not possible to process the material following an annealing treatment. Nevertheless, it is recommended to anneal the material, as the deterioration of the mechanical properties does not outweigh the significant improvement of magnetic properties that result from annealing. Metglas recommends annealing under field of 2400 A/m for 2 hours at 370 °C [9]. However, the easiest and cheapest is annealing without a field. This improves the losses of the material already significantly, as will be shown further in the paper. To obtain the optimal magnetic properties, a longitudinal field is applied during annealing. Unfortunately, annealing under field may introduce magnetic anisotropy that cannot be accepted in rotating electrical machines. As Figure 1 shows, the permeability is reduced when a transversal field is applied during the annealing treatment. The data of Figure 1 are experimentally obtained. The amorphous material is annealed for 2 hours at 350°C in a nitrogen atmosphere. Further in this paper, only a longitudinal field annealing is considered.

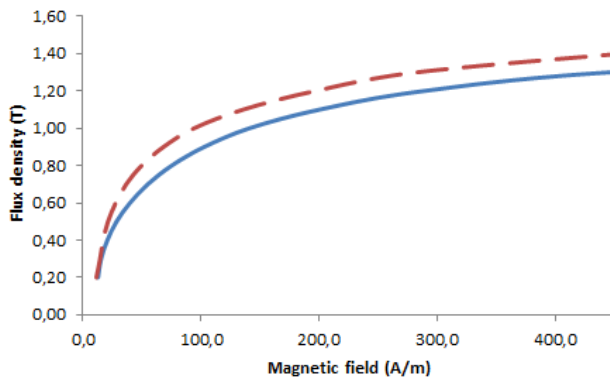


Figure 1: Flux density of amorphous material annealed in longitudinal field (dotted line), and transversal field (solid line)

#### A. Properties of unannealed amorphous material

The  $BH$ -curve and the losses of the unannealed material are used as reference data in order to show the improvement by the different treatments. The material characteristics are described in Table I.

Figure 2 shows the  $BH$ -curve of amorphous material and 35PN250 non grain oriented silicon steel. The unannealed amorphous material has a comparable behavior as the silicon steel, but it saturates at 1.56T. These curves, except those of the conventional silicon steel, are obtained by experimental measurements on a single sheet tester (SST). The curve of conventional steel is obtained from the datasheet.

##### 1) Benefits of annealing with a field

The field applied during the annealing treatment is 2400A/m. The annealing time and temperature are 2 hours and 350°C. The annealing treatment has a great influence on the losses as seen in Figure 3, especially at higher frequencies. Multiple annealing tests have been

done on the same magnetic material and with the same field, temperature and duration, so that also the variation between samples was observed and reliable conclusions can be made.

Figure 4 displays the losses, and the spread on the different experiments for the annealing with field. The spread on the measurements for the annealing without field is not shown, but has the same order of magnitude. It is clear that annealing under a field leads to a material with better magnetic properties than when no field is applied. However, the difference between the losses in samples that are annealed with and without field is not as large as expected, and even so small that the variation that is measured on different samples with an identical annealing history for both curves overlap most of the time.

TABLE I: MATERIAL CHARACTERISTICS

	NO	Amorphous
Reference	M235-35A	1K101
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	350	25
Saturation (T)	1.973	1.56
Resistivity ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	59	125
Ironloss at 50 Hz and 1 T (W/kg)	0.92	0.094
Ironloss at 50 Hz and 1.4 T (W/kg)	1.92	0.19

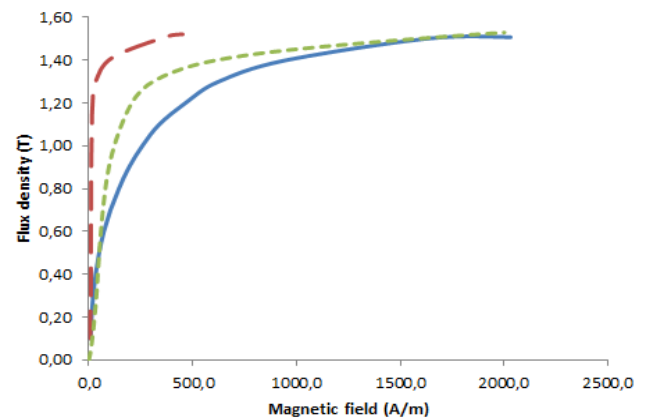


Figure 2: Silicon steel 35PN250 (dotted line) compared with annealed (dashed line) and not annealed (solid line) amorphous material

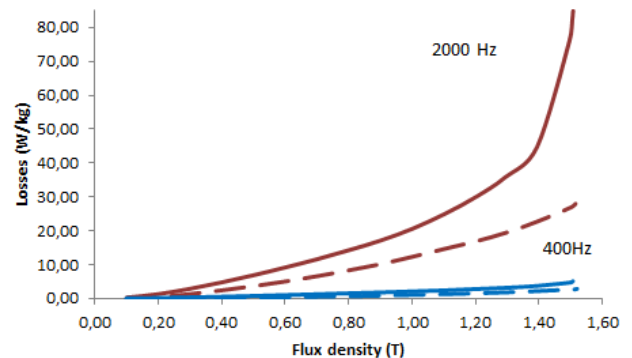


Figure 3: Iron losses of amorphous material annealed with field (dashed line), without field (dotted line), not annealed (solid line) at frequencies of 400 and 2000 Hz.

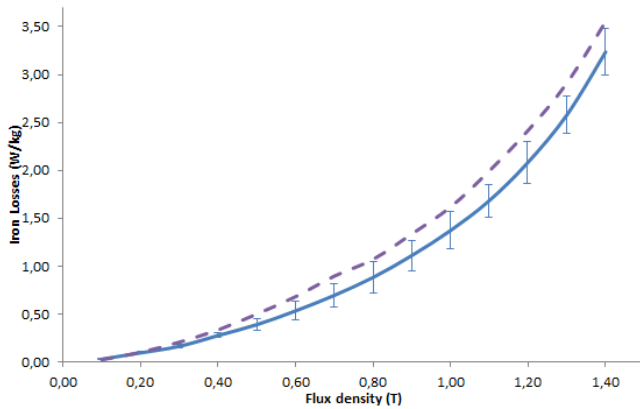


Figure 4: Iron losses comparison for annealing with (solid line) and without field (dashed line) at a frequency of 400Hz.

### III. EFFECT OF CUTTING ON THE AMORPHOUS MATERIAL

Amorphous materials are known for their hardness and are difficult to process mechanically. Probably these disadvantages lead to degradation. Laser cutting and cutting the material with a plate shear will be compared. The influence of an operation is determined by measuring the losses with a SST and increasing the number of cutting edges. The following samples were tested on the SST:

- one strip of 50 mm;
- two strips in parallel of 25 mm width;
- six strips in parallel of 10 mm width.

The last two experiments were done with and without annealing treatment. It is important to mention that it is not possible to cut the material into strips after it is annealed due to its brittleness.

#### A. Properties of unannealed amorphous material

For the samples without annealing treatment, Figure 5 shows the losses for the strips of 10mm, 25mm and 50 mm width, where it is expected that the smaller strips are more affected by the cutting. In order to have a similar induced voltage in the SST for all strip widths, several strips are put in parallel for the strips with small width. The samples are cut with a laser and measured at 400 and 700 Hz. Figure 6 shows the same tests on strips cut with a plate shear. Figure 7 and Figure 8 compare both cutting techniques with respect to core losses and  $BH$ -curve respectively, for the strips that are cut to 10 mm width. From Figure 7, it can be concluded that laser cutting leads to a significant increase of the losses compared with plate shear cutting. The losses of laser cutting are 30 percent higher in relation to plate shear cut strips. From Figure 8, it is seen that also the magnetic permeability, averaged over the strip, is lower for the laser cut strips.

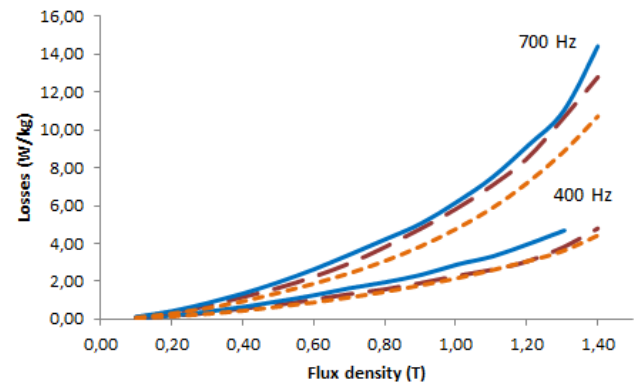


Figure 5: Losses in unannealed laser cut material by increasing the number of cutting edges. One strip of 50 mm width (dotted line), 2 strips in parallel of 25 mm width (dashed line) and 6 strips of 10 mm width (solid line)

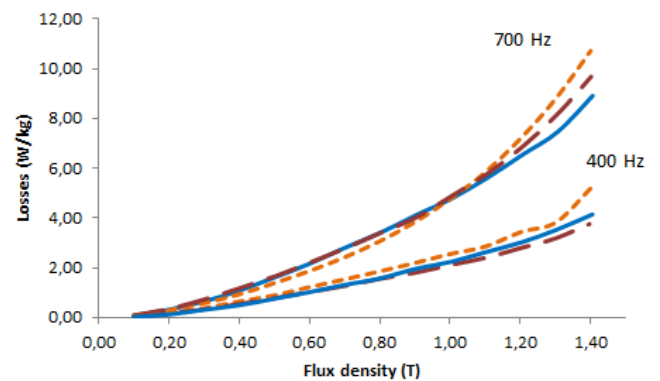


Figure 6: Losses in unannealed plate shear cut material by increasing the number of cutting edges. One strip of 50 mm width (dotted line), 2 strips in parallel of 25 mm width (dashed line) and 6 strips of 10 mm width (solid line)

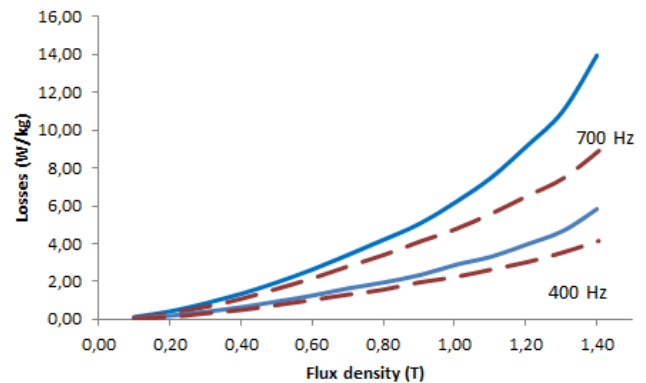


Figure 7: Losses of unannealed strips of 10 mm width, comparison of losses of laser cut strips (solid line) and strips cut with plate shear (dashed line).

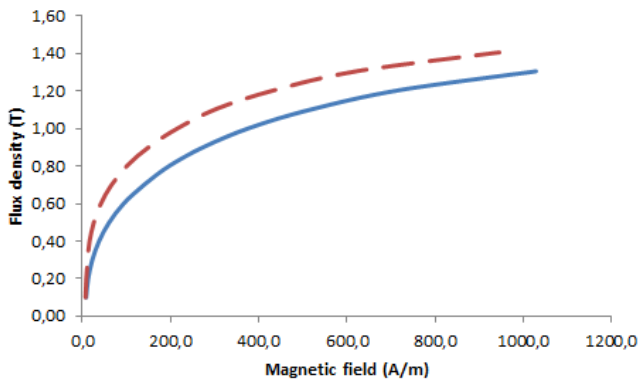


Figure 8: Magnetization curve of unannealed strips of 10 mm width. Laser cut (solid line) plate shear cut (dashed line)

### B. Properties of annealed amorphous material

The earlier measured samples are annealed for 2 hours on 350°C in the absence of a magnetic field. Then, the experiments reported earlier are repeated. The results are shown in Figure 9 and Figure 10. As mentioned above, an annealing treatment has a positive influence on the iron losses. For laser cutting, Figure 5 and Figure 9 show a loss reduction by annealing of 20% and 35% at 400Hz and 700Hz respectively. As can be seen in Figure 10, annealing has also a positive influence on the strips that have been cut with a plate shear. The influence due to the number of cutting edges is decreased. Figure 11 and Figure 12 again make the comparison between the two operations for the highest number of parallel strips. It can be seen that the losses of laser cut strips are 30 percent higher in relation to plate shear cut strips. This is comparable to the unannealed laser cut and plate shear cut material: see Figure 7. It can be concluded that annealing has a positive influence on mechanical stresses caused by deformation as occurs in plate shear cutting. Annealing has no positive influence on heat-affected zones caused by laser cutting. When the temperature in the heat-affected zone rises above the recrystallization temperature, the amorphous state of the material will be permanently lost, resulting in the formation of grain boundaries and, hence, increased hysteresis losses and reduced permeability.

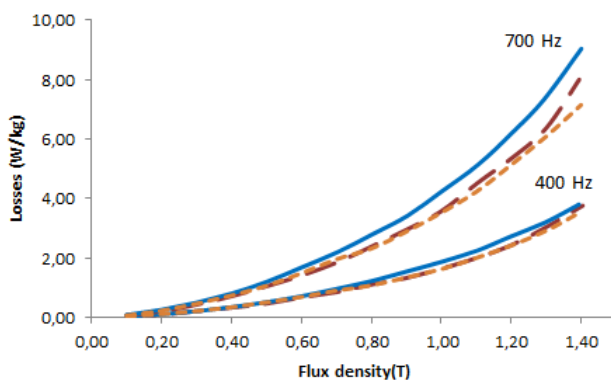


Figure 9: Losses of annealed laser cut material by increasing the number of cutting edges. One strip of 50 mm width (dotted line), 2 strips in parallel of 25 mm width (dashed line) and 6 strips of 10 mm width (solid line)

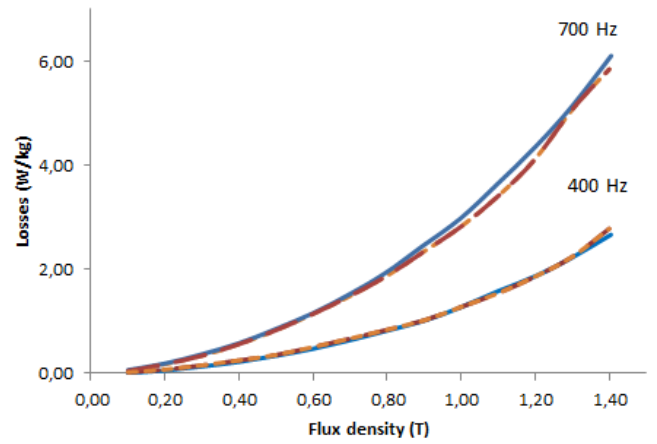


Figure 10: Losses of annealed plate shear cut material by increasing the number of cutting edges. One strip of 50 mm width (dotted line), 2 strips in parallel of 25 mm width (dashed line) and 6 strips of 10 mm width (solid line)

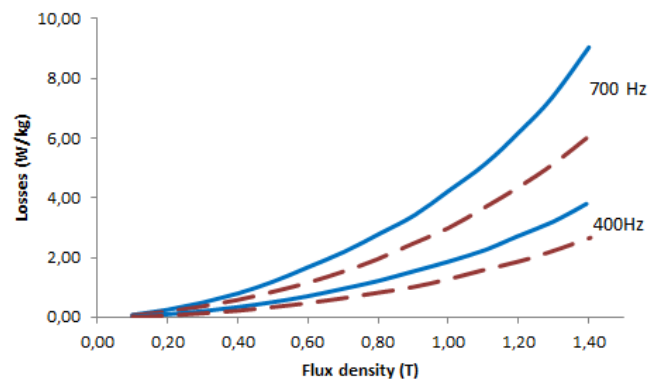


Figure 11: Losses in annealed strips of 10 mm width. Comparison of losses for laser cut strips (solid line) and strips cut with a plate shear (dashed line).

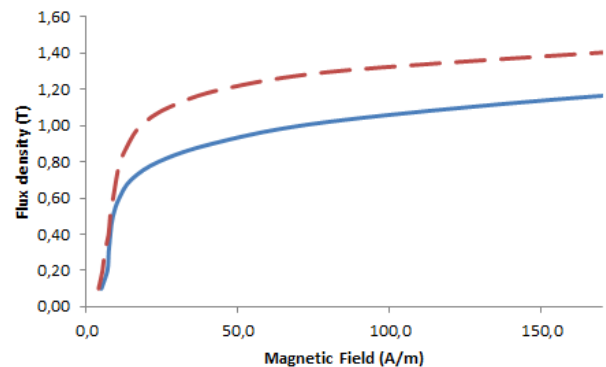


Figure 12: Magnetization curve of annealed strips of 10 mm width for laser cut strips (solid line) and plate shear cut strips (dashed line)

## IV. IRON LOSSES IN A HIGH SPEED MOTOR EVALUATED BY FEM

In SST experiments on strips, amorphous material is observed to be much better in terms of magnetic properties compared with silicon steel. However, literature has shown that the improvement of losses in electrical machines is lower than predicted by SST experiments. In order to obtain a better insight, a case study is done for a high speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) with amorphous material. The losses are computed for both the unannealed material and for the annealed amorphous material. For



the amorphous material, a stacking factor of 84% is taken into account. The geometry of the PMSM is shown in Figure 13, and the dimensions can be found in Table III. The flux density at no-load is displayed in Figure 14. For the iron loss, we use the loss equation using the Bertotti-Model [10].

$$P_{loss} = a B^\alpha f + b B^2 f^2 + c B f (\sqrt{1 + e B f} - 1) \quad (1)$$

Here,  $f$  represents the frequency and  $B$  the peak value of the magnetic flux density. These parameters were identified by a pure mathematical fitting procedure done on measured data of iron losses. The parameters used in the model can be found in Table II.

TABLE II: IDENTIFIED PARAMETERS FOR THE MATERIAL

	Annealed	Unannealed
a	2.04872E-03	5.31188E-03
$\alpha$	108.4125E-03	82.767E-03
b	3.71901E-06	1.1799E-05
c	0	0
e	0	0

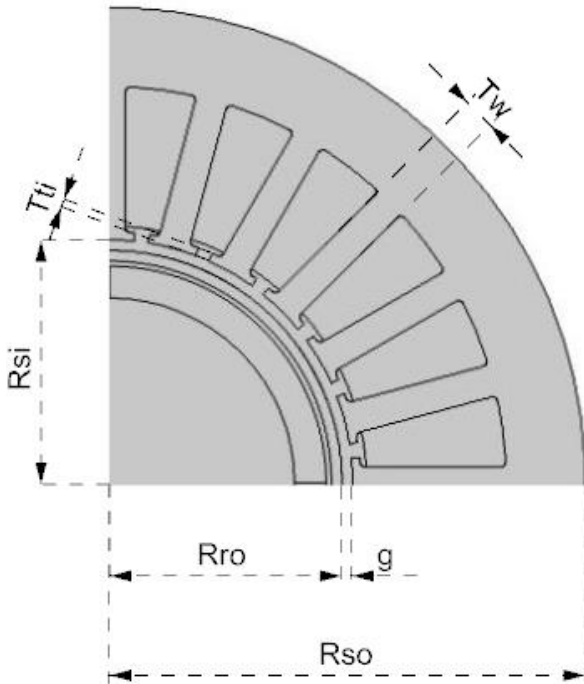


Figure 13: Quarter cross-section view of the motor

TABLE III: MOTOR SPECIFICATIONS

Poles	4
Outer radius of stator core $R_{SO}$	45 mm
Inner Radius of stator core $R_{SI}$	23 mm
Radius of rotor core $R_{RO}$	21 mm
Air gap $g$	2 mm
Tooth width $T_w$	3 mm
Tooth tip height $T_t$	0.8 mm
Core length	28 mm

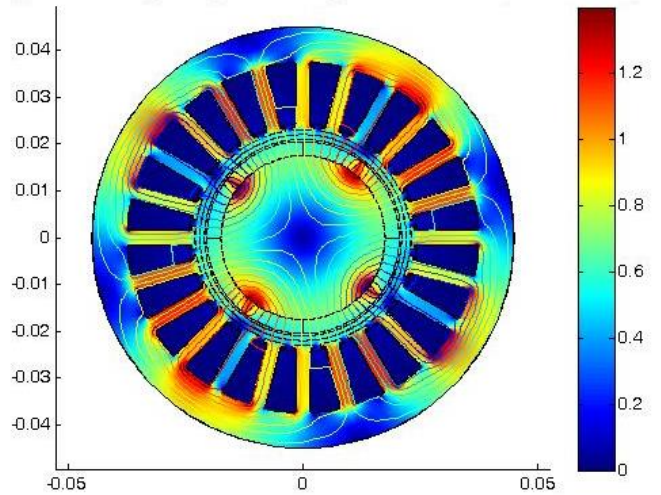


Figure 14: Flux density in a high speed motor, stator built of amorphous material. Rotor built of NO electrical steel.

#### A. Unannealed amorphous material

Table IV compares the losses measured on strips and the losses in the motor geometry. There is a significant difference between the ideal sample, which is tested on an SST with sinusoidal flux density of 1T, and a numerical calculation on a motor geometry that includes harmonics. The induction of 1 Tesla is chosen as reference because this is the mean value in the entire motor core. This results in a sound comparison of the sample and the motor geometry.

