

Drehstrommotor aus dem 3D-Drucker

*Maturaarbeit 2019 im Fach Physik an der
Kantonsschule Sursee*



Autor

*Haas Matthias, 6b
Altkidli
6217 Kottwil*

Betreuer

*Chiantese Stefano
Birkenstrasse 3
5742 Kölliken*

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Kurzfassung	5
3	Einleitung	6
3.1	Elektrizitätslehre:.....	6
3.1.1	Elektrisches Feld:	6
3.1.2	Energie im elektrischen Feld:	7
3.1.3	Magnetisches Feld:	8
3.1.4	Wechselstrom:.....	9
3.2	3D-Druck.....	10
3.3	Druckverfahren	10
3.3.1	Schmelzschichtung (Fused Deposition Modeling)	11
3.3.2	Stereolithografie	11
3.3.3	Selektives Laser-Sintern.....	11
3.4	Druckmaterialien	12
3.5	Funktionsprinzip Elektromotoren.....	14
4	Material und Methoden	15
4.1	Material	15
4.2	Methode	16
5	Chronologischer Ablauf der Arbeit	17
5.1	Praktikum Fribat.....	17
5.1.1	Paul Hendriksen	18
5.2	Weiterführung der ursprünglichen Idee	19
5.3	Modell 1.0	20
5.4	Dimensionierungen	23
5.5	Neuer 3D-Drucker	24
5.6	Modell 1.1	25
5.6.1	Teile fertigen.....	25
5.6.2	Wickeln Motor 1.1.....	29
5.6.3	Druckprobleme	31
5.6.4	Wicklungen einlegen und Inbetriebnahme.....	31
5.7	Modell 1.2	35
5.7.1	CAD-Konstruktion.....	35

5.7.2	Reparatur FLSUN Drucker	36
5.7.3	Teile fertigen.....	37
5.7.4	Wickeln Motor 1.2.....	39
5.7.5	Inbetriebnahme Motor 1.2	42
5.8	Abdeckungen der Anschlussgehäuse	43
5.9	Leistungsmessungen	44
5.9.1	Elektrische Leistung	44
5.9.2	Mechanische Leistung.....	44
5.10	Schriftliche Arbeit.....	45
6	Ergebnis.....	46
6.1	Diskussion.....	47
6.2	Reflexion	48
7	Abkürzungsverzeichnis.....	49
8	Quellenverzeichnis	50
9	Danksagung	51
10	Anhang.....	52
11	Deklaration	57

1 Vorwort

Im Herbst 2017 fand ich zufällig, bei der Suche nach dem grössten Rubiks Cube der Welt, einen Beitrag (<https://www.thingiverse.com/thing:1267855/#files>) auf Thingiverse (Online Plattform für 3D-Dateien). Ein norwegischer Bastler und Erfinder hatte dort die Druckdateien für einen 22x22x22 Zauberwürfel veröffentlicht. Mit dem Hinweis, dass er das Nachbilden des 3D-Puzzles nicht empfehle, wegen des komplexen Zusammenbaus der 2691 Teile. Die Vorstellung einen Rubiks Cube zu bauen, der $4.3255 \cdot 10^{1795}$ verschiedene mögliche Kombinationen hat, begeisterte mich so sehr, dass ich die Dateien herunterlud. Darauf folgend begann ich mich über das Thema 3D-Druck zu informieren. Schnell war mir klar, nur ein eigener Drucker kam infrage, da Online-Services viel zu teuer sind. Alle Teile, für den Würfel, würden beim Anbieter Teil 3 (<https://www.teil3.ch/index.html>) ca. 47'000.- SFr. kosten. Da ein fertig zusammengebauter Drucker auch nicht im Budget lag, entschied ich mich, nach einigen Vergleichen, für einen DIY-Bausatz eines Anet A8 FDM Druckers (22x22x23 cm Bauvolumen). Bald schon bestellte ich die ersten Rollen Filament, das Material für den 3D-Druck. Nach ungefähr zwei-tägigem Zusammenbau und einigen Fehlversuchen, wurden die ersten, einige hundert Teile gedruckt. Bis Ende Jahr, nach ca. einem Monat Druckzeit, erkannte ich die wichtigsten Nachteile. Die mechanische Bauform, mit einem bewegten Druckbett, schüttelte die Teile zu fest. Deswegen verkaufte ich diesen ersten Drucker und erwarb mir bald darauf einen weiteren Bausatz, für einen Flsun Cube mit Dual Extruder. Dieses Modell ist mit einem würfelförmigen Rahmen aus Aluminiumprofilen aufgebaut und bewegt den Druckkopf in die X- und Y-Richtung, damit das Druckbett mit den Teilen nur in Z-Richtung bewegt werden muss. Der Zusammenbau war bei diesem 3D-Drucker etwas komplexer, jedoch war das fortschrittliche und technisch recht hochstehende Resultat sehr zufriedenstellend. Im folgenden Jahr druckte ich viele Ersatzteile und Prototypen für Experimente. Die CAD-Dateien dazu erstellte ich jeweils selber, mit AutoCAD, welches für Studenten kostenlos erhältlich ist.

Im Herbst 2018 absolvierte ich ein Sprachpraktikum bei der Liebherr-France SAS in Colmar. Während drei Wochen durfte ich mit dem professionellen CAD-Programm PTC Creo arbeiten. Ein Mitarbeiter zeigte mir das Konstruieren neuer Teile anhand von Plänen. Auf diese Weise konnte ich nebenbei die wichtigsten Grundlagen von Creo erlernen. Zuhause merkte ich bald, das Programm AutoCAD verstand ich zu wenig gut und es war für meine Zwecke nicht geeignet. Deswegen suchte ich eine kostenlose Version von Creo Parametric. Als es darum ging ein Thema für die Maturaarbeit zu finden, war ich mit den Funktionen des Programms schon recht vertraut. Dies motivierte mich eine praktische Arbeit, unter Verwendung selbst konstruierter Teile, umzusetzen.