TABLE IV: LOSSES IN SST STRIPS COMPARED WITH LOSSES IN THE MOTOR, UNANNEALED

	50 HZ	400 Hz	700 Hz
P 1T in sample (W/kg)	0,08	2,82	4,77
$P_{gem}$ motor (W/kg)	0,29	4,15	9,93
$P_{total}$ motor (W)	0,35	4,82	11,50

#### B. Annealed amorphous material (In absence of a magnetic field)

As expected, the losses of the amorphous annealed material increase when the simulation is made for a motor. Nevertheless the deterioration of the material is reduced to a minimum, especially in the region of the higher frequencies. When is compared with Table IV, the superb influence of the annealing treatment is clearly visible.

TABLE V: IDEAL SAMPLES COMPARED WITH MOTOR GEOMETRY, ANNEALED

	50 HZ	400 Hz	700 Hz
P 1T in sample (W/kg)	0,09	1,28	2,85
P <sub>gem</sub> motor (W/kg)	0,11	1,46	3,39
P <sub>total</sub> motor (W)	0,13	1,70	3,94

### C. Silicon steel M235-35A ,NO20 and amorphous material compared

Table VI shows the losses in the stator of 3 different materials (amorphous, NO20 and M235-35A) calculated by FEM software at the rotational speed values 1500 rpm, 3000 rpm, 12000 rpm, 21000 rpm, 30000 rpm and 60000 rpm. As expected, the advantages of amorphous material are striking at higher speed. It should be noted that the deterioration of the material due to the cutting defects has to be taken into account. As can be concluded from Figure 10, an annealing treatment after cutting the material with a plate shear returns the properties of the material to their initial values. So these can be seen as a reference. Compared to the reference material, Table VI shows for annealed plate shear cut strips a reduction of iron losses by a factor 15. For laser cut strips, the losses are much higher: it can be concluded that for laser cutting the benefit of a factor 15 drops down to a factor 7.

TABLE VI: IRON LOSSES IN THE CASE STUDY OF THE HIGH SPEED PMSM: SILICON STEEL, NO20 AND ANNEALED AMORPHOUS MATERIAL COMPARED

n (rpm)	Losses (W)			
	Amorphous		NO20	M235-35A
	Plate shear	Laser cut		
1500	0,13	0,14	1,55	1,58
3000	0,28	0,33	3,11	3,54
12000	1,69	2,61	12,85	23,01
21000	3,94	6,78	23,18	54,79
30000	7,00	12,87	34,09	101,87
60000	23,3	46,95	74,75	351,52

## V. CONCLUSIONS

In this paper the degradation by cutting and the effect of annealing of an amorphous material is examined. It is well known that annealing improves the properties of the amorphous material. It was shown that the effect of an additional magnetic field during annealing does not bring significant benefits for the investigated material

1K101. Taking into account anisotropic behavior of field annealed strips, it may be beneficial to anneal without field. Cutting with a plate shear deforms the material and deteriorates its losses, but the increase of losses can be reduced with an annealing treatment. With laser cutting, it is demonstrated that the material is more affected compared with a plate shear. Therefore, the optimal way to cut the material is using a plate shear or a punching machine. For a case study of a high speed PMSM, the core losses have been computed by numerical calculations, taking into account harmonics and different cutting techniques, with and without annealing. It has been found that, compared to a conventional silicon steel M235-35A - a reduction of core losses by a factor 7 can be obtained by taking into account the cutting defects of the amorphous material. If the material is plate shear cut and annealed, a reduction by a factor 15 is possible.

## VI. REFERENCES

- [1] R. Hasegawa, "Present status of amorphous soft magnetic alloys," J. Magn. Magn. Mater., vol. 215–216, pp. 240–245, 2000.
- [2] R. Kolano, N. Wojcik, and W. Gawior, "A three-limb amorphous magnetic circuit for three-phase 200 kVA distribution transformers," J. Magn. Magn. Mater., vol. 160, pp. 213–214, 1996.
- [3] H. Fujimori, H. Yoshimoto, T. Masumoto, and T. Mitera, "Anomalous eddy current loss and amorphous magnetic materials with low core loss," J. of Applied Physics, vol. 52, no. 3, pp. 1893-1898, 198.
- [4] S. Okamoto, M. Leki, N. Denis, K. Fujisaki and Y. Kato, "Core loss reduction of an interior permanent magnet synchronous amorphous stator core," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 3, pp. 2261-2268, 2016.
- [5] K. Roman, K.Krzysztof, K-B. Aleksandra, P. Marcin, S. Jan and Z. Przemyslaw. "Amorphous soft magnetic materials for the stator of a novel high-speed PMSM motor," IEEE transactions on magnetics, vol. 49, no. 4, pp. 1367-1371, 2012.
- [6] A. J. Moses, "Demonstration of the feasibility of the use of amorphous magnetic material as transformer core material," in Proc. 12th Int. Conf. on Electricity Distribution, Birmingham, 1993, pp.1-3.
- [7] Y. Okazaki, "Loss deterioration in amorphous cores for distribution transformers," J. of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 160, pp. 217-222, 1996.
- [8] V. Tsepelev, V. Konashkov, Y. Starodubtsev, V. Belozarov, and D. Gaipishevarov, "Optimum regime of heat treatment of soft magnetic amorphous materials," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 4, pp. 1327-1330, 2012
- [9] Metglas. "Amorphous alloys for transformer cores" 2011.
- [10] D. Eggers, S. Steentjes and K. Hameyer, "Advanced Iron-Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp.3021-3024, 2012.

## Woord vooraf

Alvorens we ons diploma in handen krijgen hebben we als laatstejaarsstudenten nog een grote uitdaging tot een goed einde te brengen, namelijk het schrijven van een thesis, een thesis waar gedurende een volledig academiejaar aan gewerkt wordt. Onze thesis moest en zou de kers op de taart zijn van onze studie industrieel ingenieur elektromechanica. Deze handelt over het verminderen van de verliezen in elektrische machines door gebruik te maken van een nieuw materiaal. Wij hopen dat deze thesis een bijdrage levert bij het onderzoek naar amorf materiaal zodat in de nabije toekomst motoren met dit materiaal kunnen ontwikkeld worden. Met dit in het achterhoofd namen we beiden deze opdracht serieus en wouden van onze thesis een pareltje maken.

Alle begin is moeilijk, dat hebben we gedurende de eerste weken ook ondervonden. Naarmate de tijd verstreek begonnen we meer vat te krijgen op de situatie, waardoor we voldoende inzicht kregen en de drang om het gehele project tot een goed einde te brengen extra groot werd.

Kortom het was een zeer leerrijk laatste jaar en een uitdagende thesis. Ter beëindiging van onze thesis zouden we graag een aantal personen willen bedanken die ons gedurende deze periode hebben begeleid:

- prof. dr. ir. Peter Sergeant, promotor van de Universiteit Gent;
- dr.ir. Jan Rens, promotor binnen OCAS;
- Ouders en naasten voor de steun die ze ons tijdens de studies hebben verschaft.

De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

The authors give permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

## Inhoudsopgave

<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Extended abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Woord vooraf</b> .....	<b>11</b>
<b>Inhoudsopgave</b> .....	<b>12</b>
<b>Lijst van illustraties</b> .....	<b>14</b>
<b>Lijst van tabellen</b> .....	<b>16</b>
<b>Inleiding</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Magnetisch gedrag van materialen</b> .....	<b>20</b>
1.1 Scheiding van het ijzerverlies .....	21
1.2 Vulfactor blikpakket.....	22
<b>2 Wat is amorf materiaal?</b> .....	<b>23</b>
2.1 Eigenschappen amorf .....	23
2.1.1 Verschil tussen SA1 en HB1 .....	24
2.2 Voor- en nadelen amorf materiaal .....	25
2.3 Belang van amorf .....	25
2.4 Invloed van de temperatuur .....	26
2.5 Invloed van gloeien .....	27
2.5.1 Gloeibehandelingen .....	28
2.6 Amorf versus silicium staal .....	28
2.7 Stator uit amorf .....	29
2.7.1 IJzerverliezen in een stator .....	30
2.8 Verschillende bewerkingsmethoden .....	31
<b>3 Bouw juk gloeibehandeling</b> .....	<b>32</b>
3.1 Berekningen juk .....	32
3.1.1 Flux in amorf en juk.....	33
3.1.2 Veldsterkte juk .....	33
3.1.3 Aantal windingen.....	33
<b>4 Is amorf nu werkelijk zo veel belovend?</b> .....	<b>34</b>
4.1 Is het materiaal weldegelijk amorf?.....	34
4.2 Visueel aspect.....	35
4.3 Elektrische eigenschappen .....	35
4.4 Temperatuur gloeibehandeling .....	36
4.5 Magnetische eigenschappen amorf materiaal .....	37
4.5.1 Magnetische eigenschappen niet uitgegloeid amorf materiaal .....	37
4.5.2 Voordelen uitgegloeid amorf materiaal .....	38
4.5.3 Anisotroop.....	40

---

4.6	Vergelijking met de literatuur .....	40
4.7	Mechanische verspaanbaarheid amorf materiaal .....	42
4.7.1	Ponsen .....	42
4.7.2	Knippen met plaatschaar .....	43
4.7.3	Lasersnijden.....	43
4.7.4	Draadvonken.....	44
<b>5</b>	<b>Gevolgen door versnijden van het materiaal .....</b>	<b>45</b>
5.1	Eigenschappen niet uitgegloeid amorf materiaal .....	45
5.2	Eigenschappen uitgegloeid amorf.....	47
<b>6</b>	<b>Case studie.....</b>	<b>49</b>
6.1	IJzerverliezen bepaald d.m.v. EEM .....	49
6.1.1	Niet uitgegloeid amorf materiaal .....	50
6.1.2	Uitgegloeid amorf materiaal .....	51
6.1.3	SI-staal M235-35A, NO20, 10JNEX900 en amorf materiaal vergeleken .....	52
6.2	IJzerverliezen experimenteel bepaald .....	53
<b>Besluit.....</b>	<b>.....</b>	<b>56</b>
<b>Verklarende woordenlijst .....</b>	<b>.....</b>	<b>58</b>
<b>Lijst met afkortingen.....</b>	<b>.....</b>	<b>59</b>
<b>Trefwoordenregister .....</b>	<b>.....</b>	<b>60</b>
<b>Literatuurlijst .....</b>	<b>.....</b>	<b>61</b>
<b>Bijlagen .....</b>	<b>.....</b>	<b>63</b>

## Lijst van illustraties

Figuur 1: Magnetisatiecurve van een magnetisch materiaal.....	20
Figuur 2: Frequentieafhankelijkheid van de ijzerverliescomponenten, Si-staal M235-35A.....	21
Figuur 3: Blikpakket met lamellen.....	22
Figuur 4: Algemeen productieproces amorf materiaal [3].....	23
Figuur 5: Magnetisatie curve amorf [3]. ....	23
Figuur 6: Eigenschappen amorf 2605SA1 [4].....	24
Figuur 7: IJzerverliezen van HB1 en SA1 [5]. ....	24
Figuur 8: IJzerverliezen SA1 op 140 °C [8]. ....	26
Figuur 9: IJzerverliezen HB1 op 140°C [8].....	26
Figuur 10: Brosheid in functie van tijd, temperatuur en afkoelsnelheid [10].....	27
Figuur 11: Magnetisatie curve V 400-50 A/ 2605HB1M [16].....	29
Figuur 12: IJzerverliezen gemeten bij verschillende frequenties [12].....	29
Figuur 13: Links: SST opstelling labo, rechts: ontworpen juk. ....	32
Figuur 14: Afmetingen juk.....	32
Figuur 15: Amorf, 1K101 Catech.....	34
Figuur 16: Niet uitgegloeid amorf materiaal, verliezen bij 400Hz. ....	35
Figuur 17: Vierpunts-meting. ....	36
Figuur 18: IJzerverliezen amorf gegloeid op 250 °C en 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....	36
Figuur 19: Magnetisatie curve amorf gegloeid op 250 °C en 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....	37
Figuur 20: Magnetisatie curve amorf materiaal vergeleken met conventioneel Si-staal.....	38
Figuur 21: Verliezen niet uitgegloeid en uitgegloeid amorf materiaal, met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur, onder 2400 A/m veld.....	38
Figuur 22: Invloed van het aangelegde veld op de ijzerverliezen bij een frequentie van 400Hz, gloeibehandeling van 350 °C gedurende 2uur. ....	39
Figuur 23: Invloed van de richting van het aangelegde veld bij een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur, onder 2400 A/m veld.....	40
Figuur 24: Magnetisatie curves Metglas 2605SA1.....	41
Figuur 25: Magnetisatie curves Catech 1K101.....	41
Figuur 26: Niet uitgegloeid amorf materiaal, links: niet correct geponst, rechts: correct geponst. ....	42
Figuur 27: Geponst uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur. ....	42
Figuur 28: Plaatschaar gesneden niet uitgegloeid amorf materiaal. ....	43
Figuur 29: Plaatschaar gesneden uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur. ....	43
Figuur 30: Laser gesneden niet uitgegloeid amorf materiaal.....	44
Figuur 31: Draadvonken uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur. ....	44
Figuur 32: Draadvonken niet uitgegloeid amorf materiaal. ....	44

---

<b>Figuur 33: Verliezen niet uitgegloeid laser gesneden amorf materiaal. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figuur 34: Verliezen niet uitgegloeid amorf materiaal. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figuur 35: Verliezen niet uitgegloeid plaatschaar gesneden amorf materiaal. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figuur 36: Magnetisatie curve niet uitgegloeid amorf materiaal. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figuur 37: Verliezen uitgegloeid plaatschaar gesneden amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figuur 38: Verliezen uitgegloeid laser gesneden amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C. gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figuur 39: Magnetisatie curve uitgegloeid amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figuur 40: Verliezen uitgegloeid amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figuur 41: Kwartdoorsnede PMSM. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figuur 42: Fluxdichtheid hogesnelheidsmotor, stator gebouwd uit amorf materiaal, rotor gebouwd uit SI-staal. ...</b>	<b>50</b>
<b>Figuur 43: Proces bouw stator. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figuur 44: Las in loodrechte richting. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figuur 45: Boring stack. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figuur 46: Stappenplan bouw stator. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figuur 47: Boring. ....</b>	<b>55</b>

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Magnetische eigenschappen van HB1 en SA1 [5].	24
Tabel 2: Verschillende gloeibehandelingen [11].	28
Tabel 3: IJzerverliezen d.m.v. EEM [13].	30
Tabel 4: IJzerverliezen ontworpen testmodel [13].	30
Tabel 5: Vergelijking verliezen amorf materiaal van de producenten Metglas en Catech.	41
Tabel 6: Vergelijking materiaal eigenschappen amorf materiaal en SI-stalen.	49
Tabel 7: Motor specificities.	50
Tabel 8: Bertotti parameters amorf materiaal.	50
Tabel 9: Verliezen in SST strips vergeleken met verlies in motor, niet uitgegloeid.	51
Tabel 10: Verliezen in SST strips vergeleken met verlies in motor, uitgegloeid.	51
Tabel 11: IJzerverliezen voor de case studie van de PMSM met verschillende materialen, op verschillende toerentallen.	52



## Inleiding

Een belangrijke pijler waarnaar in de huidige maatschappij gestreefd wordt is het rendement van elektrische installaties. Een beter rendement komt niet enkel de financiële tak van de elektrische installatie ten goede maar heeft ook zijn gevolgen op een beter leefmilieu. Indien het energieverbruik binnen Europa in kaart wordt gebracht en een ruwe schatting wordt gemaakt, spreekt men dat 60 tot 65 procent van de energie wordt verbruikt door elektrische machines.

Deze thesis heeft als doelstelling te onderzoeken hoe het rendement van elektrische machines kan geoptimaliseerd worden. Er is een magnetisch materiaal op de markt dat betere magnetische eigenschappen bezit dan het conventioneel silicium staal, namelijk amorf materiaal. Dit materiaal bevat lagere verliezen en een hogere permeabiliteit. Silicium staal is momenteel het materiaal waaruit de stator en rotor van elektrische machines vervaardigd worden. Door het silicium staal te vervangen door amorf materiaal kunnen de verliezen worden gereduceerd waardoor een hoger rendement verkregen wordt.

Dit amorf materiaal wordt momenteel slechts in beperkte mate gebruikt voor het bouwen van elektrische machines. In de literatuurstudie van deze thesis wordt een motor besproken welke vervaardigd is uit amorf materiaal. Binnen het kader van deze thesis zal onderzocht worden of dit materiaal daadwerkelijk een voordeel kan bieden in elektrische machines. Uit databladen kan worden besloten dat het amorf materiaal een veelbelovend materiaal is. Het is echter onduidelijk wat de invloeden zijn op de magnetische eigenschappen na het bewerken van dit materiaal. Van amorfe materialen is geweten dat deze moeilijk te versnijden zijn en dat het materiaal snel beschadigd raakt. Dit heeft te maken met de hardheid en brosheid van het materiaal. Deze eigenschappen zullen grondig moeten bestudeerd worden en zullen mee bepalen of het materiaal daadwerkelijk een voordeel kan bieden.

De opdracht start met het aankopen van het materiaal zodat de nodige experimenten kunnen uitgevoerd worden die meer informatie kunnen verschaffen over het veel belovende amorf materiaal en zijn verwerkingsmogelijkheden. Door gebruik te maken van vonkerosie, lasersnijden en snijden met een plaatschaar zal onderzocht worden wat de gevolgen van deze bewerkingen zijn. Deze bewerkingen kunnen een beeld vormen in welke mate het materiaal te verwerken is en wat de gevolgen zijn op magnetisch vlak.

Het materiaal zal gegloeid worden onder stikstof atmosfeer om de eigenschappen te optimaliseren. Er zal bestudeerd worden of na een mechanische bewerking ontstane interne spanningen kunnen uitgegloeid worden zodat de oorspronkelijke magnetische eigenschappen opnieuw kunnen verkregen worden. Om het materiaal te kunnen gloeien onder veld dient er een eenvoudige

opstelling gebouwd te worden zodat er een magnetisch veld in het materiaal kan aangelegd worden. Gloeien gebeurt onder atmosfeer en een temperatuur van  $\pm 350$  °C. Hiervoor dient er een geschikte draad aangekocht te worden met een werkingsgebied tot 400°C. Deze draad zal gebruikt worden om een stroom door te sturen zodat het correcte veld kan worden aangelegd tijdens het gloeien.

De experimenten zullen gevolgd worden door numerieke berekeningen (EEM- analyse) op een elektrische machine zodat de vergelijking kan gemaakt worden tussen conventioneel elektrisch staal en het amorf materiaal. De Universiteit Gent beschikt reeds over modellen van diverse types elektrische machines waardoor deze binnen deze thesis niet opnieuw dienen ontwikkeld te worden. Door de simulaties ontstaat een goed beeld tussen enerzijds silicium staal en het amorf materiaal.

Tot slot is er getracht het motormodel waarop de numerieke berekeningen uitgevoerd zijn te bouwen, dit wordt voorzien van de nodige wikkelingen zodat de ijzerverliezen kunnen worden opgemeten. De Universiteit Gent heeft dit model reeds gebouwd uit conventioneel silicium staal zodat opnieuw tussen beide materialen een vergelijking van de ijzerverliezen kan worden gemaakt.

Gedurende een volledige academiejaar is er systematisch naar de einddoelstelling toegewerkt, het eindresultaat omvat een grote hoeveelheid aan data, grafieken en vergelijkingen waarbij het amorf materiaal grondig uitgespit is. De grootste uitdaging van deze thesis was het werkend krijgen van de EEM analyse. Deze is uitgewerkt met het eindige elementen programma Comsol + Matlab. Voor ons beiden was Comsol een totaal onbekend programma. Na voldoende opzoekingswerk konden we hierin onze weg vinden. Echter is de limiet van zuiver Comsol binnen de Universiteit snel bereikt waardoor de combinatie van Matlab noodzakelijk is. De combinatie van beide programma's is vrij specifiek waardoor er online weinig informatie te vinden is voor eventuele problemen. Het opstellen van deze analyse was niet vanzelfsprekend en verliep met vallen en opstaan.

Aangezien het amorf materiaal een dikte heeft van slechts 23  $\mu\text{m}$  resulteert dit in zeer kleine signalen die opgewekt worden door de SST. Deze signalen kenden een waarde van enkele honderden microvolt. Deze extreem kleine signalen zijn moeilijk te verwerken voor de data acquisitiekaart waardoor metingen soms enige tijd in beslag namen. Om accurate waarden te bekomen was het nodig de metingen meermaals te herhalen, zo kon de toevallige fout worden beperkt.