Da mich Energie und deren Erzeugung, wie auch innovative Technologien sehr interessieren, entstand die Idee einen synchron Drehstrommotor mit dem 3D-Drucker zu fertigen. Grund für die Wahl eines permanent erregten Synchronmotors war sicherlich, dass meiner Meinung nach Neodym Permanentmagnete sehr spannende Bauteile sind. Sie verlieren ihre Haftkraft unter guten Bedingungen so gut wie nie und können ständig für Energieumwandlungen genutzt werden. Noch wichtiger erscheint es mir, dass zurzeit diese Art von Elektromotoren, mit teilweise über 99 % Wirkungsgrad, die weltweit effizienteste ist.

2 Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines permanent erregten Synchron-Drehstrommotors gezeigt, der so weit wie möglich mit dem 3D-Drucker gefertigt sein soll.

Ziel war es einen kompletten Elektromotor zu dimensionieren und anschliessend mit einem CAD-Programm zu konstruieren.

In einem zweiten Schritt sollten die Teile, mit dem eigenen 3D-Drucker, im Schmelzschichtverfahren (FDM) gefertigt werden. Es war vorgesehen, weitere benötigte Teile dazuzukaufen, um danach den Motor, mit den nachbearbeiteten 3D-Druckteilen, zusammenzubauen.

Letztlich sollte der Leistungsgrad gemessen und mit herkömmlichen Motoren verglichen werden.

Mein Vorwissen über Elektromotoren war sehr gering. Im Verlauf der Arbeit traten deshalb unerwartete Schwierigkeiten, bezüglich der Machbarkeit einzelner Arbeitsschritte, auf. Der zeitliche Aufwand für den Entwicklungs- und Verbesserungsprozess war viel grösser, als ich erwartet hatte. Mein Ziel, mir viel Interessantes und Wissenswertes im Bereich Motorentechnik, CAD-Konstruktion und 3D-Druck anzueignen, konnte ich zufriedenstellend erfüllen. Auch die Frage nach der Machbarkeit eines grösstenteils 3D-gedruckten Elektromotors konnte bejaht werden.

Als Resultat entstanden schliesslich zwei komplette Motoren-Modelle, die sich in der Materialzusammensetzung unterscheiden. Beide Versionen sind theoretisch funktionsfähig und funktionieren auch in der Praxis. Jedoch ist die Optimierung längst nicht abgeschlossen und die Nutzung für industrielle Zwecke, in dieser Form, noch nicht möglich.

3 Einleitung

3.1 Elektrizitätslehre:

Ein **elektrischer Strom** entsteht bei der Bewegung elektrischer Ladungsträger.

Bei konstantem, elektrischem Strom, der Stärke (I), fließt während der Zeit (Δt) die elektrische Ladung (ΔQ).

Der Strom wird in Ampere [A] gemessen und die Ladung in Amperesekunden [As] = Coulomb [C].

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Die **elektrische Ladung** stellt eine fundamentale Eigenschaft jeglicher Materie dar. Das Verhältnis von positiven und negativen Ladungsträgern definiert die elektrische Ladung eines Körpers. Eine ungleiche Verteilung der freien Ladungsträger, in einem Körper drin, wird durch einen zweiten, geladenen Körper verursacht.

3.1.1 Elektrisches Feld:

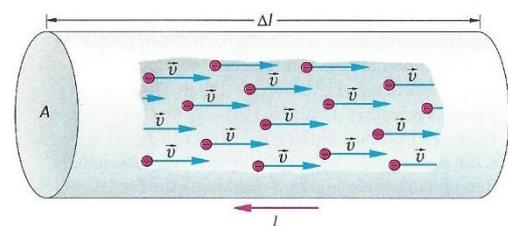
Durch die Ladung eines Körpers bildet sich, in dessen Umgebung, ein elektrisches Feld, hierbei gilt gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und ungleichnamige ziehen sich an. Elektronen sind negative Ladungsträger, sobald es einen Überschuss davon hat, ist der Körper entsprechend negativ geladen. Dagegen ist die Ladung, bei einem Mangel an Elektronen, positiv.

Influenz beschreibt die räumliche Trennung von Ladungen, durch die Kraft eines elektrischen Feldes, in einem leitenden Körper. Elektrische Leiter sind beispielsweise Metalle oder bestimmte Kohlenstoffverbindungen, deren elektrische Ladung veränderlich ist, da sie frei bewegliche Elektronen besitzen. Werden, durch ein elektrisches Feld, elektrischer Dipole in einem Isolator/Nichtleiter ausgerichtet, so spricht man von Polarisation.

Die Erde ist bezüglich der Atmosphäre negativ geladen. Ein Leiter, der direkten Kontakt zu ihr hat, nennt sich geerdet. Zu beachten ist auch, dass die technische Stromrichtung vom Pluspol zum Minuspol gerichtet ist, physikalisch betrachtet fließen die frei beweglichen Elektronen jedoch in die entgegengesetzte Richtung.

Ein **elektrisches Feld** beschreibt die Kraftwirkungen, die elektrische Ladungen untereinander ausüben. Das Phänomen besteht auch bei materiefreiem Raum, jedoch lässt es sich, im Gegensatz zur Gravitation, durch einen faradayschen Käfig (Hülle aus elektrisch leitfähigem Material) abschirmen.

Die Stärke des Feldes \vec{E} resultiert aus der elektrostatischen Kraft \vec{F} , die auf eine Ladung q wirkt.



234.2 In einem metallischen Leiterstück der Länge Δl bewegen sich N Elektronen entgegen der Stromrichtung mit der Driftgeschwindigkeit v .

Abb. 1: Grafik zur Stromrichtung in der Praxis.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \rightarrow \vec{F}_{el} = q\vec{E} \rightarrow [E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$

Um die Kraft, ohne Bestimmung der Feldstärke, zu messen, rechnet man:

$$E = \frac{k * Q}{r^2} \rightarrow F = k * \frac{Q * q}{r^2} \rightarrow [k] = \frac{Nm^2}{C^2}$$

Coulombsches Gesetz

(Gilt für zwei Ladungen, bei mehreren werden die Kräfte vektoriell addiert.)