Onze doelstelling was een duidelijk antwoord te kunnen formuleren wat de gevolgen van verschillende bewerken zijn op de magnetische eigenschappen van amorf materiaal. Jammer

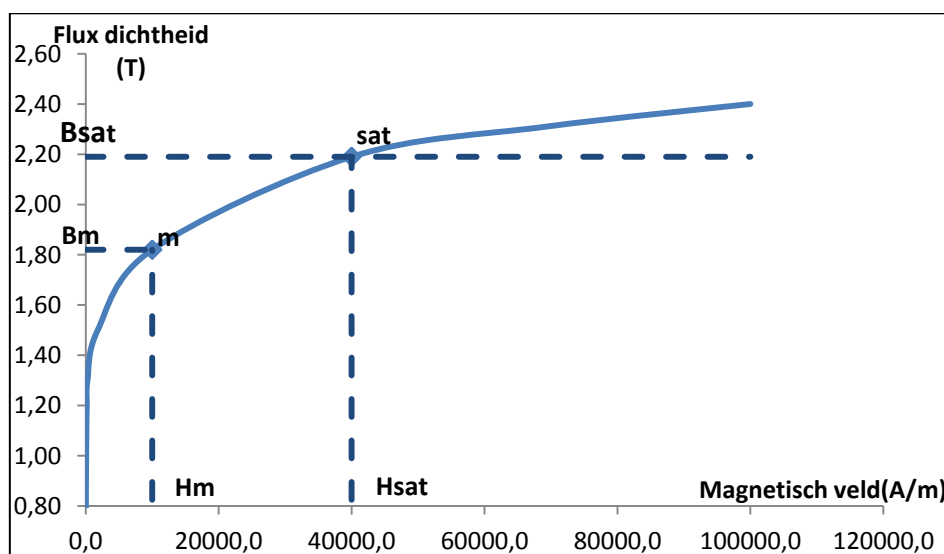
genoeg zijn we hier maar deels in geslaagd, als eindresultaat hadden we graag een stator gebouwd zodat deze zowel kon vergeleken worden met de EEM analyse als met een model dat reeds gebouwd is uit conventioneel silicium staal. Door de hardheid van het materiaal, met als gevolg dat vonken geen optie meer was, is dit onderdeel van de thesis niet volledig afgewerkt. Niettemin hebben we gedurende het volledige academiejaar vele inzichten vergaard in verliezen en randeffecten van elektrische materialen. Inzichten die mee aan de basis kunnen liggen van doctoraten en verder onderzoek, zo heeft deze thesis toch ook zijn deel bijgedragen aan een meer energiebewuste industrie.

# 1 Magnetisch gedrag van materialen

Magnetische eigenschappen van een materiaal worden gekenmerkt door hun dipoolmoment<sup>1</sup>. Er kunnen drie soorten materialen onderscheiden worden:

- Diamagnetische materialen: deze materialen bevatten geen permanent magnetisch dipoolmoment, in deze materialen worden dipoolmomenten geïnduceerd.
- Paramagnetische materialen: Dit zijn materialen die een permanent magnetisch dipoolmoment bezitten. Door het aanleggen van een uitwendig magnetisch veld zullen deze dipoolmomenten zich gaan richten volgens het aangelegde veld.
- Ferromagnetische materialen: Deze materialen zijn gelijkaardig aan paramagnetische materialen met als grote verschil dat de graad van gerichtheid van de magnetische dipoolmomenten veel groter is dan bij paramagnetische materialen. Het richten van de dipoolmomenten wordt de magnetisatie van het materiaal genoemd [1].

Het magnetisch gedrag van een materiaal kan gekarakteriseerd worden d.m.v. een  $B$ - $H$  curve: zie Figuur 1. Experimenteel kan er vastgesteld worden dat voor elk ferromagnetisch materiaal de magnetisatie  $M$  vanaf een waarde niet verder toeneemt. Er treedt namelijk verzadiging op. Vanaf deze veldsterkte – aangeduid met  $H_{\text{sat}}$  in Figuur 1 - zal de inductie  $B$  lichtjes stijgen bij een toename van het veld.



Figuur 1: Magnetisatiecurve van een magnetisch materiaal.

<sup>1</sup> Dipoolmoment: maat voor de polariteit van een molecuul

## 1.1 Scheiding van het ijzerverlies

IJzerverlies is een vorm van energieverlies dat ontstaat in de kern van een materiaal wanneer deze door een wisselende elektrische stroom wordt gemagnetiseerd. Bij gelijkstroom treden ijzerverliezen dus niet op. Dit verlies kan opgesplitst worden in: hysteresisverliezen, wervelstroomverliezen of ook klassiek verlies genoemd en tenslotte de excess verliezen.

$$P = P_{hys} + P_{cl} + P_{exc} \quad (1.1)$$

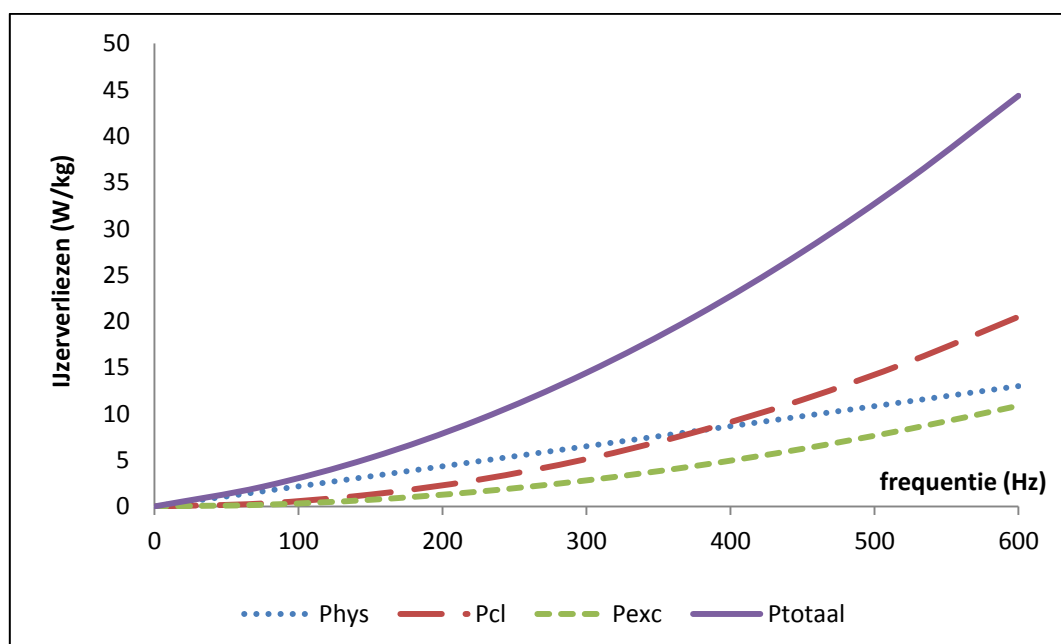
Het hysteresisverlies is de oppervlakte omsloten door de  $B-H$  curve waarbij  $f$  nadert naar 0. Dit kan ook als volgt benaderd worden:  $a * f * B^{alpha}$  waarbij  $a$  en  $alpha$  materiaal afhankelijke parameters zijn.

Het klassiek verlies is het wervelstroomverlies dat optreedt in de lamel. Dit kan als volgt geschreven worden:  $b * f^2 * B^2$ . Deze verliezen kunnen ook benaderd worden met onderstaande formule:

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2}{6} * \sigma * B^2 * f^2 * d^2 \quad (1.2)$$

Met  $d$  de dikte en  $\sigma$  de geleidbaarheid van de lamel. Het excess verlies is het verlies dat ontstaat op microscopische schaal en kunnen als volgt benaderd worden:  $c * f * B * (\sqrt{1 + e * f * B} - 1)$ .

Figuur 2 geeft de frequentieafhankelijkheid van de verschillende verliescomponenten weer voor het conventioneel silicium staal M235-35A .



Figuur 2: Frequentieafhankelijkheid van de ijzerverliescomponenten, Si-staal M235-35A.

Het totaal verlies kan vervolgens herschreven worden met onderstaande formule. In de literatuur zijn er andere formules terug te vinden die meer of minder variabelen omvatten. Binnen deze thesis zal er gebruik gemaakt worden van het Bertotti-Model [15]. Indien deze parameters gekend zijn kan de verliescurve volledig worden opgesteld. Deze formule is van toepassing als er gewerkt wordt in het frequentie domein, deze kan omgevormd worden zodat er berekeningen kunnen gemaakt worden in het tijdsdomein.

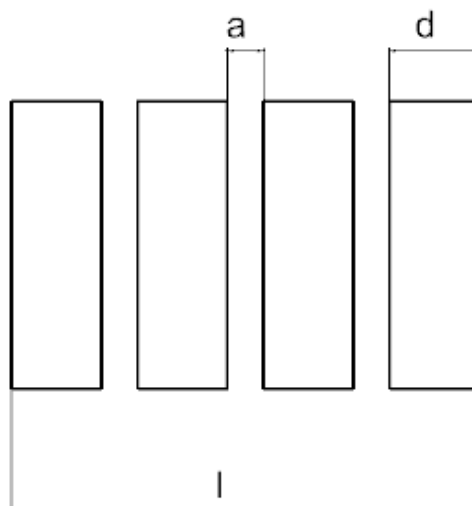
$$P_{\text{verlies}} = a B^\alpha f + b B^2 f^2 + c B f (\sqrt{1 + e B f} - 1) \quad (1.3)$$

## 1.2 Vulfactor blikpakket

In Figuur 3 wordt een magnetische kern beschouwd, deze bestaat uit verschillende lamellen die evenwijdig met elkaar gestapeld worden. Door het lamellieren van het blikpakket worden wervelstromen en dus het daarbij horende wervelverlies beperkt. De dikte van de lamellen is  $d$ , de afstand tussen de lamellen is  $a$ . De vulfactor van het blikpakket kan als volgt gedefinieerd worden.

$$\lambda = \frac{d}{d + a} \quad (1.4)$$

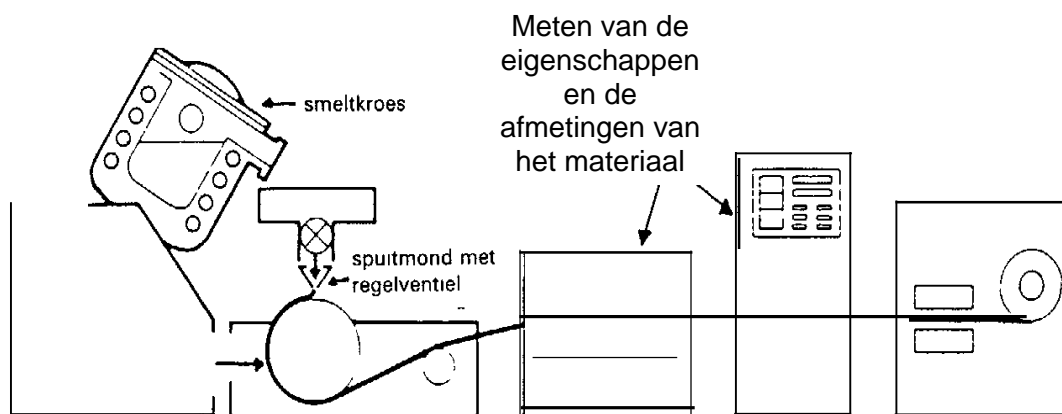
In de praktijk varieert de vulfactor tussen de 90% en de 98% [2]. Amorf materiaal kent slechts een vulfactor van 84%. Dit komt verder aan bod onder titel 2.2. Voor- en nadelen amorf materiaal. Het elektroblik heeft een hoge permeabiliteit in vergelijking met de ruimte tussen de lamellen. Deze bestaat uit lucht, isolatie,.. en is dus helemaal niet magnetisch. De inductie in de lamellen is bijgevolg veel groter dan de inductie in de luchtspleet [2].



Figuur 3: Blikpakket met lamellen.

## 2 Wat is amorf materiaal?

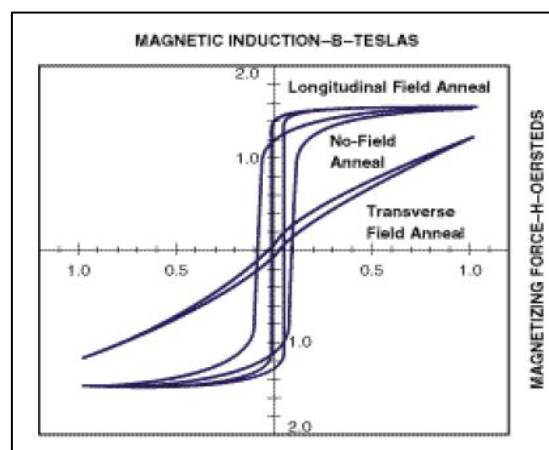
Amorf metaal wordt ook wel metallisch glas genoemd. Het materiaal wordt geproduceerd door gesmolten metaal zeer snel af te koelen. Door deze snelle stolling krijgen de atomen niet de tijd om zich netjes te ordenen in een kristalrooster. Het materiaal is in 1974 voor het eerst op de markt gebracht door het Amerikaanse bedrijf Allied Corp. De productie van het materiaal wordt gerealiseerd door het vloeibare materiaal te laten vloeien over een grote trommel die binnenin hol is en voorzien is van koelleidingen. Op deze manier wordt een rol metaal gecreëerd met een dikte van  $\pm 23$  micrometer. Door de eis van de hoge afkoelsnelheid is het ook moeilijk om dikke lamellen amorf materiaal te maken [3].



Figuur 4: Algemeen productieproces amorf materiaal [3].

### 2.1 Eigenschappen amorf

Volgens Metglas, verdeler en producent van amorf materiaal, kenmerkt het materiaal SA1 zich door zijn zeer lage ijzerverliezen. Deze bedragen slechts 0.29 W/kg op een frequentie van 50 Hz. Het materiaal verzadigt vanaf 1.56 T en heeft een zeer hoge permeabiliteit met een maximale waarde van: 45 000 in gegoten toestand (onbehandeld) en 600 000 als het materiaal uitgegloeid is onder een veld [4].



Figuur 5: Magnetisatie curve amorf [3].

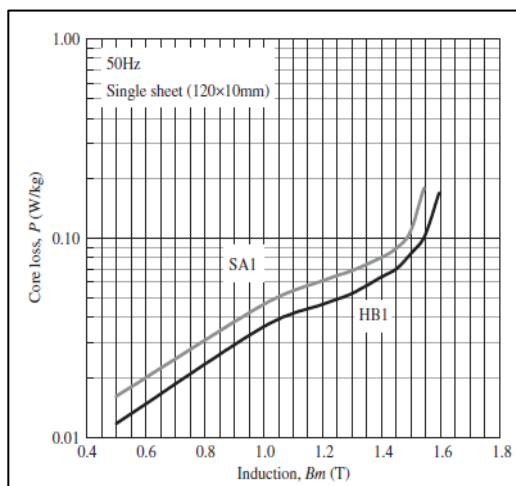
Amorf materiaal SA1 wordt reeds gebruikt voor het vervaardigen van het juk van transformatoren, waarbij het juk bestaat uit een gewikkelde amorfe strip dat weinig gesneden hoeft te worden. Hieruit is gebleken dat de afmeting en het geproduceerde geluid bij een transformator gemaakt uit amorf groter is dan bij een corresponderende siliciumstaal transformator. Dit is te verklaren doordat amorf materiaal sneller verzadigt dan siliciumstaal en de magnetostrictie<sup>2</sup> voor amorf groter is dan voor Si-staal. Uit deze vaststellingen is een nieuw materiaal ontwikkeld, HB1 [5].

Physical Properties	Magnetic Properties
Density (g/cm <sup>3</sup> ) As Cast . . . . .7.18	Saturation Induction (T) As Cast . . . . .1.56
Vicker's Hardness (50g load) . . . . .900	Maximum D.C. Permeability ( $\mu$ ):
Tensile Strength (GPa) . . . . .1-2	Annealed . . . . .600,000
Elastic Modulus (GPa) . . . . .100-110	As Cast . . . . .45,000
Lamination Factor (%) . . . . .>82	Saturation Magnetostriction (ppm) . . . . .27
Thermal Expansion (ppm/°C) . . . . .7.6	Electrical Resistivity ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) . . . . .130
Crystallization Temperature (°C) . . . . .508	Curie Temperature (°C) . . . . .399
Continuous Service Temp. (°C) . . . . .150	

Figuur 6: Eigenschappen amorf 2605SA1 [4].

### 2.1.1 Verschil tussen SA1 en HB1

Beide materialen zijn uitgegloeid op 523K-623K waarbij een magnetisch veld aangelegd is van 800 A/m in longitudinale richting. Uit Tabel 1 kan besloten worden dat HB1 een grotere saturatie-inductie (B) heeft in vergelijking met SA1. Figuur 7 geeft de ijzerverliezen weer voor beide materialen. Het verlagen van magnetostrictie is moeilijk, testen hebben aangetoond dat door gebruik te maken van HB1 het geluid gereduceerd wordt. Door gebruik te maken van HB1 kan het magnetisch werkingsgebied verhoogd worden met 0.1 – 0.15 T [5].



Figuur 7: IJzerverliezen van HB1 en SA1 [5].

	$B_s$ (T)	$B_{80}$ (T)	$H_c$ (A/m)
SA1	1.57	1.53	1.7
HB1	1.64	1.59	1.5

$B_{80}$ : Induction at a magnetic field of 80 A/m.

Tabel 1: Magnetische eigenschappen van HB1 en SA1 [5].

<sup>2</sup> Magnetostrictie: Het veranderen van de afmetingen van een materiaal onder invloed van een magnetische ordening



## 2.2 Voor- en nadelen amorf materiaal

Amorfe materialen hebben zeer lage magnetische verliezen en zijn bestand tegen corrosie [6]. Het materiaal laat zich eenvoudig magnetiseren waardoor er een lage magnetisatiestroom nodig is. Hoofdzakelijk op hogere frequenties zijn de verliezen merkbaar lager in vergelijking met Si-staal. De lage magnetisatiestroom en de lage verliezen vertalen zich in een beter rendement.

Amorfe materialen hebben een lagere stackfactor<sup>3</sup> en verzadigen sneller. Beide resulteren in een grotere bouwvorm van de motor. Een grotere motor ontwerpen heeft eventuele gevolgen voor de koperverliezen. Het is echter niet de bedoeling om de ijzerverliezen te reduceren en een toename te verkrijgen in de koperverliezen. Een mogelijke oplossing is de motor groter maken in diameter zodat de lengte kan behouden worden en niet meer koper noodzakelijk is.

De materialen hebben speciale mechanische eigenschappen, zoals hard en bros zijn, wat het snijden vermoedelijk [3]. Het materiaal wordt vervaardigd in dunne strips en wordt na het gloeien bros. Een gloeibehandeling wordt uitgevoerd om de goede magnetische eigenschappen te verkrijgen. Amorfe materialen hebben een hogere productie- en materiaalkost dan silicium staal. Dit vertaalt zich in een prijsstijging voor motoren die ontworpen worden met een amorfe stator [7].

## 2.3 Belang van amorf

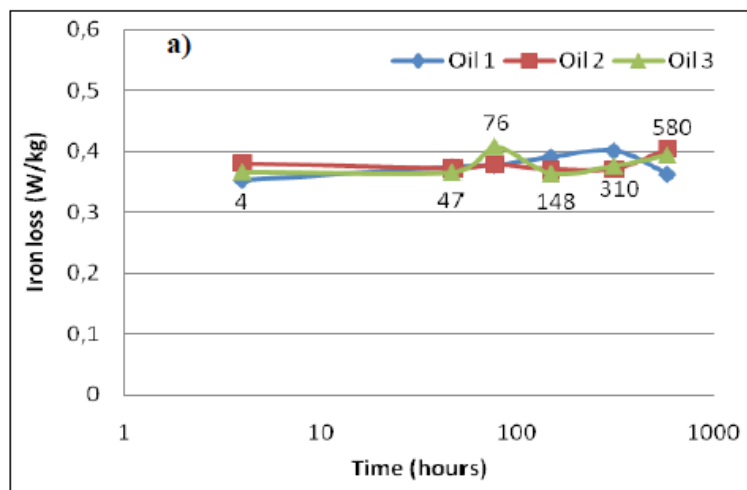
Energieverliezen in distributie transformatoren kunnen we voornamelijk toeschrijven aan de nullastverliezen. Deze tellen voor  $\pm 63\%$  van de totale verliezen [8]. Het reduceren van deze verliezen verhoogt het rendement en verkleint de inpakt op de opwarming van de aarde en leefmilieu. Onderzoeken hebben aangetoond dat door het gebruik van amorf materiaal de nullastverliezen in transformatoren kunnen gereduceerd worden met 60% ten opzichte van silicium staal [8]. Kan amorf materiaal ook deze positieve invloeden hebben bij het gebruik in elektrische machines? Deze thesis probeert hierop een antwoord te bieden.

---

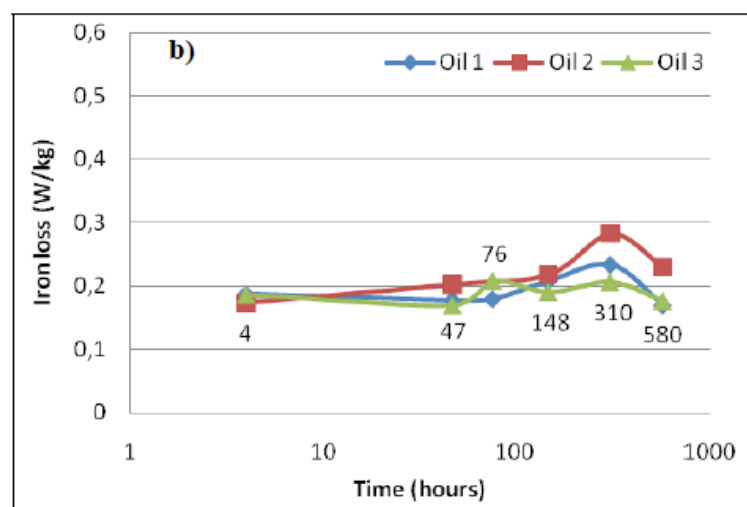
<sup>3</sup> Vulfactor van het blikpakket

## 2.4 Invloed van de temperatuur

De invloed van temperatuur op amorfe materialen is getest door een warmtebehandeling uit te voeren in een isolerende vloeistof op een temperatuur van 110 °C en 140 °C. De samples worden gedurende een bepaalde tijd in verschillende vloeistoffen ondergedompeld waarna de ijzerverliezen d.m.v. een SST<sup>4</sup> gemeten zijn. Zowel het materiaal SA1 en HB1 zijn in deze test onderzocht. Uit Figuur 8 en Figuur 9 kan besloten worden dat de ijzerverliezen constant blijven ook in extreme omstandigheden, namelijk 140°C voor 580 uur. Deze test toont opnieuw aan dat het nieuw ontwikkeld materiaal HB1 lagere verliezen heeft. Er dient wel voorzichtig omgesprongen te worden met warmtebehandelingen bij amorfe materialen. Deze bevinden zich namelijk in de metastabiele structuur waardoor een warmtebehandeling deze in een kristallijne structuur zou kunnen transformeren [8].



Figuur 8: IJzerverliezen SA1 op 140 °C [8].

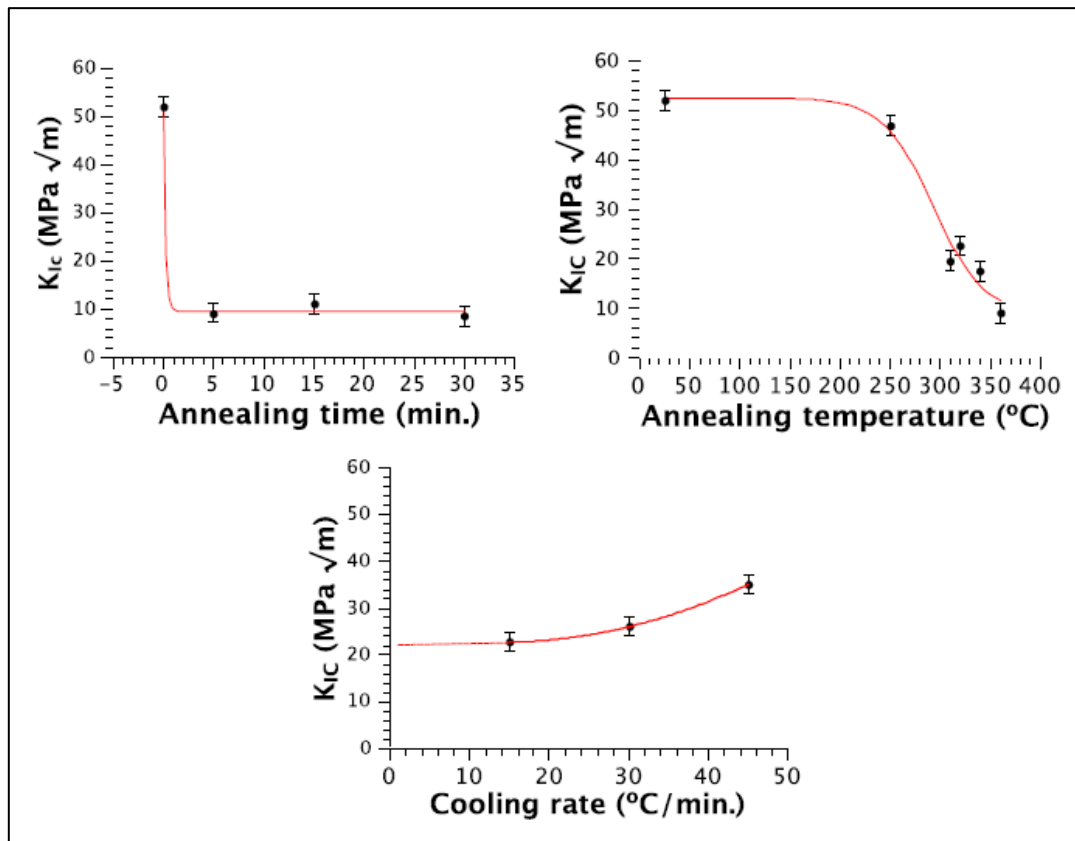


Figuur 9: IJzerverliezen HB1 op 140°C [8].

<sup>4</sup> SST= single sheet test, meetopstelling zoals een Epstein-raam waarbij een magnetische keten kan opgemeten worden

## 2.5 Invloed van gloeien

Amorf materiaal is gekend voor zijn zacht magnetisch gedrag, gloeien van het materiaal is van belang om dit gedrag nog te versterken. Metglas adviseert gloeien op 350°C voor 2 uur onder een argon- of stikstof atmosfeer met een aangelegd veld van 2500A/m [9]. Gloeien boven 250°C veroorzaakt reeds brosser worden van het materiaal. Figuur 10 geeft de brosheid van amorf materiaal weer in functie van de gloeitijd, gloeitemperatuur en afkoelsnelheid. Dit wordt gekarakteriseerd met de parameter  $K_{IC}$ , deze beschrijft de weerstand dat het materiaal kan bieden tegen breuk. Linksboven wordt het amorf gegloeid op een constante temperatuur van 360 °C waarbij men kan vaststellen dat gloeien onmiddellijk gevolgen heeft op de brosheid en deze constant blijft tijdens het proces. Rechtsboven wordt de brosheid uitgezet in functie van de gloeitemperatuur. De overgang van ductiel naar bros bevindt zich rond de 310 °C [10]. De onderste grafiek geeft de gevolgen van de afkoelsnelheid weer.



Figuur 10: Brosheid in functie van tijd, temperatuur en afkoelsnelheid [10].

### 2.5.1 Gloeibehandelingen

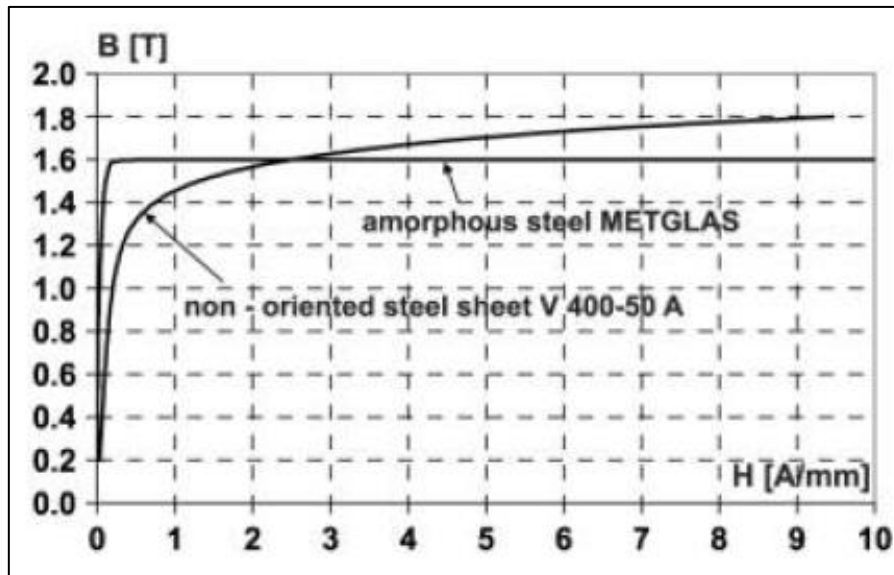
In onderstaande Tabel 2 is een gloeibehandeling van 1 uur uitgevoerd op 2 verschillende temperaturen en dit zowel onder magnetisch veld als zonder magnetisch veld. Metglas adviseert gloeien met een veld. Uit deze resultaten blijkt dat het aanleggen van een veld echter weinig invloed heeft op de ijzerverliezen, maar wel een significant effect heeft op de permeabiliteit.

Treatment conditions	Magnetic properties (50 Hz)				
	Magnetizing field $H_m$ (A/m)	Magnetic Induction $B_m$ (T)	Remanence $B_r$ (T)	Coercivity $H_c$ (A/m)	Specific power losses $P$ (W/kg)
643K/1h $H_l = 1000\text{A/m}$	100	1,53	1,42	4,5	0,26
643K/1h $H_l = 0\text{A/m}$	100	1,35	1,02	7,0	0,31
623K/1h $H_l = 1000\text{A/m}$	100	1,26	1,03	5,8	0,23
623K/1h $H_l = 0\text{A/m}$	100	1,01	0,78	6,9	0,22
	160	1,1	0,8	8,0	0,29

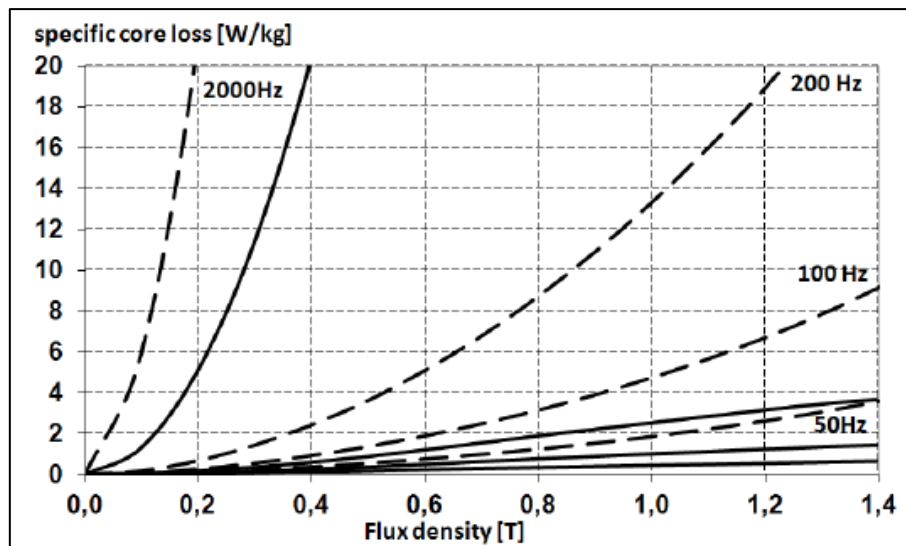
Tabel 2: Verschillende gloeibehandelingen [11].

### 2.6 Amorf versus silicium staal

Onderstaande grafiek maakt de vergelijking tussen elektrisch staal ( $V$  400-50 A) en amorf materiaal (2605HB1M), waarbij in Figuur 11 de  $B-H$  curve wordt weergegeven. Hieruit kan afgeleid worden dat het amorf materiaal veel sneller zal verzadigen (1.64 T) dan het huidig elektrisch staal. De permeabiliteit is merkbaar hoger. Deze resultaten zijn verkregen door experimentele metingen. In Figuur 12 worden de ijzerverliezen op verschillende frequenties voorgesteld. De volle lijnen geven de resultaten voor het amorf materiaal en de stippellijnen het resultaat voor het elektrisch staal M600-50A. Het is duidelijk waar te nemen dat amorf materiaal zeer lage ijzerverliezen hebben, zeker op hoge frequenties is het verschil tussen amorf materiaal en elektrisch staal sterk uiteenlopend. Elektrische machines vervaardigd uit amorf materiaal zouden een beduidend voordeel kunnen bieden voor hogesnelheidsmotoren. Als bij huidige inductie motoren die voedingsfrequentie toeneemt, nemen de ijzerverliezen zeer sterk toe en beginnen deze te overheersen [12].



Figuur 11: Magnetisatie curve V 400-50 A/ 2605HB1M [16].



Figuur 12: IJzerverliezen gemeten bij verschillende frequenties [12].

## 2.7 Stator uit amorf

De drie belangrijkste verliezen in een motor zijn mechanische verliezen, koperverliezen en ijzerverliezen. De mechanische verliezen en de koperverliezen zijn reeds voldoende onderzocht en in de mate van het mogelijke geminimaliseerd. Het gebruik van amorf materiaal wordt nog grondig bestudeerd [13]. Het materiaal is zeer gevoelig aan mechanische spanningen en zijn verliezen kunnen sterk verhogen tijdens het vervaardigen van de motor. Alsook zorgt de brosheid van het materiaal voor een extra moeilijkheid om dit materiaal te kunnen snijden. Dit zijn dan ook de redenen waarom amorf nog niet toegepast wordt voor het vervaardigen van motoren. In standaard motoren en in normaal werkingsgebied zijn de koperverliezen hoger dan de ijzerverliezen in een motor. Wat is dan nog de meerwaarde door het gebruik van amorf materiaal?

In hoge snelheidsmotoren is echter het ijzerverlies het dominant verlies, in dit type motoren kan amorf materiaal een aanzienlijke meerwaarde bieden. Alsook kan door de ijzerverliezen sterk terug te dringen in sommige toepassingen een sterk verhoogd rendement verkregen worden. Denk bijvoorbeeld aan elektrische voertuigen waarbij de elektrische motor kan werken bij nullast. In deze omstandigheden zijn de ijzerverliezen de grootste verliezen aangezien er geen stroom vloeit door de wikkelingen [13].

### 2.7.1 IJzerverliezen in een stator

Recent is er een onderzoek uitgevoerd waarbij de stator van een IPMM<sup>5</sup> vervaardigd is uit amorf materiaal (Metglas 2605HB1M) en wordt vergeleken met een stator gebouwd uit conventioneel siliciumstaal [13]. Beide rotors zijn gebouwd uit conventioneel staal. Tabel 4 geeft de opgemeten resultaten weer, deze tonen aan dat het totaal ijzerverlies in een stator gebouwd uit amorf materiaal een factor 2 lager ligt t.o.v. een stator gebouwd uit silicium staal. Echter de numeriek berekeningen in Tabel 3 tonen een verlaging met een factor 3. Dit verschil is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan de fabricatie van de amorfe stator, door het versnijden ontstaan inwendige spanningen. Deze degradatie van het materiaal resulteert hoogstwaarschijnlijk in een stijging van de ijzerverliezen.

Speed (rpm)	AMM-IPM core losses (W)	NO-IPM core losses (W)
750	0.526	1.619
1500	1.420	4.133
2250	2.493	7.036
3000	3.783	10.473

Tabel 3: IJzerverliezen d.m.v. EEM [13].

Speed (rpm)	AMM-IPM core losses (W)	NO-IPM core losses (W)
750	0.817	1.516
1500	1.963	3.864
2250	3.581	7.092
3000	6.000	12.472

Tabel 4: IJzerverliezen ontworpen testmodel [13].

<sup>5</sup> Interior Permanent Magnet Machine

## 2.8 Verschillende bewerkingsmethoden

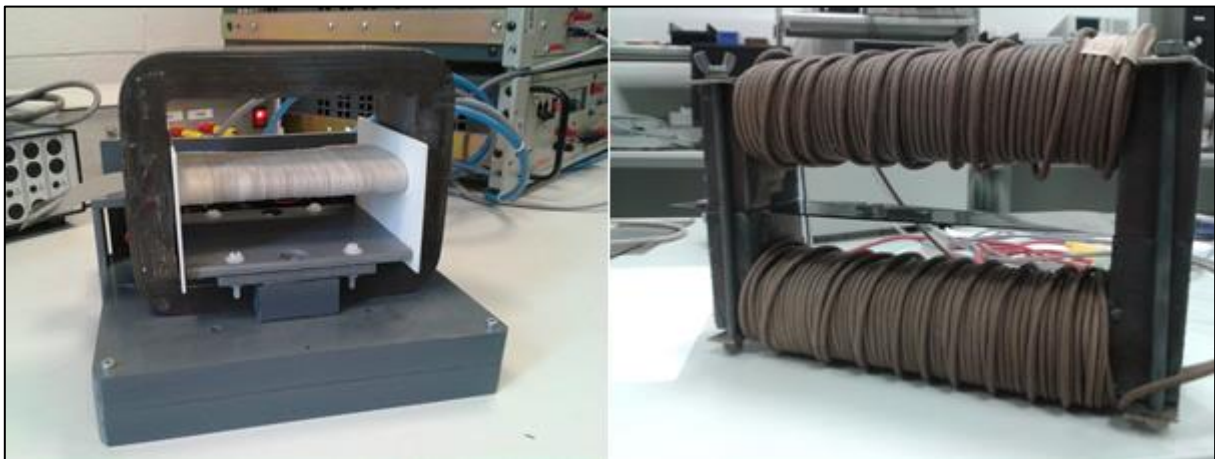
In de literatuur wordt er geen sluitend antwoord gegeven op de vraag welke bewerkingsmethode het best is voor amorf materiaal. De problematiek voor gebruik van amorf materiaal ligt hem in zijn hardheid en de verwerkingsmogelijkheden. Binnen het kader van deze thesis zal er getracht worden om op deze vraag een antwoord te bieden. Er zal ook onderzocht worden of het eventueel mogelijk is deze nadelige eigenschappen te verminderen of zelfs te elimineren. Met de brosheid van het materiaal in het achterhoofd kan er verder worden uitgekeken naar mogelijke toepassingen voor amorf materiaal.

Er zijn reeds onderzoeken uitgevoerd op motoren vervaardigd uit amorf materiaal d.m.v. onderstaande mechanische bewerkingen:

- Waterstraal snijden [14]
- Laser snijden [11]
- Draadvonken [13]

### 3 Bouw juk gloeibehandeling

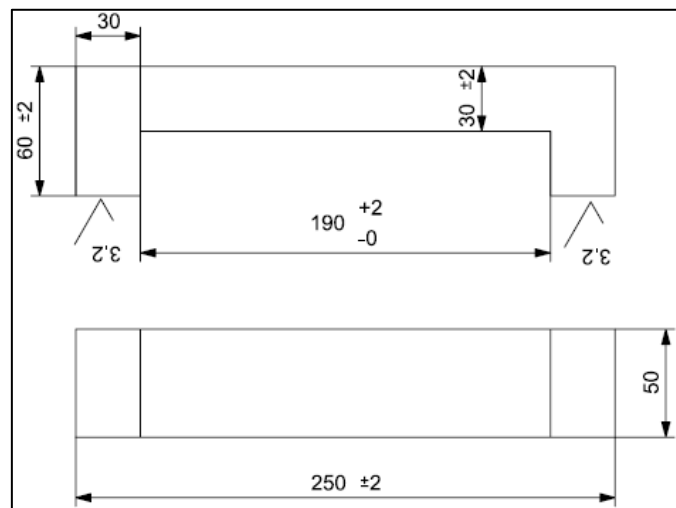
Zoals bovenstaand beschreven adviseert Metglas uitgloeien onder een veld van  $\pm 2400$  A/m. In functie van de grootte van de oven en de afmetingen van de SST opstelling in het labo is een geschikt juk ontworpen zodoende de gloeibehandeling onder veld te kunnen uitvoeren. Bijlage 1 geeft de technische tekening van het juk. Het uitgloeien gebeurt onder stikstof atmosfeer en op een temperatuur van  $350$  °C. Hiervoor is gebruik gemaakt van hoge temperatuur draad  $1.5$  mm<sup>2</sup> geschikt tot  $400$ °C. –Bijlage 2



Figuur 13: Links: SST opstelling labo, rechts: ontworpen juk.

#### 3.1 Berekeningen juk

Het juk is in Figuur 14 voorgesteld, het materiaal wordt tussen twee jukhalften geplaatst. Het materiaal heeft een dikte van  $23$   $\mu\text{m}$ , verzadigt bij  $1.56$  T en hierin is een veld van  $2400$  A/m gewenst. In combinatie met de afmetingen van het juk, zie hiervoor bijlage 1, kan deze magnetische keten worden opgelost.



Figuur 14: Afmetingen juk.