Dabei sind Q & q die Ladungen, die bei gleichen Vorzeichen eine abstossende und bei entgegengesetzten eine anziehende Kraft ausüben und r der Abstand deren Mittelpunkte.

Die Variable k entspricht:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Die elektrische Feldkonstante ϵ_0 wiederum ist:

$$\epsilon_0 = 8.8542 * 10^{-12} \left[\frac{(As)^2}{Nm^2} \right]$$

Die grafische Darstellung des Feldes, mit Feldlinien:

Elektrische Feldlinien laufen von positiven zu negativen Ladungen.

Zudem schneiden sich diese im elektrischen Feld nie.

Die Feldliniendichte ist proportional Feldstärke und somit auch umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands, der Ladungen.

Homogene Felder, bei denen die Linien gleichgerichtet und parallel verlaufen, werden unterschieden von inhomogenen Feldern, bei welchen die Feldstärke nicht überall gleich ist.

3.1.2 Energie im elektrischen Feld:

Ein Körper erhält durch die Beschleunigung der elektrischen Kraft, während dem Weg \vec{s} die kinetische Energie W :

$$W = \vec{F}_{el} \cdot \vec{s} \cdot \cos\alpha(\vec{F}_{el}, \vec{s}) \rightarrow [W] = Nm$$

Das Potenzial, des Punktes P im homogenen Feld, ist dementsprechend:

$$\varphi = \frac{W}{q} = Es \rightarrow [\varphi] = \frac{Nm}{C}$$

Alle Punkte in derselben Äquipotentialfläche haben denselben Abstand, bezüglich der negativen Ladung Q . Da das Feld, von der positiven zur negativen Ladung gerichtet ist, ist das Potenzial von $\varphi_- = 0$ und das von $\varphi_+ = Es$.

Die **elektrische Spannung**/Potenzialdifferenz ist somit:

$$U = \Delta\varphi = \frac{\Delta W}{q} \rightarrow [U] = \frac{\text{Nm}}{\text{As}} = \text{V}$$

Somit ist $U = Es$, das heisst die Spannung ist proportional zum Abstand der Ladungen.

Es folgen das Ohmsche und das Joulesche Gesetz:

Widerstand:	$R = \frac{U}{I}$	$[R] = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$
Energie:	$W = UI t$	$[W] = \text{VAh} = \text{Wh}$
Leistung:	$P = \frac{W}{t} = UI$	$[P] = \text{VA} = \text{W}$

Kondensatoren nutzen das elektrische Feld, zur Energiespeicherung und sichern somit eine Versorgung von Geräten, mit einer konstanten Spannung. (Grehn & Krause, Elektrische Ladung und Elektrisches Feld, 2007, S. ganzer Abschnitt)

3.1.3 Magnetisches Feld:

Das magnetische Feld unterscheidet sich vom elektrischen dadurch, dass es geschlossene Kurven hat und die Feldlinien vom magnetischen Nordpol zum Südpol gehen. Dagegen gehen die elektrischen Feldlinien immer von positiver zu negativer Ladung und Monopole sind im Gegensatz zum Magnetismus möglich.

Die **magnetische Feldstärke** ist abhängig von der Kraft, auf einen elektrischen Leiter, der von der Stromstärke I durchflossen wird und die Länge l hat.

$$B = \frac{F}{Il} \quad [B] = \frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{T}$$

Dabei muss der Leiter senkrecht zur Feldrichtung sein, ansonsten muss der entsprechende Winkel α miteinbezogen werden.

$$F = IlB\sin(\alpha); \vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \text{ (vektoriell)}$$

Die **Lorentz-Kraft** F_L betrachtet die Kraft auf die Anzahl N gleicher Ladungen/Elektronen q . Welche sich mit der Driftgeschwindigkeit v entgegen der elektrischen Feldrichtung bewegen.

$$F_L = NqvB \rightarrow [F_L] = \text{As} * \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{N}$$

Auch bei der Lorentz-Kraft ist zu beachten, dass sie am grössten ist, wenn die Bewegungsrichtung der Ladungen/der Strom senkrecht zum Magnetfeld gerichtet ist.

$$F_L = qvB\sin(\alpha); \vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \text{ (vektoriell)}$$

Die Richtung der Kraft ist, folge dessen senkrecht zu der, von Bewegungsrichtung und Feldrichtung aufgespannten Ebene.

Um in der Praxis die Richtungen zu bestimmen, kann es hilfreich sein, die Drei-Finger-Regel der rechten Hand zu benutzen. Wobei der Daumen die Stromrichtung, der Zeigefinger die Feldrichtung und der dazu senkrechte Mittelfinger die Richtung der Lorentz-Kraft.

Das **Magnetfeld** eines Leiters oder einer Spule, ist abhängig vom durchfliessenden Strom I , dem Abstand r , der Anzahl Windungen n und der Spulenlänge l (Der Durchmesser der Spule hat keinen Einfluss auf das Feld).

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} = \mu_0 I \frac{n}{l} \quad \left[\frac{Vs}{m^2} = \frac{N}{Am} \right]$$

Dabei ist die magnetische Feldkonstante μ_0 :

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \quad \left[\frac{Vs}{Am} \right]$$

Die Feldstärke ist bei der Oberfläche des Drahtes am höchsten, innerhalb des Drahtes ist sie proportional und ausserhalb antiproportional abnehmend.

Um die Drehrichtung des Magnetfelds um einen Leiter herum zu bestimmen, kann man die Rechte-Hand-Regel nutzen. Indem man den Leiter so umfasst, dass der Daumen in Richtung des Stroms zeigt, damit die restlichen Finger die Feldrichtung anzeigen.

(Grehn & Krause, Elektrische Ladung und Elektrisches Feld, 2007, S. ganzer Abschnitt)

3.1.4 Wechselstrom:

Beim Wechselstrom ändert sich die Spannung sinusförmig, die Scheitelspannung \hat{u} bildet die maximale Spannung. Die Frequenz, das heisst die Anzahl der Wechsel von positiv zu negativ und zurück, pro Minute, wird in Hz angegeben. Die Leistung in einem System mit Wechselstrom ist gleich, wie bei einem entsprechenden Gleichstrom, daher kann man dieselben Formeln verwenden.

Dreiphasiger Wechselstrom, mit einer jeweiligen Phasenverschiebung von 120° , wird als Drehstrom bezeichnet, da er direkt zur Erzeugung des Drehfeldes von Elektromotoren verwendet werden kann.

Eine Spule und ein Kondensator verhalten sich bezüglich des Widerstandes gegengleich. Bei einer Spule steigt die Spannung bevor der Strom fliesst, somit ist der Widerstand mit zunehmender Frequenz immer höher, da gar kein nennenswerter Strom mehr fließen kann, bevor die

Richtung wieder ändert. Dagegen fließt der Strom im Kondensator bevor die Spannung aufgebaut wird und somit nimmt der Widerstand mit höherer Frequenz ab, da der Kondensator gar nicht mehr an seine Kapazitätsgrenze kommt.

Ein Transformator verändert die Spannung U eines elektrischen Stroms mit dem Verhältnis:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Wobei U_1 die Eingangsspannung und U_2 die Ausgangsspannung ist, n_1 und n_2 sind die Anzahl Windungen der beiden Spulen, die sich beide auf demselben geschlossenen Eisenkern befinden. (Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, 2007, S. ganzer Abschnitt)

3.2 3D-Druck

Additive Manufacturing oder 3D-Druck sorgt für Kostenreduzierung und Zeitersparnis. Von Konzeptmodellen und funktionalen Prototypen, für die schnelle Prototypenerstellung bis hin zu selbst funktionsbereiten Teilen im Herstellungsprozess, bietet die 3D-Druck-Technologie flexible Lösungen für einen breiten Anwendungsbereich.

In den letzten Jahren wurden hochauflösende 3D-Drucker immer erschwinglicher, benutzerfreundlicher und zuverlässiger. Folge dessen erschliesst sich diese Technologie einer immer grösseren Anzahl von Unternehmen und privaten Nutzern. Jedoch ist die Wahl des geeigneten Geräts, für Einsteiger, recht anspruchsvoll, da es sehr viele konkurrierende Anbieter gibt, deren Konzepte für den Bau eines 3D-Druckers oft grundlegend verschieden sind.

3.3 Druckverfahren

Alle 3D-Druckverfahren haben eines gemeinsam, es wird beim Herstellungsprozess nur Material aufgetragen und nicht wie bei herkömmlichen Methoden entfernt. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass im Vergleich zu herkömmlichen CNC-Fräsverfahren Rohstoffe eingespart werden können. Zudem können im Innern von Teilen Hohlräume geschaffen werden, womit die Teile um einiges leichter werden und die Stabilität dennoch erhalten bleibt. Somit sind auch sehr komplexe Geometrien realisierbar, ohne dafür einen enormen Aufwand bei der Fertigung zu betreiben. Der Grund für den geringen Aufwand liegt darin, dass 3D-Drucker völlig autonom arbeiten können. Die tatsächlich benötigte Zeit für ein 3D-gedrucktes Teil ist oftmals um einiges länger, als die Bearbeitungszeit entsprechender Frästeile. Denn bei den meisten Prozessen des 3D-Drucks wird jeweils nur eine sehr geringe Menge Material aufgetragen, um die benötigte Auflösung zu erreichen. Vor allem bei grösseren Objekten dauert demzufolge das Ausfüllen des Innenraums sehr lange.

3.3.1 Schmelzschtichtung (Fused Deposition Modeling)

Als 3D-Druckverfahren ist die Schmelzschtichtung im Hobbybereich am weitesten verbreitet. FDM 3D-Drucker erzeugen Teile durch das Schmelzen und Extrudieren von thermoplastischen Filamenten, bei dem eine Düse Schicht um Schicht im Aufbaubereich aufträgt. Die Schmelzschtichtung arbeitet mit einer Reihe von Standard-Thermoplasten, wie ABS, PLA und deren unterschiedlichen Mischungen. Die Technik eignet sich gut für Proof-of-Concept-Modelle (Modelle, welche die Durchführbarkeit eines Vorhabens bestätigen oder widerlegen), sowie für die schnelle und kostengünstige Protypenerstellung einfacher Bauteile.

FDM-Teile neigen zu sichtbaren Schichtlinien und weisen gegebenenfalls Ungenauigkeiten auf. Beispielsweise sind stark überhängende Oberflächen nur mit Stützstrukturen realisierbar. FDM bietet die niedrigste Auflösung und Genauigkeit im Vergleich zu SLA und SLS und stellt keine ideale Option für den Druck von komplexen Teilen dar. Oberflächen mit höherer Qualität lassen sich gegebenenfalls durch chemische Behandlungen, mechanische Polierprozesse und thermische Festung erzielen. Industrielle FDM 3D-Drucker benutzen auflösbare Stützstrukturen, zur Minderung einiger dieser Probleme und bieten eine breite Palette von technischen Thermoplasten, dies jedoch zu einem hohen Preis.

3.3.2 Stereolithografie

Stereolithografie (SLA) war die weltweit erste 3D-Druck-Technologie. Sie wurde Anfang der 1970er Jahre erfunden und zählt auch heute noch zu den beliebtesten Technologien für professionelle Anwendungen. SLA setzt einen Laser zur Härtung von flüssigem Harz ein, dieses Verfahren wird auch Fotopolymerisation genannt.

SLA-Teile weisen die höchste Auflösung und Genauigkeit aller bis heute bekannten 3D-Druck-Technologien auf. Die SLA-Drucktechnik kann zudem eine qualitativ hochwertige Oberflächenbeschaffenheit, mit minimal sichtbaren Schichtlinien und eine hohe Detailtreue gewährleisten. Jedoch liegt der wesentliche Vorteil von SLA in der Vielseitigkeit. Materialhersteller entwickelten innovative SLA-Harz-Zusammensetzungen, mit einer breiten Palette optischer, mechanischer und thermischer Eigenschaften. SLA stellt eine gute Option für hochgradig detaillierte Prototypen dar, die enge Toleranzen und glatte Oberflächen erfordern. SLA wird weltweit in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt, unter anderem in der Zahnmedizin, der Schmuckindustrie, im Modellbau und in der Bildung.