### 3.1.1 Flux in amorf en juk

$$\begin{aligned}\phi_{Amorf} &= B_{Amorf} * A_{Amorf} = 1.56T * 28\mu m * 0.05m = 0,000002184 \text{ Wb} \\ \Phi_{Juk} &= \frac{\phi_{Amorf}}{2} = 0,000001092 \text{ Wb}\end{aligned}\quad ( 3.1 )$$

### 3.1.2 Veldsterkte juk

$$B_{Juk} = \frac{\phi_{Juk}}{A_{Juk}} = \frac{0,000001092 \text{ Wb}}{0.03m * 0.05m} = 0,000728T \quad ( 3.2 )$$

$$H_{Juk} = \frac{B_{Juk}}{\mu_0 * \mu_r} = \frac{0,000728T}{4\pi 10^{-7} * 500} = 1,158647986 \text{ A/m} \quad ( 3.3 )$$

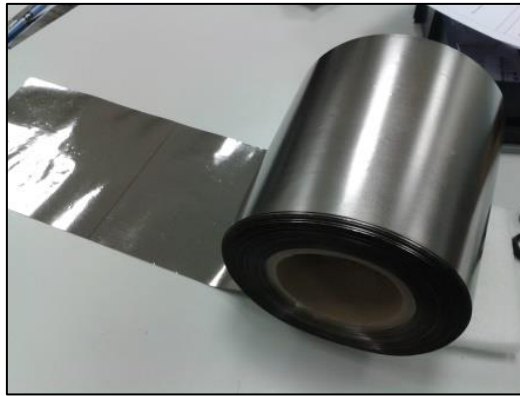
### 3.1.3 Aantal windingen

Het benodigd aantal windingen kan bepaald worden met de wet van Ampère, het gewenste magnetisch veld - aangeduid met  $H$  in vergelijking 3.4 - dient een grootte te hebben van 2400 A/m. De aangelegde stroomsterkte - aangeduid met  $I$  - is 5A. Dit resulteert in 106 windingen per juk helft.

$$\begin{aligned}N * I &= \sum H * L \\ N * I &= H_{Amorf} * L_{Amorf} + H_{Juk} * L_{Juk} \\ N &= \frac{2400A/m * 0.22m + 1.158A/m * 0.31m}{5A} = 106\end{aligned}\quad ( 3.4 )$$

## 4 Is amorf nu werkelijk zo veel belovend?

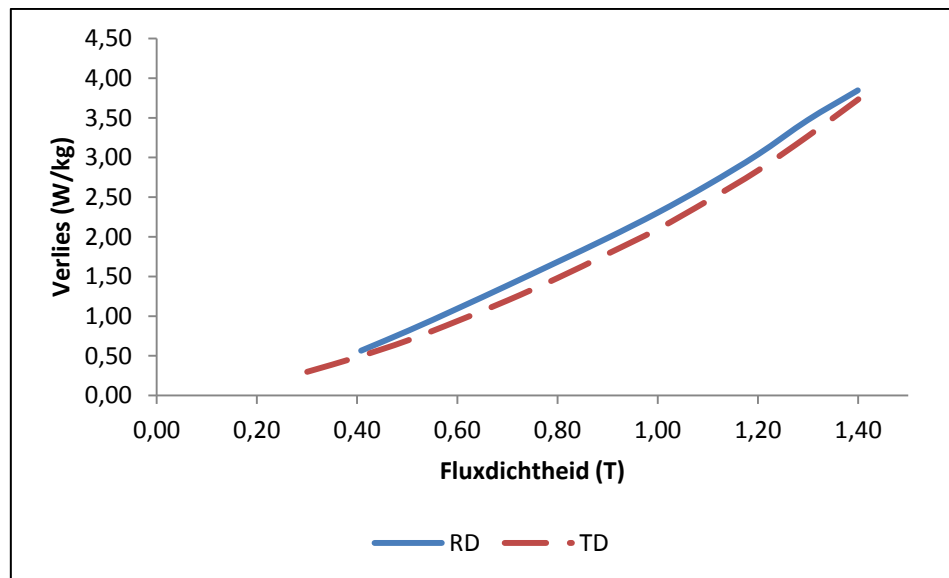
Welke eigenschappen heeft amorf, zijn de verliezen werkelijk zo laag, hoe zit het nu net met de befaamde hardheid van het materiaal. Op tal van vragen zal onderstaand een sluitend antwoord geformuleerd worden. Het in dit onderzoek gebruikte materiaal is: 1K101 –Bijlage 3 van de producent Catech. In de literatuur wordt steeds onderzoek uitgevoerd op Metglas samples, om eventueel enige verschillen tussen beide materialen te kunnen uitsluiten worden reeds gepubliceerde resultaten opgemeten en vergeleken. De bekomen resultaten zijn opgemeten via een SST meetopstelling met een striplengte van 0,157 m en stripbreedte van 60 mm.



Figuur 15: Amorf, 1K101 Catech.

### 4.1 Is het materiaal weldegelijk amorf?

Het materiaal is door zijn productie methode verondersteld volledig amorf te zijn, wat zoveel wil zeggen als niet kristallijn. Hierdoor zou er dus geen voorkeursrichting voor de flux aanwezig mogen zijn binnenin het materiaal. Dit is opgemeten door het materiaal in de RD (rolrichting) en de TD (transversale richting) op te meten. Figuur 16 geeft de opgemeten resultaten weer. Hieruit is er een zeer miniem verschil op te merken, dit is echter zo klein dat het te verwaarlozen is. De reden waarom er consequent meer verliezen zijn in de rolrichting is niet volledig duidelijk, een amorf materiaal zou geen uitgesproken betere richting mogen bevatten. Tijdens de meting dient het materiaal eenmalig manueel 90°verdraaid te worden, hierdoor kunnen eventueel de kleine verschillen ontstaan zijn door niet exact dezelfde meetcondities.



Figuur 16: Niet uitgegloeid amorf materiaal, verliezen bij 400Hz.

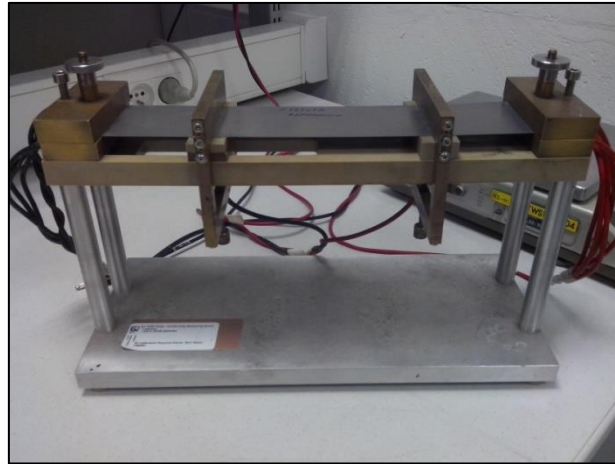
## 4.2 Visueel aspect

Bij nader onderzoek van het materiaal met het blote oog, is het materiaal langs één zijde blinkend en langs de ander zijde mat. Daarnaast zijn op het materiaal langs één zijde kleine bubbels aanwezig, het bevat ook minuscule perforaties. De aanwezigheid van de bubbels is te verklaren door het productieproces. Deze ontstaan door luchtbelletjes die tussen het vloeibaar metaal en het koperen wiel gevangen raken. De kleine perforaties zijn met het blote oog enkel op te merken wanneer het materiaal tegen het licht wordt gehouden.

## 4.3 Elektrische eigenschappen

Naast de magnetische eigenschappen zijn de elektrische eigenschappen zeker niet onbelangrijk, denk bv. aan de conductiviteit<sup>6</sup> noodzakelijk voor EEM-analyse. Als eerste is het noodzakelijk te bepalen of er een coating op het materiaal aanwezig is, dit is niet het geval bij dit materiaal. De conductiviteit is bepaald d.m.v. een vierpunts-meting en heeft een waarde van 0.7944 MS/m. Figuur 6 toont aan dat het Metglas materiaal een conductiviteit heeft van: 0.7692 MS/m.

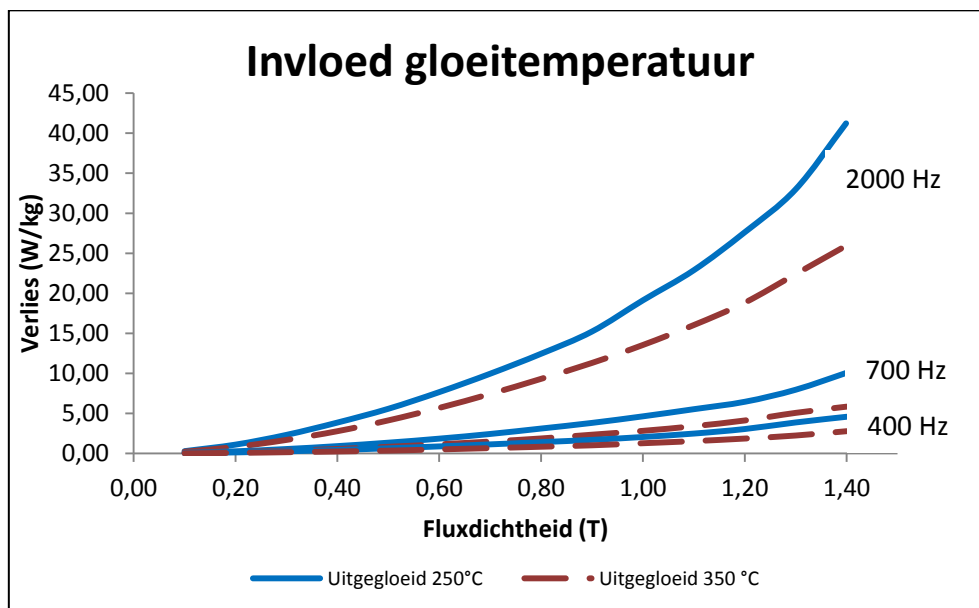
<sup>6</sup> Conductiviteit of elektrische geleidbaarheid is de eigenschap van een materiaal om de elektrische stroom te geleiden



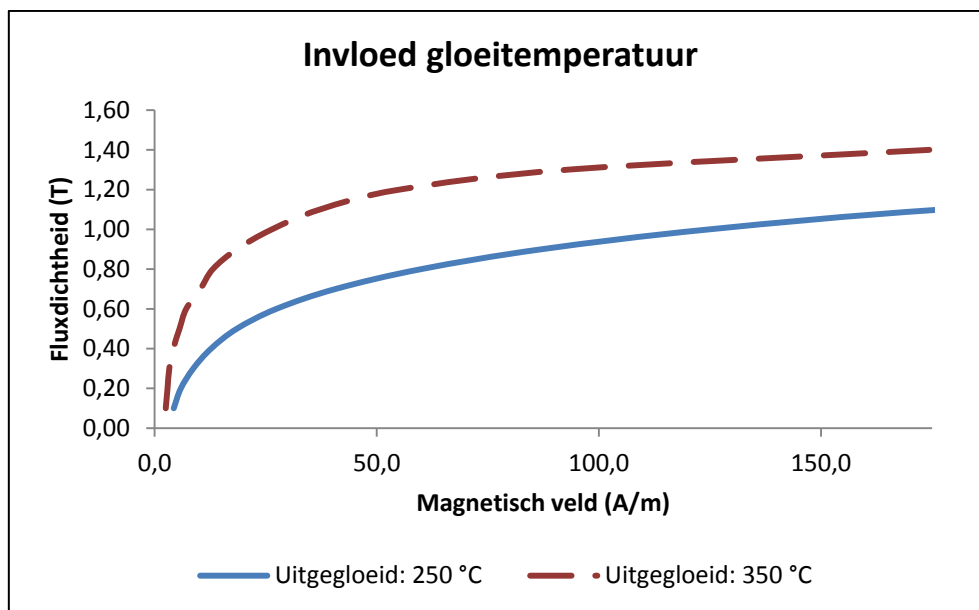
Figuur 17: Vierpunts-meting.

#### 4.4 Temperatuur gloeibehandeling

Metglas adviseert het uitgloeien van het materiaal. De meerwaarde die hieruit voortvloeit en wat de parameters zijn van de gloeibehandeling zijn twee hoofdvragen die dienen beantwoord te worden. Figuur 18 vergelijkt een gloeibehandeling van 2 uur op een temperatuur van 250 °C met een gloeibehandeling op 350 °C. Beide samples zijn zonder het aanleggen van een magnetisch veld uitgloeid. De resultaten zijn spectaculair, de ijzerverliezen zijn bij een temperatuur van 350 °C gehalveerd t.o.v. 250 °C. Figuur 19 maakt opnieuw de vergelijking tussen beide temperaturen, hieruit kan worden vastgesteld dat de permeabiliteit sterk verhoogt door het toepassen van een gloeibehandeling. Metglas adviseert een gloeitemperatuur van  $\pm 350$  °C voor 2 uur, Figuur 18 en Figuur 19 tonen aan dat deze vooropgestelde waarde correct is.



Figuur 18: IJzerverliezen amorf gegloeid op 250 °C en 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



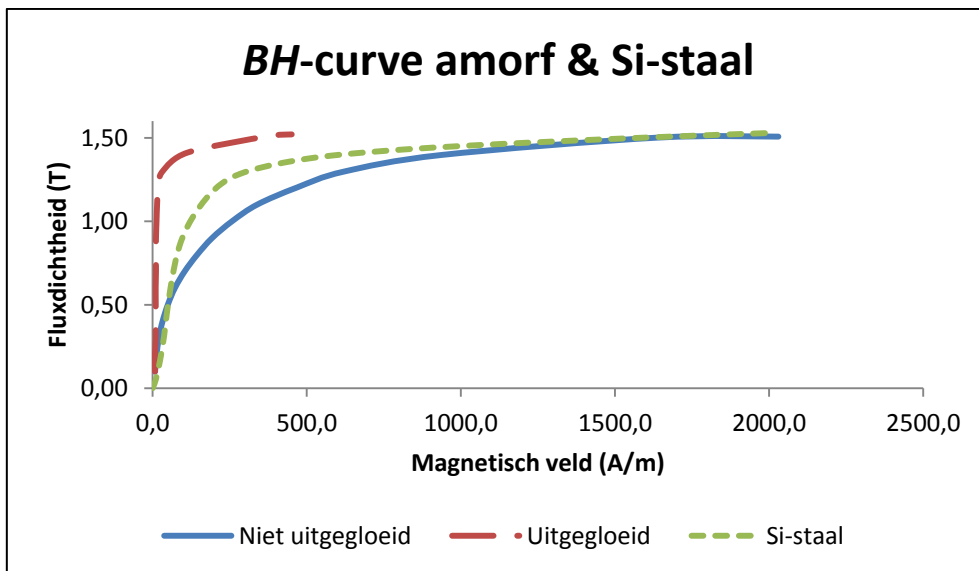
**Figuur 19: Magnetisatie curve amorf gegloeid op 250 °C en 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.**

## 4.5 Magnetische eigenschappen amorf materiaal

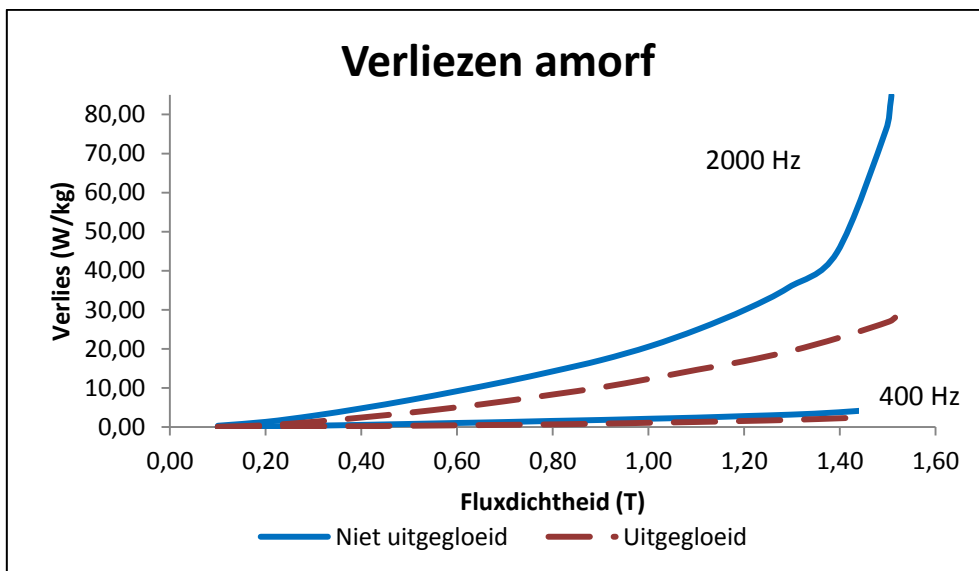
In niet uitgegloeide toestand is het amorf materiaal ductiel, na een gloeibehandeling veranderen de mechanische eigenschappen sterk, het materiaal wordt namelijk extreem bros. Zoals titel 4.4. Temperatuur gloeibehandeling aantoon weegt dit nadeel niet op tegen de beduidend betere magnetische eigenschappen dat het materiaal verkrijgt na een gloeibehandeling.

### 4.5.1 Magnetische eigenschappen niet uitgegloeid amorf materiaal

Het opmeten van de  $BH$ -curve en de ijzerverliezen van het niet uitgegloeid amorf materiaal heeft als doelstelling een referentie vast te leggen zodat de verbetering door verschillende gloeibehandelingen eenvoudig kan aangetoond worden. Figuur 20 toont de  $BH$ -curve van het amorf materiaal en het conventioneel silicium staal 35PN250. Het niet uitgegloeide amorf heeft vergelijkbaar gedrag als het conventioneel staal, echter verzadigt het op 1.56T. Deze curves, behalve de curve van het conventioneel staal zijn experimenteel verkregen. De curve van het silicium staal is verkregen uit de datasheet. Een gloeibehandeling heeft een grote invloed op de ijzerverliezen zoals kan gezien worden in Figuur 21. Zeker op hogere frequenties zijn er beduidend grote verschillen op te merken.



Figuur 20: Magnetisatie curve amorf materiaal vergeleken met conventioneel Si-staal.

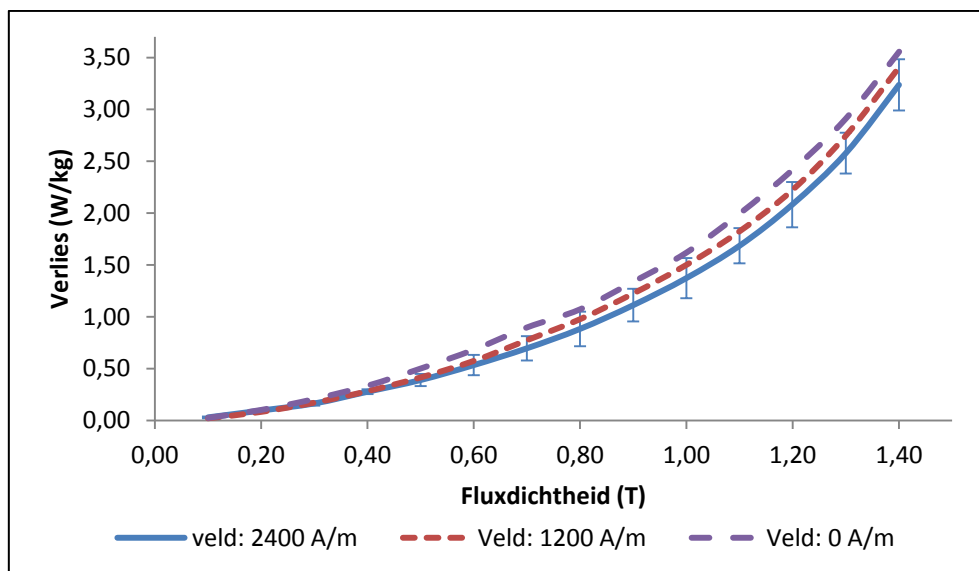


Figuur 21: Verliezen niet uitgegløeid en uitgegløeid amorf materiaal, met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur, onder 2400 A/m veld.

#### 4.5.2 Voordelen uitgegløeid amorf materiaal

Voorgaand is aangetoond dat een gloeibehandeling op 350 °C een sterke meerwaarde biedt. De volgende samples zullen steeds op een temperatuur van 350 °C uitgegløeid worden. Metglas adviseert uitgløeien onder een magnetisch veld van  $\pm 2400$  A/m. In de literatuur zijn er artikels terug te vinden waarbij er slechts onder een veld van 1000 A/m uitgegløeid wordt. Vaak wordt niet vermeld of er al dan niet een veld aangelegd wordt voor het uitgløeien. Welke meerwaarde heeft uitgløeien onder een veld? Onderstaande Figuur 22 geeft de bekomen resultaten weer. Alle samples zijn gedurende 2 uur op een temperatuur van 350 °C gegløeid onder een verschillend magnetisch veld (0 A/m, 1200 A/m en 2400 A/m). Voor elk veld is er telkens op een andere

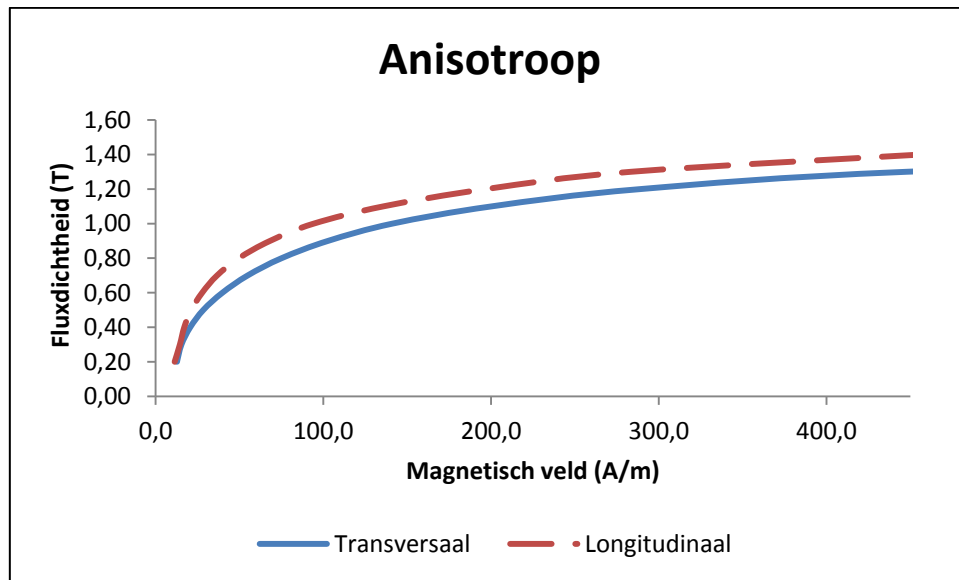
sample een controle meting uitgevoerd, concreet zijn er voor elk aangelegd longitudinaal veld twee samples opgemeten. Elk sample is gedurende twee uur uitgedroogd op 350°C onder stikstof atmosfeer, dit is voor elke sample afzonderlijk gebeurd. Deze gloeibehandelingen zijn uitgevoerd zodat de variatie op de verschillende samples kan bepaald worden. Figuur 22 geeft deze verliezen en de spreiding voor gloeien onder een veld, deze zijn weergegeven voor de frequentie van 400 Hz. De spreiding voor een veld van 2400 A/m is weergegeven, de spreiding voor de andere is niet getoond maar is in dezelfde grootteorde. Hieruit is duidelijk te besluiten dat het aanleggen van een magnetisch veld leidt tot een materiaal met beter magnetische eigenschappen. Het verschil tussen gloeien met en zonder veld is echter kleiner dan verwacht, zelfs zo klein dat variatie op beide samples meestal overlapt. Aangezien het verschil tussen gloeien onder veld of zonder veld zodanig klein is zal in deze thesis steeds uitgedroogd worden zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



**Figuur 22: Invloed van het aangelegde veld op de ijzerverliezen bij een frequentie van 400Hz, gloeibehandeling van 350 °C gedurende 2uur.**

### 4.5.3 Anisotroop

Om de beste magnetisch eigenschappen van het amorf materiaal te verkrijgen wordt er een longitudinaal magnetisch veld aangelegd. Dit zorgt echter voor het anisotroop worden van het materiaal wat onaanvaardbaar is in elektrische machines. Zoals Figuur 23 aantoont, de permeabiliteit verlaagt sterk wanneer een transversaal veld wordt aangelegd.