3.3.3 Selektives Laser-Sintern

Selektives Lasersintern (SLS) ist die am häufigsten eingesetzte Herstellungstechnologie für industrielle Anwendungen. SLS 3D-Drucker setzen einen leistungsstarken Laser, zur Verschmelzung von Pulver, bestehend aus kleinen Polymer-Partikeln, ein. Das nicht verschmolzene, wiederverwendbare Pulver stützt das Druckteil während des Drucks und macht eigens dafür vorgesehene Stützstrukturen überflüssig, was zu Materialeinsparungen führt. Dadurch eignet sich SLS ideal für komplexe Strukturen, darunter Innenraumeigenschaften, Unterschnitte und dünne

Wände. Im SLS-Druck erstellte Teile weisen ausgezeichnete mechanische Eigenschaften auf, wobei die Stabilität derjenigen von Spritzguss-Teilen ähnlich ist. SLS-Teile verfügen über eine leicht raue Oberflächenbeschaffenheit, die nahezu keinerlei sichtbare Schichtlinien aufweist.

Das am häufigsten für das selektive Lasersintern eingesetzte Material ist Nylon, weil es ein beliebter technischer Thermoplast mit ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften ist. Nylon ist ein leichtes, robustes Material, das ebenfalls hohe Stabilität gegenüber mechanischen Einwirkungen, Chemikalien, Hitze, UV-Licht, Wasser und Schmutz aufweist. Die Kombination aus niedrigen Kosten für die Teile, hoher Produktivität und etablierten Materialien macht SLS zu einer beliebten Wahl bei Technikern. Es kommt bei der Erstellung funktionaler Prototypen zum Einsatz und bietet, bei begrenzter Stückzahl, eine kostengünstige Alternative zum Spritzguss.

(formlabs, 2019, S. ganzer Abschnitt)

Auch oft verwendete Methoden des 3D-Drucks sind, das Verschmelzen von Metallpulvern, Selektiven Laser Schmelzen (SLM) genannt, das Herstellen von Gussformen für Metall- oder Vakuumgussteile bei kleinen Stückzahlen und Polygrafie.

3.4 Druckmaterialien

In diesem Abschnitt werden nur die Materialien fürs Schmelzschichtverfahren erläutert, die sogenannten 3D-Filamente.

Diese Filamente gibt es hauptsächlich im Durchmesser 1.75 mm. 2.85 mm dicke Filamente werden vor allem bei industriellen Druckern eingesetzt. Die Menge pro Rolle variiert von 250g-10 kg, dies entspricht einer Länge von 80–3300 m. Der Preis pro Kilogramm beträgt für die günstigsten Filamente 15.- SFr. und kann für Spezialfilamente bis über 1000.- SFr. gehen.

Bei folgenden Beschreibungen werden grösstenteils nur die gebräuchlichen Abkürzungen verwendet, da die vollen Namen oft aus komplizierten, chemischen Begriffen bestehen und in diesem Zusammenhang nicht wirklich aussagekräftig sind.

- **PLA** (Polyactide, umgangssprachlich Polymilchsäuren (Wikipedia, 2019)) ist das günstigste, weitverbreitetste Filament für private Anwendungen. Deswegen gibt es verschiedenste Variationen, für unterschiedlichste Anwendungen und Eigenschaften, wie beispielsweise Hitzebeständigkeit, Schlag- und Zugfestigkeit, Flexibilität, matte Oberflächen und gute Schichthaftung. Es ist zudem biokompatibel (kann in industriellen Kompostieranlagen umgewandelt und danach der Umwelt zurückgeführt werden), da die Grundsubstanz aus regenerativen Quellen gewonnen wird.
- **ABS** ist auch ein Filament für den täglichen Gebrauch, jedoch für erhöhte Ansprüche bezüglich Temperatur und Festigkeit. Die Nachteile dieses Materials sind, dass es zu Warping (siehe Glossar) neigt und beim Drucken leicht toxische Dämpfe entstehen, die jedoch bei guter Lüftung kaum gesundheitsschädigend sind.