Figuur 23: Invloed van de richting van het aangelegde veld bij een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur, onder 2400 A/m veld.

## 4.6 Vergelijking met de literatuur

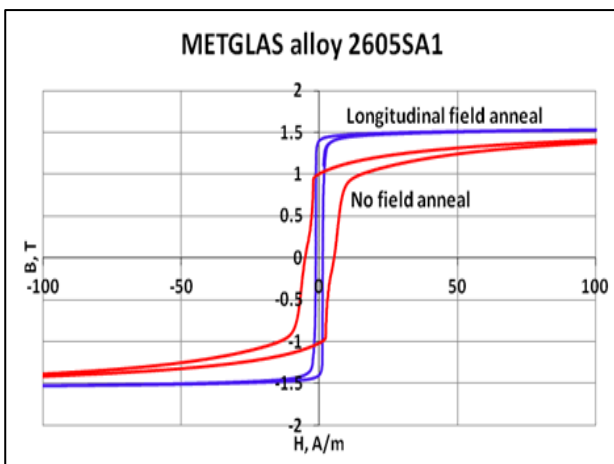
Tabel 5 maakt de vergelijking van het ijzerverlies tussen het Metglas materiaal 2605SA1 en het materiaal 1K101 van Catech dat in deze thesis opgemeten en bestudeerd wordt. Uit Tabel 5 kan besloten worden dat de ijzerverliezen opgemeten voor het Catech materiaal volledig in lijn liggen met de voorgeschreven verliezen volgens Metglas. Dit verlies is opgegeven voor onder veld uitgegloeid materiaal. In Tabel 5 wordt dit zowel vergeleken met niet uitgegloeide samples als met samples uitgegloeid onder een magnetisch veld van 2400 A/m, 1200 A/m en 0 A/m.



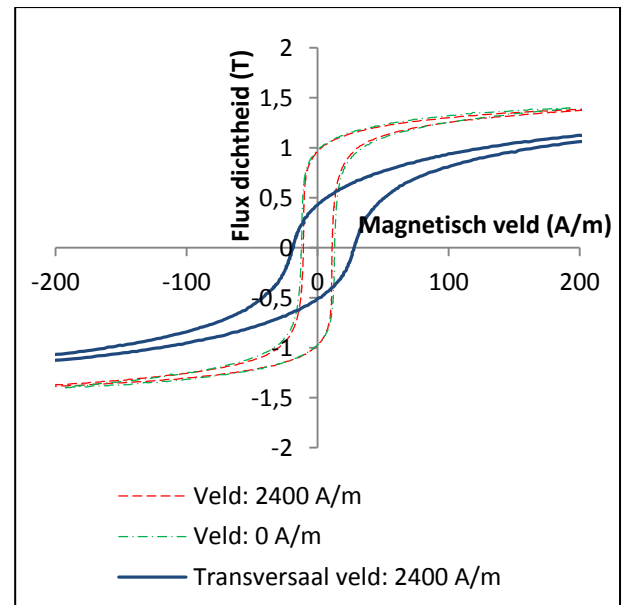
<b>IJzerverliezen (W/kg)</b>					
	Metglas 2605SA1	Catech 1K101			
	Gegloeid 2400 A/m	Niet uitgegloeid	Gegloeid 0 A/m	Gegloeid 1200 A/m	Gegloeid 2400 A/m
<b>60 Hz en 1.3T</b>	$\leq 0,17$				
<b>50 Hz en 1.3T</b>		0,26	0,18	0,155	0,15
<b>60 Hz en 1.4T</b>	$\leq 0,20$				
<b>50 Hz en 1.4T</b>		0,31	0,20	0,19	0,19

Tabel 5: Vergelijking verliezen amorf materiaal van de producenten Metglas en Catech.

Figuur 24 en Figuur 25 maken opnieuw de vergelijking tussen het Metglas materiaal en het materiaal Catech dat in deze thesis opgemeten wordt. De hysteresislus voor drie verschillende velden wordt in Figuur 25 weergegeven. De rode lus wordt verkregen door de sample een gloeibehandeling te geven in aanwezigheid van een longitudinaal veld. De blauwe lus wordt bekomen d.m.v. dezelfde gloeibehandeling met aanwezigheid van een transversaal veld. De groene lus is bekomen door de sample uit te gloeien zonder het aanleggen van een magnetisch veld. Opmerkelijk is dat bij het Catech materiaal het verschil in coërciviteit tussen uitgloeien met magnetisch veld t.o.v. uitgloeien zonder een magnetisch veld slechts weinig verschilt i.v.m. de verschillen die volgens Metglas aanwezig zijn.



Figuur 24: Magnetisatie curves Metglas 2605SA1.



Figuur 25: Magnetisatie curves Catech 1K101.

## 4.7 Mechanische verspaanbaarheid amorf materiaal

Amorfe materialen worden omschreven een extreme hardheid te kennen en mechanisch moeilijk te verwerken zijn. Deze nadelige eigenschappen leveren naar alle waarschijnlijkheid degradatie van het materiaal op na het mechanisch verwerken ervan. Welke verwerkingsmogelijkheid levert het beste resultaat op of welke mogelijkheid wordt helemaal uitgesloten? Dient het materiaal eerst verwerkt te worden en dan pas uitgegloeid te worden, of levert het tegenovergestelde proces betere resultaten op? Om hierop een sluitend antwoord te kunnen bieden moet eerst onderzocht worden welke mechanische bewerkingen al dan niet kunnen toegepast worden op het amorf materiaal.

### 4.7.1 Ponsen

Figuur 26 geeft twee afbeeldingen weer waarbij een vierkant 50x50 uit het niet uitgegloeid amorf materiaal is geponst. De rechter afbeelding toon aan dat ponsen van het materiaal zonder gloeibehandeling mogelijk is. Wel dient door de dikte van slechts 23  $\mu\text{m}$  een correcte speling tussen pons en matrijs in acht gehouden te worden. Deze is in de linkse figuur te groot waardoor de randen afgescheurd zijn.



**Figuur 26: Niet uitgegloeid amorf materiaal, links: niet correct geponst, rechts: correct geponst.**

Figuur 27 toont een ponsbewerking van het amorf materiaal na een gloeibehandeling op 350 °C. Wegens de extreme omschreven brosheid na gloeien waren de verwachtingen voor deze bewerking niet hoogstaand. Uit onderstaande figuur blijkt dan ook dat ponsen na een gloeibehandeling uitgesloten is.



**Figuur 27: Geponst uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur.**

#### 4.7.2 Knippen met plaatschaar

Indien gebruik gemaakt wordt van een plaatschaar voor het knippen van niet uitgegloeid amorf materiaal komt hetzelfde probleem voor als bij de bewerking ponsen. Door de toleranties van de plaatschaar is een enkel vel amorf materiaal te dun om te versnijden. Om dit op te lossen is er gebruik gemaakt van een stuk staal om het amorf materiaal tijdens het snijden plaatslijk te verdikken. Naar industriële toepassingen is het gebruik van een plaatschaar minder interessant, deze manier van verwerken is traag en er kunnen enkel rechte sneden worden gemaakt. Aansluitend aan de resultaten van het ponsen is gebleken dat het gebruik van een plaatschaar ook geen oplossing biedt voor het versnijden van het uitgegloeid materiaal wegens de brosheid. Zoals in Figuur 29 aangetoond wordt, breekt het materiaal af op de plaats waar de snede wordt gemaakt. Figuur 28 geeft de snede van het niet uitgegloeid amorf materiaal weer.



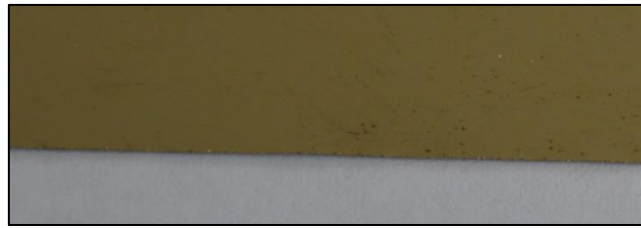
**Figuur 28: Plaatschaar gesneden niet uitgegloeid amorf materiaal.**



**Figuur 29: Plaatschaar gesneden uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur.**

#### 4.7.3 Lasersnijden

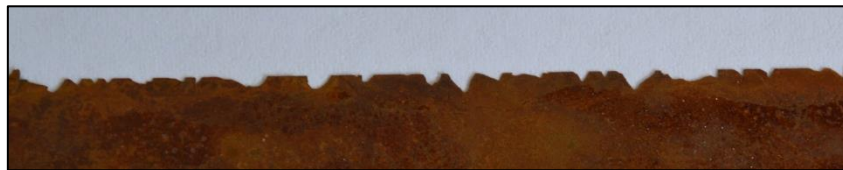
Lasersnijden van zeer dunne strips is niet eenvoudig, dit kan niet op elke machine uitgevoerd worden. Hiervoor dient er beroep gedaan te worden op een gespecialiseerde firma die beschikt over een microlasersnijmachine. Uit deze bewerking is gebleken dat zoals voorgaand niet uitgegloeid amorf materiaal perfect te verwerken is met een laser, dit wordt aangetoond in Figuur 30. Het uitgegloeide materiaal verbrokkelt echter direct na aanraking met de laserstraal. Met het blote oog zijn er alvast geen verschillen te bemerken tussen het gelaserde materiaal en het materiaal dat geknipt is met de plaatschaar. Metingen zullen moeten uitwijzen welke gevolgen deze bewerkingen al dan niet hebben op de magnetische eigenschappen van het materiaal.



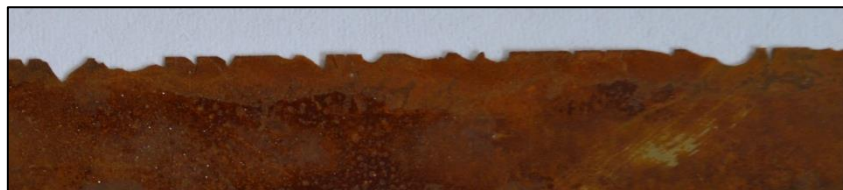
**Figuur 30: Laser gesneden niet uitgegloeid amorf materiaal.**

#### 4.7.4 Draadvonken

Net als voorgaande bewerkingen is draadvonken ook uitgevoerd voor zowel uitgegloeide als niet uitgegloeide samples. Onderstaande Figuur 31 en Figuur 32 geven het resultaat van het draadvonken weer. Hieruit kan besloten worden dat met de vooropgestelde parameters van de vonkmachine, vonken geen optie is voor het bewerken van amorf materiaal. Figuur 31 geeft het uitgegloeide materiaal weer, dit is zoals bij lasersnijden volledig verbrosseld langs de snijlijn. Figuur 32 geeft het niet uitgegloeid materiaal weer, deze snijlijn is op enkele plaatsen gelukt maar algemeen levert dit een slecht, gekarteld resultaat op.



**Figuur 31: Draadvonken uitgegloeid amorf materiaal met een gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur.**



**Figuur 32: Draadvonken niet uitgegloeid amorf materiaal.**

Uit voorgaande proeven is aangetoond dat voor lasersnijden en knippen met een plaatschaar enkel niet uitgegloeid amorf materiaal te verwerken is. Vonken levert voor beide samples geen bruikbaar resultaat op. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat enkel dunne strips van 23  $\mu\text{m}$  aan deze testen zijn onderworpen. Het is evenwel mogelijk dat deze bewerkingen wel kunnen toegepast worden op een volledige stack uitgegloeid materiaal.

## 5 Gevolgen door versnijden van het materiaal

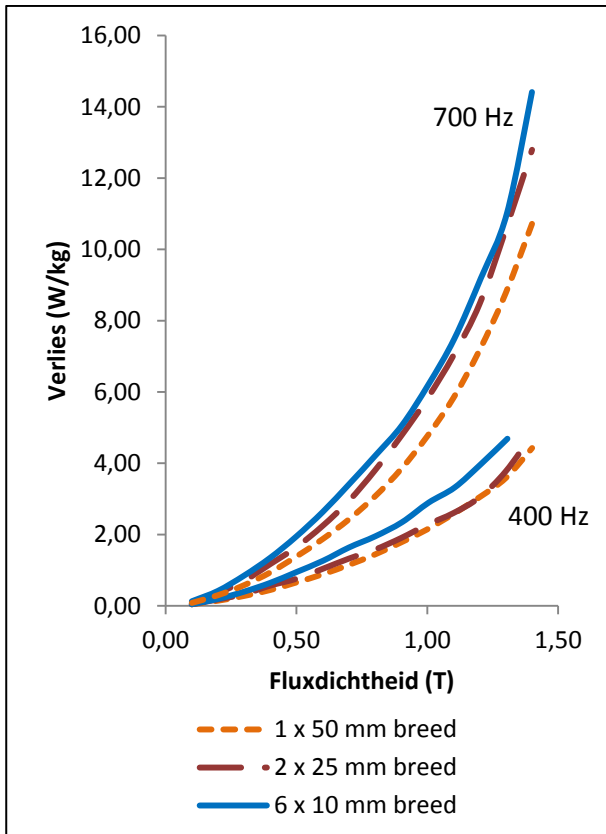
In voorgaande paragraaf is aangetoond welke mechanische bewerkingen mogelijk zijn voor het amorf materiaal. In deze paragraaf zal bepaald worden wat de invloed van deze bewerkingen is op de magnetische eigenschappen, bewerken na gloeien is wegens de brosheid van het materiaal reeds uitgesloten. Verder zal er dus steeds vanuit gegaan worden dat de mechanische bewerking steeds uitgevoerd zijn op niet uitgegloeid materiaal. Om de invloed van deze bewerkingen grondig te kunnen bestuderen is het materiaal eerst opgemeten in zijn niet uitgegloeide toestand, vervolgens blootgesteld aan een gloeibehandeling van 2 uur op 350 °C en opnieuw opgemeten. De invloed van de randeffecten is bepaald door de verliezen op de meten met een SST en het aantal snijkanten systematisch te verhogen. Volgende samples zijn opgemeten:

- ✓ één strip van 50 mm breed;
- ✓ twee strips van 25 mm breed in parallel;
- ✓ zes strips van 10 mm breed in parallel.

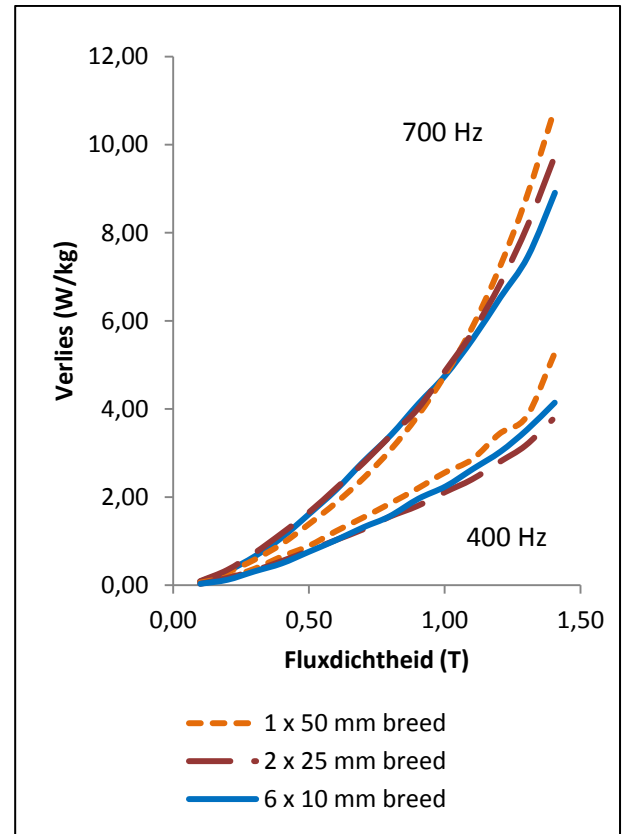
### 5.1 Eigenschappen niet uitgegloeid amorf materiaal

Figuur 33 toont de verliezen voor de strips van 10 mm, 25 mm en 50 mm breed. Deze zijn gesneden met een laser en opgemeten op de frequenties 400 en 700 Hz. Figuur 35 toont dezelfde test voor samples die gesneden zijn met een plaatschaar.

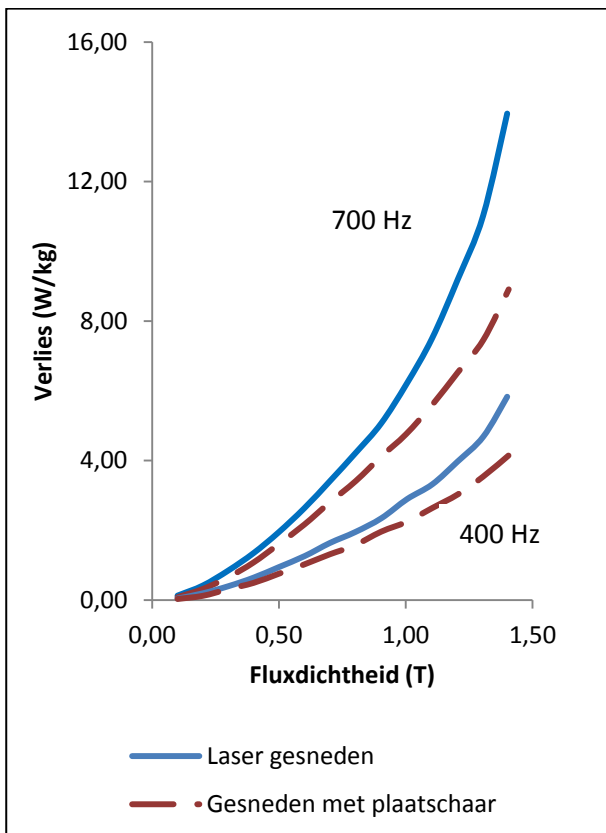
Figuur 34 en Figuur 36 maken d.m.v. de  $BH$ -curve en de verliezen de vergelijking tussen beide snijtechnieken, deze zijn weergegeven voor 6 strips van 10 mm in parallel. Uit Figuur 34 kan besloten worden dat versnijden van het materiaal met een laser nadelige gevolgen heeft voor de ijzerverliezen. De opgemeten ijzerverliezen bij laser gesneden samples liggen 30 % hoger t.o.v. de samples gesneden met een plaatschaar. Figuur 36 toont aan dat ook de permeabiliteit door het lasersnijden beïnvloed wordt.