- **ASA** eignet sich bestens für den Ausseneinsatz, hat dementsprechend recht hohe Hitzebeständigkeit und ist UV-beständig. Es hat auch bessere mechanische Eigenschaften als ABS.
- **Nylon** ist sehr stabil und beständig gegen hohe Temperaturen, UV-Strahlung und viele Chemikalien. Es wird in der Maschinen- und Automobilindustrie eingesetzt, weil die Vorteile, die der meisten anderen Kunststoffe übertreffen. Es hat aber auch einen dementsprechend hohen Verkaufspreis, von über 100.- Sfr/kg.
- **Wood** Filamente sind auf einer Basis, welche der Zusammensetzung von PLA ähnlich ist und werden bis zu Hälfte mit Holzpartikeln versehen. Anstatt Holz können auch andere Pulver beigefügt werden, beispielsweise aus Stein oder Metall. Diese Additive werden hauptsächlich eingesetzt um optische und haptische Eigenschaften (beispielsweise: metallischer Glanz, raue Oberflächen, grössere Dichte, erhöhte Wärmeleitfähigkeit) zu erlangen, welche Skulpturen echt erscheinen lassen.
- **Flex**, mit diesem Material lassen sich Teile drucken, die mehrfach stark verformbar sind. Die Materialien reichen von modifiziertem PLA, über TPE/TPU, bis zu TPC, welches gummiartige Objekte ermöglicht.
- **PETG** ermöglicht es lebensmittelechte Teile zu drucken, die auch recht stabil sind und je nach Marke glasklar erscheinen, wie herkömmliche PET-Flaschen.
- **HIPS** lässt sich gut mit ABS kombinieren und ist in Limonenextrakt löslich. Demzufolge kann es, vor allem bei ABS-Drucken, als Stützmaterial verwendet werden, weil die mit HIPS gedruckten Bereiche im Nachhinein mit Säure aufgelöst werden können.
- **Metallic** Filamente erscheinen nachbearbeitet wie echte Metallteile. Es gibt von bestimmten Marken auch Materialien, welche magnetisch oder elektrisch leitfähig sind. Da der Anteil an Metallpulver teilweise recht hoch ist und das Druckmaterial dadurch abrasiv wirkt, sollten Edelstahl-Druckdüsen verwendet werden.
- **Polypropylen** ist lebensmittelecht und kann in der Mikrowelle verwendet werden. Viele weitere Eigenschaften entsprechen dem weltweit vielseitig eingesetzten PP.
- **PC/PMMA**, dieser Kunststoff ist kratz-, schlag- und hitzefest. In der Industrie wird er für verschiedenste Verkleidungen verwendet.
- **Hitzebeständig**, entsprechende Filamente gibt es von verschiedenen Marken, mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen. Bei allen ist jedoch zu beachten, dass sie sehr hohe Drucktemperaturen benötigen und dementsprechend All Metal Spezialdruckköpfe verwendet werden müssen. Zudem müssen die Teile meist nach dem Drucken im Backofen noch gefestigt werden. Da Kunststoffe allgemein recht tiefe Schmelzpunkte haben und für 3D-Druckanwendungen noch bestimmte Flusseigenschaften erfüllt werden müssen, sind die Preise für keine andere Materialsorte so hoch.
- **Support**: PVA/BVOH sind wasserlösliche Stützfilamente, deren Preis jedoch meist höher ist als der des Grundmaterials und somit nur begrenzt sinnvoll einsetzbar sind. Wie bei allen Supportmaterialien ist zu beachten, dass der 3D-Drucker dual-druckfähig sein muss.

- **Spezial**, in dieser Materialgruppe sind die verschiedensten Materialien enthalten, wie beispielsweise antibakterielle Kunststoffe, Wachsfilament für Gussformen oder Filamente mit Kohlenstoffnanoröhren für extreme Festigkeit oder elektrische Leitfähigkeit.

(3D-Printerstore.ch, 2019, S. ganzer Abschnitt)

3.5 Funktionsprinzip Elektromotoren

Einfach ausgedrückt ist ein Elektromotor ein elektromechanischer Wandler, der aus elektrischer Leistung eine mechanische Leistung erzeugt. Demzufolge verfügen Elektromotoren über einen Stromanschluss, über den die elektrische Energie zugeführt wird. Der mechanische Antrieb, der im einfachsten Fall als Welle ausgeführt ist, dreht sich und dient als Antrieb für Maschinen und Geräte. Das Funktionsprinzip eines Elektromotors beruht auf der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes.

Bei einem Elektromotor nutzt man die Tatsache, dass sich Magnete, je nachdem wie man sie zueinander ausrichtet, gegenseitig beeinflussen. Gleiche Magnetpole stossen sich ab und ungleiche Magnetpole ziehen sich an. Wenn durch eine Spule ein Gleichstrom fliesst, baut diese ein Magnetfeld auf und der Eisenkern wird zum Elektromagneten. (Conrad, 2019) Um den Eisenkern sind die felderzeugenden Kupferdrähte gewickelt und er bewirkt die Übertragung des Magnetfelds, durch seine optimalen magnetischen Flusseigenschaften. Um eine Bewegung in die gewünschte Richtung zu erzeugen, muss eines der beiden Magnetfelder ständig umgepolt werden. Bei Gleichstrommotoren erfolgt dies über den Kommutator, als mechanische Schaltung, welche jedoch Nachteile wie der Verschleiss der Kohlekontakte hat. Heutzutage gibt es auch elektrisch gesteuerte Alternativen.

Mit der Einführung des Wechselstroms erkannte man, dass mit drei um 120° verschobenen Phasen ein perfekt gleichmässiges Drehfeld erzeugt werden kann. Daher der Name Drehstrom, für die entsprechenden Versorgungsnetze. Am weitesten verbreitet sind Asynchronmotoren, mit einem Kurzschlussläufer. Dabei wird das permanente Magnetfeld des Rotors durch Induktion, des schneller drehenden Stator-Magnetfeldes, gebildet. Bei den meist effizienteren, permanent erregten Synchronmotoren ist die Drehzahl direkt abhängig von der Drehstrom-Frequenz.

So gut wie alle herkömmlichen Elektromotoren brauchen jedoch Eisenkerne, die mit geschichteten Weicheisen-Bleichen aufgebaut sind. Um somit eine optimale Interaktion der Magnetfelder gewährleisten. Die Fragestellung dieser Arbeit lautet, ist es auch möglich, sämtliche Teile aus Material, das auf Kunststoff basiert herzustellen?