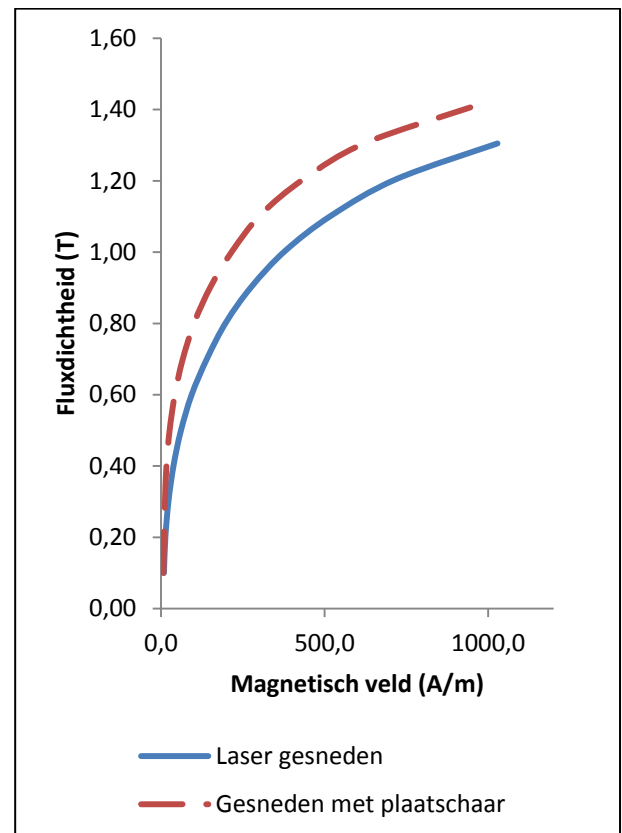
**Figuur 33: Verliezen niet uitgegloeid laser gesneden amorf materiaal.**



**Figuur 35: Verliezen niet uitgegloeid plaatschaar gesneden amorf materiaal.**



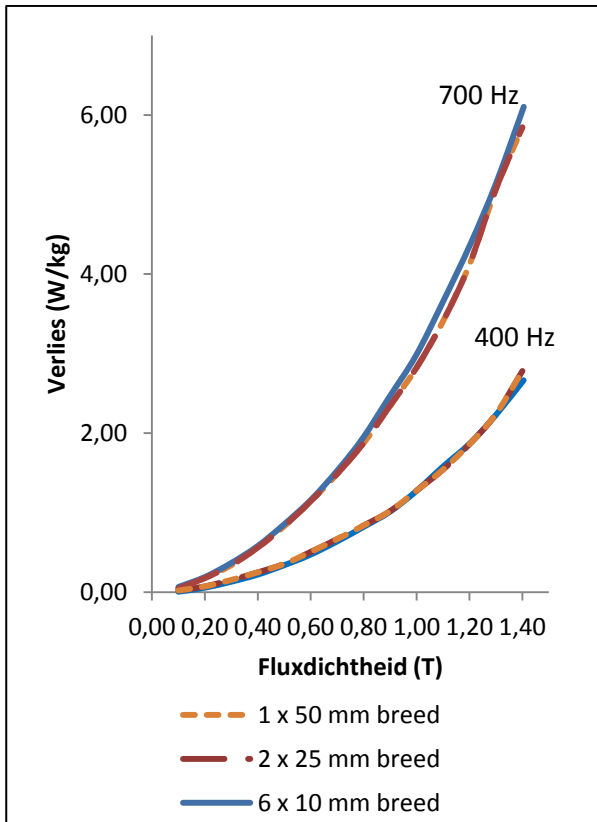
**Figuur 34: Verliezen niet uitgegloeid amorf materiaal.**



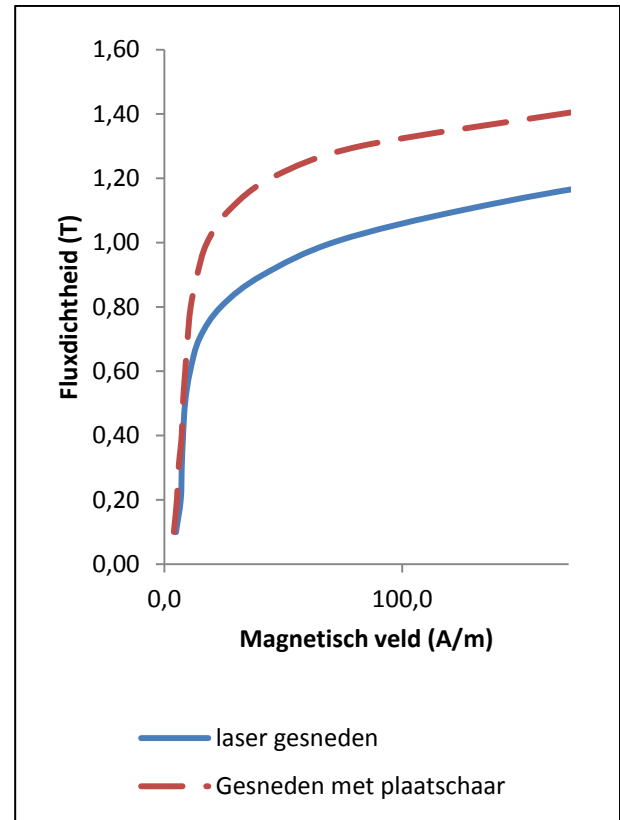
**Figuur 36: Magnetisatie curve niet uitgegloeid amorf materiaal.**

## 5.2 Eigenschappen uitgegloeid amorf

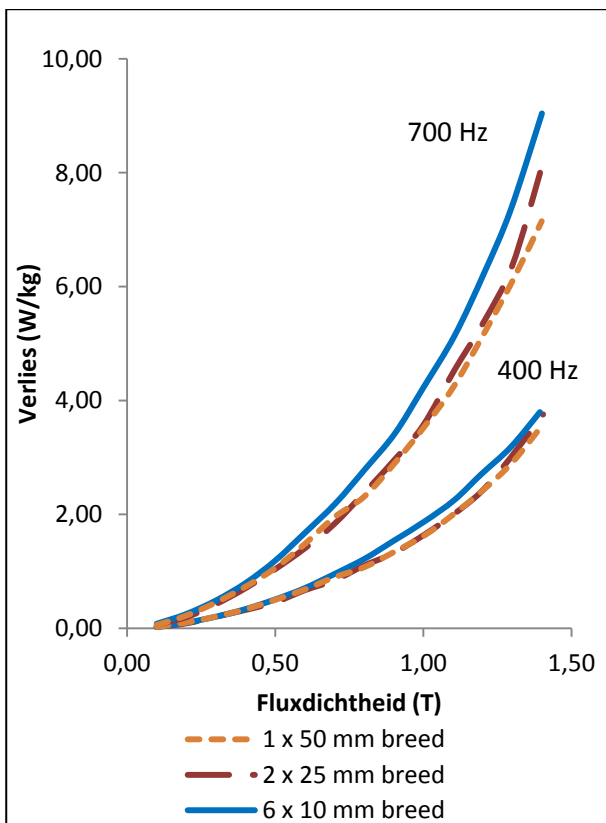
Voorgaande samples zijn gegloeid gedurende 2 uur op een temperatuur van 350 °C zonder de aanwezigheid van een magnetisch veld. Voorgaande metingen zijn opnieuw uitgevoerd zodat kan bepaald worden welke invloed een gloeibehandeling heeft op degradatie van het materiaal door de gebruikte snijtechniek. Zoals vermeld onder titel 4.4. Temperatuur gloeibehandeling, heeft een gloeibehandeling positieve invloed op de ijzerverliezen, Figuur 33 en Figuur 38 tonen de meerwaarde van een gloeibehandeling voor laser gesneden strips aan, bij een inductiewaarde van 1,3 T wordt een vermindering van de verliezen van 32 % voor 400 Hz en 36 % op een frequentie van 700 Hz bekomen. Deze vergelijking wordt gemaakt op 6 strips van 10 mm in parallel. Gloeien heeft ook een positieve invloed op plaatschaar gesneden samples, de invloed door de snijbewerking is hierdoor sterk verminderd. Figuur 35 en Figuur 37 tonen opnieuw de meerwaarde van een gloeibehandeling aan, voor een  $B$  waarde van 1,3 T wordt een vermindering van de verliezen van 36 % voor 400 Hz en 40% op een frequentie van 700 Hz bekomen. Figuur 39 en Figuur 40 maken opnieuw de vergelijking tussen de twee bewerkingen voor 6 strips van 10 mm breed in parallel. Hieruit kan besloten worden dat de verliezen bij het lasersnijden 30 % hoger liggen t.o.v. de verliezen bij de strips gesneden met een plaatschaar. Gloeien heeft een positieve invloed op mechanische spanningen die ontstaan door vervorming bij een plaatschaar. Gloeien heeft echter geen positieve invloed op de thermische beïnvloedde zones veroorzaakt door het lasersnijden. Als de temperatuur in deze zones boven de rekristallisatie temperatuur stijgt, gaan de amorfe eigenschappen van het materiaal plaatselijk verloren, wat resulteert in het vormen van korrelgrenzen en op zijn beurt een verhoging van de verliezen tot gevolg heeft, alsook zal de permeabiliteit dalen.



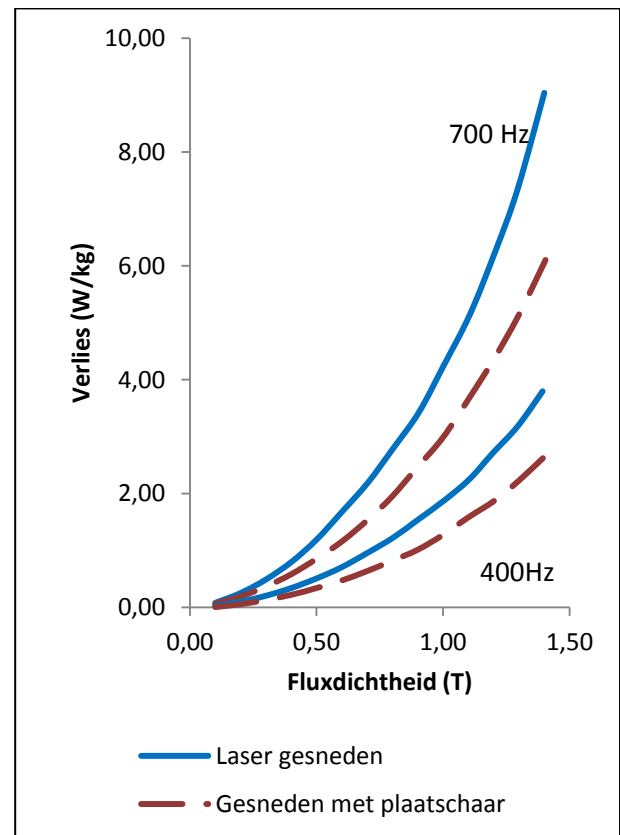
**Figuur 37:** Verliezen uitgegloeid plaatschaar gesneden amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



**Figuur 39:** Magnetisatie curve uitgegloeid amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



**Figuur 38:** Verliezen uitgegloeid laser gesneden amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



**Figuur 40:** Verliezen uitgegloeid amorf materiaal, gloeibehandeling op 350 °C gedurende 2 uur zonder het aanleggen van een magnetisch veld.



## 6 Case studie

De resultaten bekomen d.m.v. metingen via een SST tonen aan dat het amorf materiaal veel betere magnetische eigenschappen heeft dan conventioneel silicium staal. Echter is in de literatuur aangetoond dat deze meerwaarde van amorf materiaal in elektrische machines lager is in vergelijking met deze die aangetoond is d.m.v. de SST metingen. Om hierin een beter inzicht te verkrijgen is er een case studie opgestart voor een PMSM<sup>7</sup> met amorf materiaal. Deze wordt vergeleken met enkele conventionele staalsoorten waarvan in Tabel 6 de eigenschappen zijn weergegeven.

	Amorf		SI -staal	
	1K101	M235-35A	NO20	10JNEX900
Dikte (µm)	25	350	200	100
Saturatie (T)	1,56	1,973	1,80	1,80
Resistiviteit (µΩcm)	125	59	51,6	82
IJzerverlies op 50 Hz en 1 T (W/kg)	0,094	0,92	0,95	0,56
IJzerverlies op 50 Hz en 1.4 T (W/kg)	0,19	1,92	2,00	1,2

Tabel 6: Vergelijking materiaal eigenschappen amorf materiaal en SI-stalen.

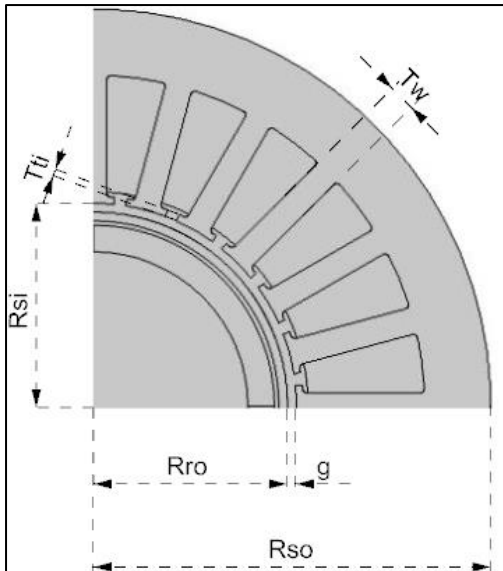
### 6.1 IJzerverliezen bepaald d.m.v. EEM

De verliezen zijn d.m.v. een numerieke analyse bepaald voor het niet uitgegloeid amorf materiaal en het uitgegloeid amorf materiaal, voor deze berekeningen is voor het amorf materiaal een stapelfactor van 84% in rekening gebracht. Figuur 41 geeft de geometrie weer en Tabel 7 de motor specificaties van de hoge snelheidsmachine. De fluxdichtheid bij nullast is weergegeven in Figuur 42. De ijzerverliezen worden bepaald door gebruik te maken van het Bertotti-Model.

$$P_{loss} = a B^\alpha f + b B^2 f^2 + c B f (\sqrt{1 + e B f} - 1) \quad (6.1)$$

In deze formule stelt  $f$  de frequentie voor en  $B$  de piekwaarde van de fluxdichtheid. Deze parameters zijn verkregen door een wiskundige fitting procedure. De gebruikte parameters zijn weergegeven in Tabel 8.

<sup>7</sup> High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor



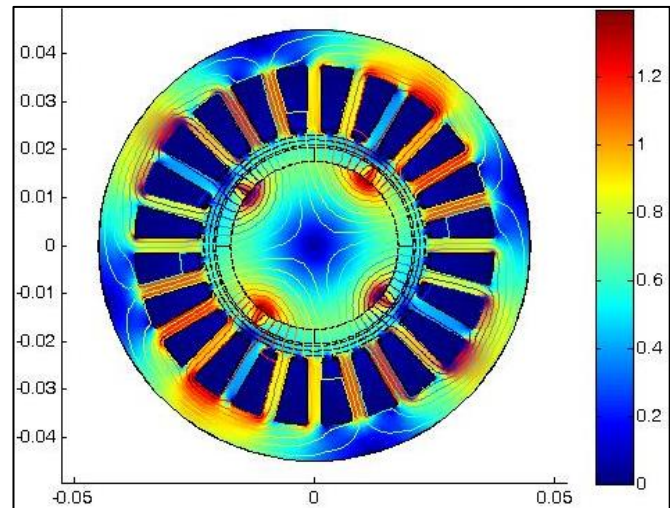
Figuur 41: Kwartdoorsnede PMSM.

Polen	4
Outer radius of stator core $R_{SO}$	45 mm
Inner radius of stator core $R_{SI}$	23 mm
Radius of rotor core $R_{RO}$	21 mm
Air gap $g$	2 mm
Tooth width $T_W$	3 mm
Tooth tip height $T_{TI}$	0,8 mm
Core length	28 mm

Tabel 7: Motor specificities.

### 6.1.1 Niet uitgegloeid amorf materiaal

Tabel 9 vergelijkt de verliezen gemeten op strips met de verliezen berekend d.m.v. EEM, hier is een duidelijk verschil op te merken. De verliezen in de strips zijn bekomen door gebruik te maken van een SST, gemeten met een sinusoidale fluxdichtheid van 1T. Om de realiteit zo dicht mogelijk te benaderen is er rekening gehouden met de harmonische in de numerieke berekening. De waarde van 1T in de strips is gekozen omdat dit de gemiddelde waarde is van de fluxdichtheid in de numerieke berekening. Op deze manier is het mogelijk om een gefundeerde vergelijking te maken tussen de numerieke berekening en de ideale strip.



Figuur 42: Fluxdichtheid hogesnelheidsmotor, stator gebouwd uit amorf materiaal, rotor gebouwd uit SI-staal.

	Uitgegloeid	Niet uitgegloeid
a	2.04872E-03	5.31188E-03
$\alpha$	108.4125E-03	82.767E-03
b	3.71901E-06	1.1799E-05
c	0	0
e	0	0

Tabel 8: Bertotti parameters amorf materiaal.

	50 HZ	400 Hz	700 Hz
P 1T in sample (W/kg)	0,08	2,82	4,77
P <sub>gem</sub> motor (W/kg)	0,29	4,15	9,93
P <sub>totaal</sub> motor (W)	0,35	4,82	11,50

**Tabel 9: Verliezen in SST strips vergeleken met verlies in motor, niet uitgegloeid.**

Uit Tabel 9 kan besloten worden dat het verschil tussen de verliezen bepaald met een SST en het verlies in de motorgeometrie een factor 2 is. Het is uiteraard te verwachten dat de verliezen bij de numerieke berekening hoger liggen aangezien dit de werkelijkheid beter benadert in vergelijking met de SST metingen. Zoals verwacht zijn de verliezen merklijk hoger bij hogere frequenties. Dit is zowel zo bij de metingen als bij de numerieke berekening het geval.

### 6.1.2 Uitgegloeid amorf materiaal

Zoals verwacht zijn de verliezen na een gloeibehandeling merklijk lager, dit kan opnieuw aangetoond worden in Tabel 9. Zeker bij hogere frequenties is er een grote verbetering op te merken. Uit Tabel 10 kan besloten worden dat de verliezen voor het uitgegloeide materiaal tussen de ideale strip en de numerieke methode dichter bij elkaar liggen dan deze van het niet uitgegloeid amorf materiaal. Dit betekent dat een gloeibehandeling zorgt voor een grotere verbetering dan verwacht. Het bekomen verschil met een factor 2 tussen de SST meting en de EEM analyse in Tabel 9 wordt door een gloeibehandeling verminderd naar een factor 1,2 in Tabel 10.

	50 HZ	400 Hz	700 Hz
P 1T in sample (W/kg)	0,09	1,28	2,85
P <sub>gem</sub> motor (W/kg)	0,11	1,46	3,39
P <sub>totaal</sub> motor (W)	0,13	1,70	3,94

**Tabel 10: Verliezen in SST strips vergeleken met verlies in motor, uitgegloeid.**

### 6.1.3 Si-staal M235-35A, NO20, 10JNEX900 en amorf materiaal vergeleken

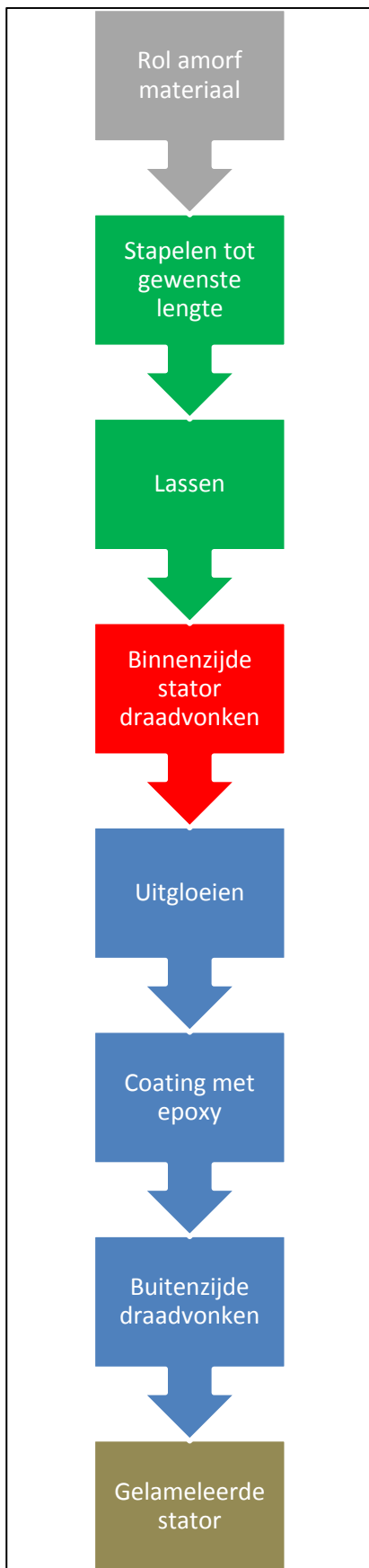
Tabel 11 geeft het overzicht van de verliezen in de stator berekend d.m.v. numerieke berekeningen. Zoals verwacht is het voordeel van amorf materiaal op hogere frequenties fenomenaal. In voorgaande numerieke berekeningen zijn de snijeffecten niet in rekening gebracht, in onderstaande tabel wordt hiermee rekening gehouden. Uit Figuur 37 kan besloten worden dat na het versnijden van het materiaal met een plaatschaar, een gloeibehandeling het materiaal opnieuw naar zijn oorspronkelijke staat brengt. Dit kan bijgevolg gezien worden als een soort referentie. Tabel 11 toont voor het uitgegloeid amorf materiaal gesneden met een plaatschaar een reductie in ijzerverlies met een factor 15 t.o.v. het conventioneel silicium staal M235-35A. Voor het laser gesneden materiaal zijn de verliezen veel hoger, de factor 15 verlaagt naar een factor 7.

IJzerverlies (W)					
n (min <sup>-1</sup> )	Uitgegloeid amorf		NO20	10JNEX900	M235-35A
	Plaatschaar	Laser			
1500	0,13	0,14	1,55	0,80	1,58
3000	0,28	0,33	3,11	1,66	3,54
12000	1,69	2,61	12,85	7,97	23,01
21000	3,94	6,78	23,18	16,21	54,79
30000	7,00	12,87	34,09	26,41	101,87
60000	23,3	46,95	74,75	74,44	351,52

**Tabel 11: IJzerverliezen voor de case studie van de PMSM met verschillende materialen, op verschillende toerentallen.**

## 6.2 IJzerverliezen experimenteel bepaald

Binnen het kader van deze thesis worden drie bewerkingsmogelijkheden onderzocht voor het vervaardigen van een stator. Er is aangetoond dat ponsen het beste resultaat oplevert, echter is het duur om voor een prototype een pons op maat te maken, alsook dient de afwerkingsgraad van deze pons hoog te zijn, er is een kleine speling noodzakelijk tussen pons en matrijs. Laseren levert slechte resultaten op en dient lamel per lamel te gebeuren. Voor conventioneel staal is vonken veruit de beste verwerkingstechniek, er kan namelijk t.o.v. ponsen en laseren eenvoudig een volledige stack gevonkt worden. Alsook levert naar degradatie toe vonken het beste resultaat op. Deze bewerking is echter niet mogelijk op afzonderlijke strips van 23  $\mu\text{m}$  dikte. Niettemin is er toch getracht een volledige stack te vonken zodat de numerieke berekeningen kunnen geverifieerd worden. De gloeibehandeling zal uitgevoerd worden op 350 °C zonder het aanleggen van een magnetisch veld. Figuur 46 geeft het stappenplan weer dat zal gevolgd worden. Tussen 2 steunplaten wordt er een stapel van amorf materiaal met een axiale lengte van 28 mm gebouwd, deze platen dienen zuiver ter versteviging van de stapel. Na het vonken worden deze verwijderd. Vervolgens wordt in loodrechte richting een las aangelegd zodat elektrisch contact ontstaat tussen het materiaal wat noodzakelijk is voor het draadvonken. De binnenzijde van de stator wordt verwijderd d.m.v. draadvonken. Vervolgens wordt de stack uitgegloeid. Het epoxy bad heeft als doelstelling van de stapel één geheel te maken, dit gebeurt door de capillaire werking van de epoxy tussen de lamellen. Als laatste stap wordt de buitenzijde gevonkt zodat een gelamelleerde stator wordt verkregen. De binnenzijde wordt eerst gevonkt zodat het capillair proces sneller verloopt.



Figuur 46: Stappenplan bouw stator.



Figuur 43: Proces bouw stator.

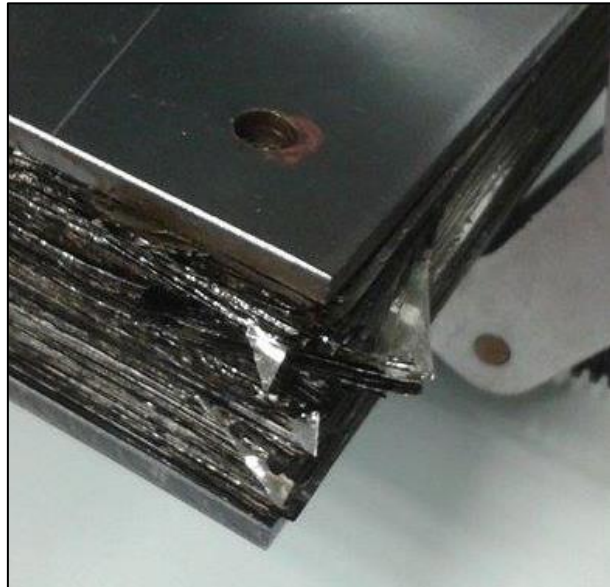


Figuur 44: Las in loodrechte richting.



Figuur 45: Boring stack.

Het bouwen van een stator blijkt echter niet zo eenvoudig als bovenstaand schema laat uitschijnen. Voor het vonken van de binnenzijde dient er een gat in de stack geboord te worden. Door de extreme hardheid van het materiaal wordt er geen mooi afgewerkte boring verkregen. Het materiaal scheurt plaatselijk af zoals Figuur 47 aantoont. Voor het maken van een boring in amorf materiaal is conventioneel boren niet geschikt, eventueel dient er geopteerd te worden voor ultrasoon bewerken, deze bewerking is uiterst geschikt voor zeer harde materialen.



**Figuur 47: Boring.**

## Besluit

In deze thesis is het gedrag van amorf materiaal grondig onderzocht, er is een vergelijking gemaakt tussen het amorf materiaal en een conventioneel silicium staal. Hieruit kan worden besloten dat het gebruik van amorf materiaal weldegelijk voordeel biedt. Hoofdzakelijk zijn de verliezen op hogere frequenties merkbaar lager. Amorf materiaal wordt omschreven als zeer hard en bros. Het meest gekende materiaal is van de fabrikant Metglas, in deze thesis is gebruik gemaakt van het materiaal 1K101, een vergelijking tussen beide is gemaakt en er kan besloten worden dat de magnetische eigenschappen van dit materiaal in lijn liggen met deze van het Metglas materiaal.

Het is gekend dat het uitglorie van het materiaal de magnetische eigenschappen sterk verbetert. Wanneer het materiaal wordt uitglorie gedurende 2 uur op 350°C onder stikstof atmosfeer is er op de frequenties van 400Hz en 700Hz een vermindering van de ijzerverliezen op te merken van respectievelijk 35 % en 40 % in vergelijking met het niet uitglorie materiaal. Door tijdens het gloeien een magnetisch veld in longitudinale richting aan te leggen worden volgens Metglas nog betere magnetische eigenschappen verkregen. Het aangelegde magnetisch veld heeft een waarde van 2400 A/m, voor het materiaal 1K101 is er aangetoond dat het aanleggen van dit veld weinig voordeel biedt tegenover gloeien zonder het aanleggen ervan. Alsook moet er rekening gehouden worden met het anisotroop gedrag dat verkregen wordt door het aanleggen van een magnetisch veld, dit is niet gewenst in elektrische machines waardoor gloeien zonder magnetisch veld aanbevolen wordt.

Een grondige studie van verschillende bewerkingen op het amorf materiaal is gemaakt, een mechanische, thermische en elektro-thermische bewerking is uitgevoerd op het materiaal. Als mechanische bewerking is er gebruikt gemaakt van een plaatschaar, dit is te vergelijken met ponsen. Voor de thermische en elektro-thermische bewerking is geopteerd voor lasersnijden en draadvonken. Door het versnijden van het materiaal met een plaatschaar wordt het materiaal vervormd waardoor de ijzerverliezen toenemen. Een gloeibehandeling achteraf kan de verhoging van deze ijzerverliezen ontstaan door de snijeffecten opnieuw verminderen. Bij lasersnijden van het materiaal is er aangetoond dat het materiaal meer beïnvloed wordt in vergelijking met het versnijden met een plaatschaar. Bij het lasersnijden is een duidelijke invloed van de randeffecten op te merken. Deze randeffecten zijn echter niet zoals bij het knippen met een plaatschaar uit te gloeien. Dit komt doordat de zones bij het lasersnijden thermisch beïnvloed zijn. Bij een plaatschaar zijn deze zones mechanische vervormd. De optimale manier voor het versnijden van het materiaal is door gebruik te maken van een plaatschaar of ponsmachine.



Er is een case studie uitgevoerd voor een high speed PMSM waarbij de ijzerverliezen bepaald zijn door gebruik te maken van numerieke berekeningen. Deze is zowel uitgevoerd voor uitgegloeid als niet uitgegloeid amorf materiaal. De verschillende snijtechnieken zijn hierbij ook in rekening gebracht. Door gebruik te maken van laser gesneden amorf materiaal is ten opzichte van het conventioneel silicium staal M235-35A een vermindering van het ijzerverlies gevonden met een factor 7. Door gebruik te maken van plaatschaar gesneden materiaal, gevolgd door een gloeibehandeling is een vermindering met een factor 15 mogelijk.

Tot slot is er getracht een stator te bouwen door middel van vonkersie, dit bleek echter niet mogelijk door de extreme hardheid van het materiaal.

Uit deze thesis blijkt dat ponsen van het materiaal veruit de beste oplossing biedt, naar de toekomst toe kunnen eventueel nog andere verwerkingsmethoden onderzocht worden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan waterstraal snijden. Eventueel kan ook draadvonken nog grondiger bestudeerd worden door bijvoorbeeld de stroomsterkte en snijsnelheid af te stemmen op het materiaal. Verder dient grondig nagedacht te worden hoe uiteindelijk een volledige stack kan gebouwd worden. Conventionele bewerkingen zoals boren van een hele stapel zijn door de hardheid uitgesloten.

## Verklarende woordenlijst

Magnetostrictie	Het veranderen van de afmetingen van een materiaal onder invloed van een magnetische ordening
Stapelfactor	De factor waarmee de hoogte van een stack moet worden vermenigvuldigd om de effectieve hoogte in materiaal te verkrijgen zonder lucht tussen.
Single sheet test	Een toestel om de magnetische eigenschappen van één vel te bepalen, tegenhanger van het Epstein-raam waarin meerdere vellen worden opgemeten.
Conductiviteit	Elektrische geleidbaarheid van het materiaal, inverse van de resistiviteit.
Dipoolmoment	Is een maat voor de polariteit van een molecuul
Coërciviteit	Een kwantum elektrisch effect dat ervoor zorgt dat de elektrische weerstand sterk afneemt wanneer het ferromagnetisch materiaal onder een veld wordt gebruikt.

## Lijst met afkortingen

B	Inductie
K	Kelvin
T	Tesla
SST	Single sheet test
Rpm	Rotatiesnelheid
AMM	Amorfe magnetische materialen
EEM	Eindige elementen berekening
SI staal	Silicium staal
RD	Rolling direction
TD	Transvers direction
IPMM	Interior permanent magnet machine
PMSM	High speed permanent magnet synchronous motor

## Trefwoordenregister

---

### **I**

1K101 · 4, 34, 40, 41, 49, 56, 66

---

### **A**

anisotroop · 40, 56

---

### **B**

Bertotti-Model · 22, 49

---

### **C**

conductiviteit · 35

---

### **D**

Draadvonken · 44

---

### **E**

excess verliezen · 21

---

### **H**

hoge snelheidsmotoren · 30

---

### **K**

klassiek verlies · 21

kopperverliezen · 25, 29

---

### **L**

Lasersnijden · 43

longitudinale richting · 24, 56

---

### **M**

magnetostrictie · 24

mechanische eigenschappen · 25, 37

---

### **N**

numerieke analyse · 49

---

### **P**

plaatschaar · 4, 17, 43, 45, 46, 47, 48, 52, 56, 57

---

### **R**

randeffecten · 45, 56

rendement · 4, 17, 25, 30

---

### **S**

snijkanten · 45

---

### **T**

temperatuur · 18, 26, 27, 32, 36, 38, 47, 63, 65

---

### **V**

vonken · 44, 53, 55

vulfactor · 22

---

### **W**

wervelstroomverlies · 21

## Literatuurlijst

- [1] Dupré, L. (2015). *Elektriciteit*.
- [2] Gyselinck, J. (2000). *Twee-dimensionale dynamische eindige elementenmodellering van statische en roterende elektrische energieomzetters*.
- [3] Amorf metaal. (1987). 152-154.
- [4] Metglas. Geraadpleegd op 25 september 2015 via <http://metglas.com>.
- [5] Ogawa, Y., Naoe, M., Yoshizawa, Y., & Hasegawa, R. (2006, September). Magnetic properties of high Bs Fe-based amorphous material. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304, nr. 2, pp. 675-677.
- [6] Petrakovski, G. (1981, June). Amorphous magnetic materials. *Institute of Physics Siberian Branch Academy of Sciences of the USSR Krasnoyarsk*, 134, pp. 305-331.
- [7] Wang, L., Li, J., Li, S., Zhang, G., & Huang, S. (2011, Februari). Development of the New Energy- Efficient Amorphous Iron Based Electrical Motor. *Computer. Distributed Control and Intelligent. Environmental Monitoring*, 61 nr. 9, pp. 2059-2061.
- [8] Mouhamad, M., Elleau, C., Mazaleyrat, F., Guillaume, C., & Jarry, B. (2011, October). Physicochemical and Aging Test of 2605SA1 and 2605HB1 Amorphous Ribbons for Power Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47, nr. 10, pp. 3192-3195.
- [9] Metglas. *Amorphous Alloys for Transformer Cores*. Geraadpleegd op 25 september 2015 via <http://metglas.com>.
- [10] Cadogan, J.M., Campbell, S.J., Jing, J., Foley, C.P., Kater, P., & Mai, Y.W. (2014, April) Annealing embrittlement of  $Fe_{78}Si_9B_{13}$ . *Hyperfine Interactions*, 226, nr. 1-3, pp. 7-14.
- [11] Roman, K., Krysztof, K., Aleksandra, K-B., Marcin, P., Jan, S., & Przemyslaw, Z. (2012, 20 December). Amorphous Soft Magnetic Materials for the stator of a Novel High-Speed PMBLDC Motor. *IEEE transactions on magnetics*, 49, nr. 4, pp. 1367-1371.

- [12] Dems, M., & Komez, K. (2013, 8 Maart). Performance Characteristics of a High-Speed Energy-Saving Induction Motor with an Amorphous Stator Core. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, nr. 6, pp. 3046-3055.
- [13] Okamoto, S., Leki, M., Denis, N., Fujisaki, K., & Kato, Y. (2016, 18 February). Core Loss Reduction of an Interior Permanent Magnet Synchronous Amorphous Stator Core. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52, nr. 3, pp. 2261-2268.
- [14] Nesimi, E., Ryusuke, H.n Wen, L.S., John, G., Stephen, K., & Solmaz, K. (2015, 3 February). A novel tapered rotating electrical machine topology utilizing cut amorphous magnetic material. *IEEE transactions on magnetics*, 51, nr. 7.
- [15] Eggers, D., Steentjes, S., & Hameyer, K. (2012, November). Advanced Iron-Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, nr. 11, pp. 3021-3024
- [16] Dems, M., Komez, K., Wiak, S., & Stec, T. (2004). The highly efficient three-phase small induction motors with stator cores made from amorphous iron. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 23, nr. 3, pp. 625-632.

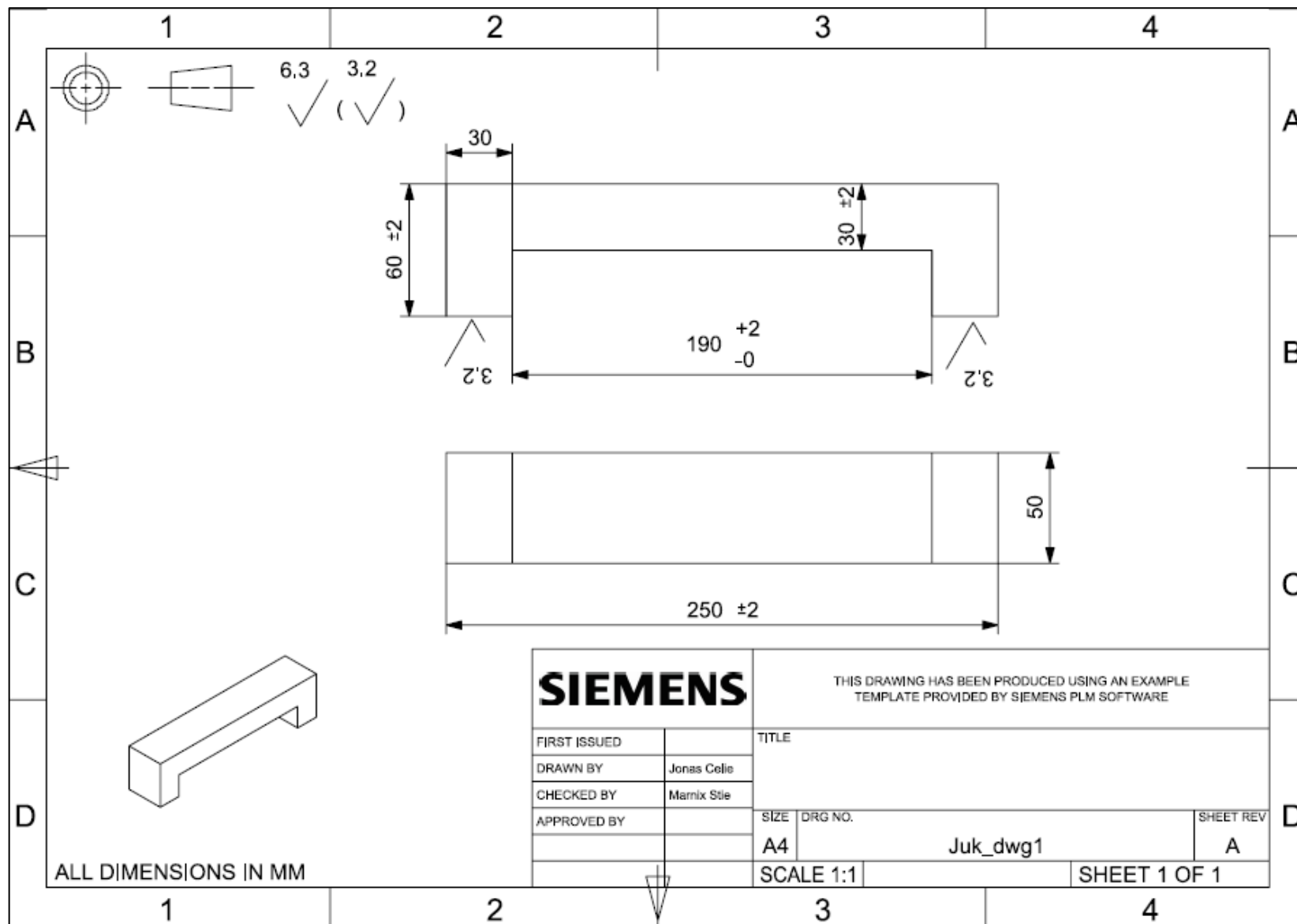
## **Bijlagen**

Bijlage 1: Afmetingen juk

Bijlage 2: Hoge temperatuur draad

Bijlage 3: Amorf materiaal: 1K101

Bijlage 1: Afmetingen juk






## Bijlage 2: Hoge temperatuur draad

# 1



## FILS • DRADEN

FILS ISOLÉS FIBRES MINÉRALES • DRADEN MET MINERALE VEZELISOLATIE



### CNVAS

FILS ISOLÉS PAR FIBRE MINÉRALE (400°C)  
DRADEN MET MINERALE VEZELISOLATIE (400°C)

**DESCRIPTION :**

- âme : multibrin (classe 5 - IEC 60228), cuivre nickelé (ASTM B355)
- isolation : guipages de fibre de verre imprégnés caoutchouc de silicone
- gaine : tresse en fibre minérale siliconée

**BESCHRIJVING :**

- kern : meerdradig (klasse 5 - IEC 60228), vernikkeld koper (ASTM B355)
- isolatie : glasvezelomwikkelingen doordrenkt met siliconerubber
- buitenmantel : vlecht van minerale vezels met een siliconelaag

**CARACTERISTIQUES TECHNIQUES :**

- tension de service : 300/500 V
- tension d'essai : 2 kV
- température de service : -60°C → +400°C
- température de pointe : +450°C
- rayon de courbure : 10 x Ø extérieur
- Veritas N° BV 153552

**TECHNISCHE EIGENSCHAPPEN :**

- dienstspanning : 300/500 V
- proefspanning : 2 kV
- diensttemperatuur : -60°C → +400°C
- temperatuur in pieken : +450°C
- buigingsstraal : 10 x buiten-Ø
- Veritas Nr BV 153552

section âme kerndoorsnede mm <sup>2</sup>	nbre et Ø brins aantal en Ø draadjes mm	résistance weerstand Ω/km (20°C)	Ø extérieur buiten-Ø mm	poids gewicht kg/km
0,25	8 x 0,20 / 3 x 0,30	80,9	2,2	9
0,5	16 x 0,20 / 7 x 0,30	40,1	2,5	12
0,75	24 x 0,20 / 11 x 0,30	26,7	2,7	15
1	32 x 0,20 / 14 x 0,30	20,0	3,2	18
1,5	30 x 0,25 / 21 x 0,30	13,7	3,4	24
2,5	50 x 0,25 / 35 x 0,30	8,21	4,0	36
4	56 x 0,30	5,09	5,0	54
6	84 x 0,30	3,39	5,0	77
10	80 x 0,40	1,95	8,0	146
16	126 x 0,40	1,24	9,4	221
25	196 x 0,40	0,795	10,6	337
35	276 x 0,40	0,565	13,4	438
50	396 x 0,40	0,393	14,0	602
70	360 x 0,50	0,277	16,5	815
95	485 x 0,50	0,210	18,5	1.109
120	608 x 0,50	0,164	20,2	1.379
150	756 x 0,50	0,132	23,0	1.754
185	944 x 0,50	0,108	25,9	2.223
240	1.221 x 0,50	0,0817	27,9	2.883

**COULEURS**  
**KLEUREN**

sur demande  
op aanvraag

## Bijlage 3: Amorf materiaal: 1K101

Bron: Catech. Geraadpleegd op 4 oktober 2015 <http://www.catech-china.cn/Fe-based-Amorphous-Ribbon.html>.

Item	Performance
Saturate induction Bs(T)	1.56
Curie temperature Tc(°C)	400
Crystallization Tx(°C)	515
Hardness Hv	960
Magnetostriction	$27 \times 10^{-6}$
Density(g/cm <sup>3</sup> )	7.18
Resistivity $\mu\Omega$ .cm	130
Coercivity(A/m)	<4