4 Material und Methoden

4.1 Material

- 40 (+10 Ersatz) N42 Quadermagnete 40 x 10 x 5 mm, 15g, aus Neodym, Eisen und Bor, mit einer Haftkraft von maximal 9.5 kg/ 93.2 N. Vom Online-Shop Supermagnete (<https://www.supermagnete.ch/quadermagnete-neodym/quadermagnet-40mm-10mm-5mm-Q-40-10-05-N>)
- 2 Kugellager 15x35x11 mm von Kugellager King (<https://www.kugellager-king.com/de/>)
- Präzisionswelle ca. 30 cm, 15h6 in Cf53 von Smalltec (<https://www.smalltec.de/>)
- Verschiedenfarbige 3D-Filamente aus PLA, 1.75 mm Durchmesser, 1 kg pro Spule, von Ebay (<https://www.ebay.de/itm/3D-Drucker-1kg-Filament-Rolle-PLA-1-75mm-Schwarz-Transparent-Gelb-Rot-Camouflage-/263196758411>)
- Spezialfilamente:
 - Proto-Pasta Magnetic PLA 1.75 mm, 0.5 kg, mit Eisenpartikeln
 - PLA Tough dark grey 1.75 mm 1 kg, faserverstärkt von 3D-Printerstore.CH (https://www.3d-printerstore.ch/3D-Filament-Resin/3D-Filament-1-75-mm:::49_51.html)
- 3D-Drucker:
 - FLSUN Cube 3d Drucker DIY Kit, mit Auto Nivellierung, 260x260x350 mm Bauvolumen, beheiztem Druckbett, hoher Präzision und Touchscreen Steuerung, von Amazon (https://www.amazon.de/dp/B07424RLF4/ref=pe_3044161_185740101_TE_item)
 - Tronxy X5ST-500-2E Grosser 3D Drucker, mit Doppel-Farb Extruder Cyclops und 5000x500x600 mm Bauvolumen, von Aliexpress (<https://de.aliexpress.com/item/32537237418.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.27424c4dBUEgYS>)
 - Renkforce 3D Drucker-Stift ABS, PLA 1.75
- 2.2KW 220V PWM Frequenzumrichter mit 1-phasigem Eingang und 3-phasigem Ausgang, von Banggood (https://www.banggood.com/de/2_2KW-220V-PWM-Control-Inverter-1Phase-Input-3Phase-Out-Inverter-Variable-Frequency-Inverter-p-1282676.html?rmmds=myorder)
- Modul zur Temperaturmessung, W1209 DC 12V, von Aliexpress (<https://de.aliexpress.com/item/32830509403.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.27424c4dsN15W6>)
- Asynchronmotor mit 0.18 kW Leistung, von Fribat Elektrowicklerei Schötz geschenkt.
- Wicklungstechnik:
 - Wicklungen aus Kupferlackdraht für Modell 1.1 und 1.2, jeweils ca. 400 m Draht im Durchmesser 0.6 mm und 0.67 mm.
 - Jegliches Isolationsmaterial (Deckschieber, spezielles Isolierklebeband, «Buschi Rohr») für Modell 1.1 und 1.2.
 - Von der Fribat Elektrowicklerei kostenlos zur Verfügung gestellt.

4.2 Methode

- Aneignung der grundlegenden Theorie und weiterführende Informationsbeschaffung zur Motorentechnik.
- Gespräche mit Fachpersonen zur Evaluierung der Machbarkeit und Beantwortung von technischen Fragen.
- Konstruieren eines kompletten CAD-Modells mit Creo, welches laufend nach neusten Erkenntnissen verbessert und ergänzt wurde.
- Beschaffen der nötigen Materialien:
3D-Drucker und Filamente waren grösstenteils schon vorhanden. Ich entschied mich bei der Entwicklung Spezialfilamente zu nutzen, um einen verbesserten magnetischen Fluss, sowie eine erhöhte Stabilität zu erhalten. So wurden auch diese noch nachbestellt. Der neue 3D-Drucker wurde während der Arbeit angeschafft, um weitere unangenehme Zeitverzögerungen zu vermeiden.
Kugellager und Vollwelle waren aufgrund anderer Projekte schon vorhanden.
Der Einphasen-Dreiphasen-Frequenzumrichter erwarb ich, für die komfortable Kontrolle von Drehzahl, Betriebsspannung und Anlaufampen der Motoren. Zudem ermöglichte er den Betrieb im Einphasennetz, wodurch ich nicht auf 380V Dreiphasen-Steckdosen angewiesen bin.
- Die Teile der Motoren wurden auf den beiden 3D-Druckern während rund 400 Stunden gedruckt. Bei Bedarf schliff ich die Bauteile oder drechselte sie rund. Auch der 3D-Druckstift (ein von Hand bedienbarer 3D-Druckkopf) wurde benutzt, um einzelne Komponenten im Nachhinein noch zusammenzukleben.
- Die Statorwicklungen wurden für beide Motoren bei der Elektrowicklerei Fribat gewickelt und beim Modell 1.1 zuhause eingelegt. Der Stator von Modell 1.2 dagegen haben wir schon bei der Fribat komplett fertiggestellt.
- Die Verschaltung, Inbetriebnahme, Leistungsmessungen und auch viele andere Details wurden zuhause, teils in der Werkstatt erledigt.

5 Chronologischer Ablauf der Arbeit

Schon sehr bald eignete ich mir die Theorie zu Elektrizitätslehre an und informierte mich ausgiebig zur Motorentechnik. Zudem fanden regelmässig Treffen mit dem Betreuer Herr Stefano Chiantese statt, welcher mich hauptsächlich beim Theorieteil unterstützte und verschiedene physikalische Phänomene durch Experimente verständlich aufzeigte.

5.1 Praktikum Fribat

In der Woche vom 25.03.2019 gestattete mir die Elektrowicklerei Fribat einige Einblicke in die Wickeltechnik. Im Rahmen dieses kurzen Praktikums konnte ich zum ersten Mal eine Spule aus Kupferlackdraht in den Stator eines Elektromotors einlegen.

Dieser Besuch basierte auf der Absicht, den Aufbau herkömmlicher Elektromotoren näher kennen zu lernen und die Meinung von Fachpersonen, bezüglich des Projekts, einzuholen. Da das Personal der Fribat mein Vorhaben für zu komplex oder als nicht machbar hielten, schenkten sie mir grosszügigerweise einen Asynchronmotor (0.18 kW). Mit der Idee die Verkleidungen und den Kühlungspropeller, mit dem 3D-Drucker aus Plastik zu reproduzieren.



Abb. 2: Asynchronmotor, ein Geschenk Firma Fribat, Schötz.

Die entsprechenden Teile hatte ich innerhalb kurzer Zeit, in derselben Farbe nachgebildet und ausgetauscht. Auch die restlichen Bauteile, dieses Dreiphasenmotors, wurden zerlegt und inspiziert. Daraus konnte ich erste Erkenntnisse zum Grundprinzip des Aufbaus gewinnen.

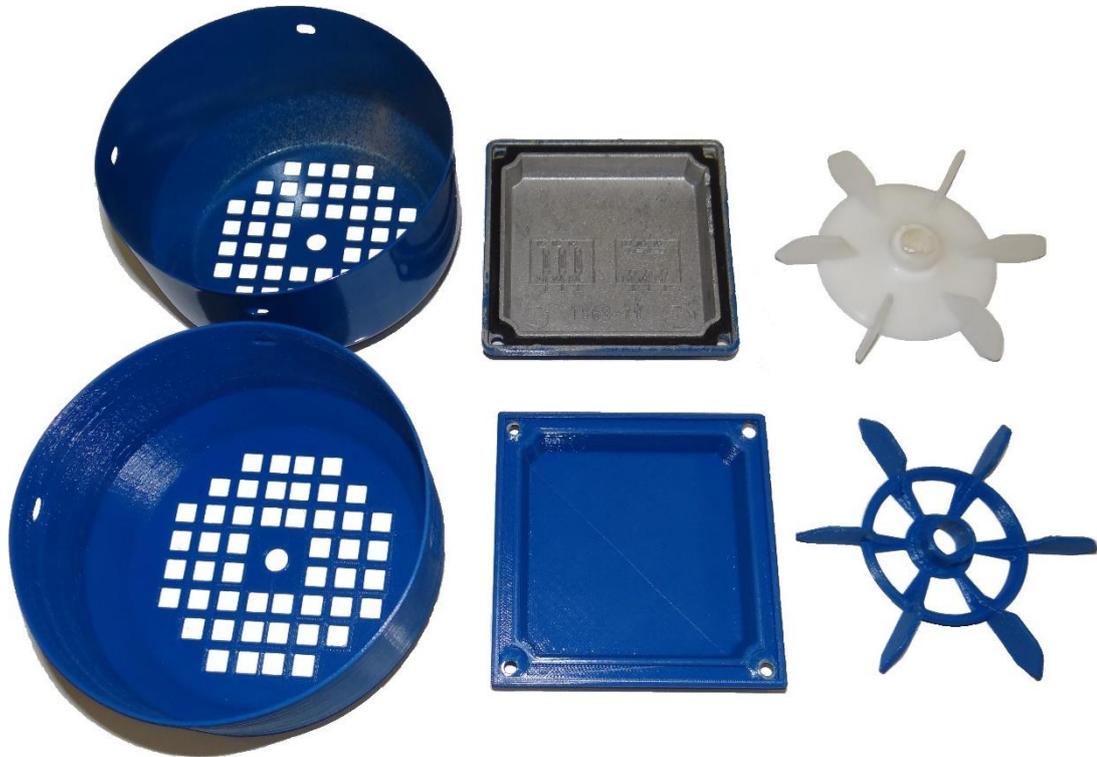


Abb. 3: Abdeckungen und Propeller als Original im Hintergrund, im Vergleich mit den nachgedruckten Teilen im Vordergrund.

5.1.1 Paul Hendriksen

Von der Fribat bekam ich zudem noch die Adresse von Herrn Paul Hendriksen aus Grosswangen, dem Erbauer der Wimshurst Maschine im Technorama Winterthur. Dem Hinweis folgend, dass Herr Hendriksen sehr viel Erfahrung mit innovativer Technik hat, besuchte ich ihn zweimal. Im Gespräch mit ihm erfuhr ich interessante Phänomene aus dem Bereich Hochspannung und Hochfrequenz. Er konnte mir auch einige spannende Experimente und Fotos zeigen, da er selbst früher in Holland in einem Umspannwerk arbeitete und verschiedene Versuche mit hohen Frequenzen und Hochspannungsgeräten machte.

Bezüglich meiner Projektidee meinte er, dass ein entsprechender Motor mit hohen Frequenzen betrieben werden könnte, da die Plastikteile eine geringere Beeinflussung durch das Gegen-EMK verspüren und kaum eine Grenze haben bezüglich der Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste. (Götz Ingenieurbüro, 2019)

Für anspruchsvoll hielt er jedoch die Fertigung eines permanent erregten Rotors, da hierzu normalerweise Ring-Segmentmagnete verwendet werden.



Abb. 4: E-Bike Motor, von Herrn Hendriksen geschenkt.

Deshalb überreichte er mir beim zweiten Treffen einen E-Bike-Motor, mit defekter Elektronik. Damit hätte die Möglichkeit bestanden, den Rotor dieses Synchronmotors für das 3D-gedruckte Modell zu verwenden. Denn dieser ist bereits mit den kostspieligen Ring-Segmentmagneten bestückt, aber einiges zu klein, für den Bau eines grosszügigen und anschaulichen Prototyps.

5.2 Weiterführung der ursprünglichen Idee

Da die zuvorkommende Idee der Fribat, nicht mein ursprüngliches Ziel verfolgte und der E-Bike-Rotor meiner Meinung nach zu klein war für mein praktisches Projekt, begann ich eine eigene Version zu entwerfen.

Weil den Fachleuten zufolge, ein Stator aus reinem Plastik nicht funktioniert, entschied ich mich zwei Varianten des Statorpakets zu machen. Bei der zweiten Ausführung sollte das Statorpaket aus eisenhaltigem, magnetischem PLA gedruckt werden. Demzufolge begab ich mich auf die Suche nach den geeigneten Materialien. Teile und Werkstoffe, die zuhause nicht zur Verfügung standen, bestellte ich online. Am Schluss sollten die beiden Exemplare geprüft und verglichen werden.

5.3 Modell 1.0

Noch in derselben Woche begann ich die CAD-Konstruktion mit Creo. Von da an, gab es bis Ostern kaum ein Wochenende, an dem die Dateien für das erste Modell nicht erweitert, verfeinert oder gar komplett abgeändert wurden. Durch die intensive Beschäftigung mit Creo erlernte ich zahlreiche neue Funktionen, welche das Konstruieren komplexer Bauteile überhaupt erst ermöglichen. So gelang es mir beispielsweise zum ersten Mal eine komplette Baugruppe zu erstellen, wodurch sich die Passgenauigkeit der einzelnen Komponenten zueinander überprüfen liess. Oder die Erstellung der komplexen Geometrie des Kühlpropellers.

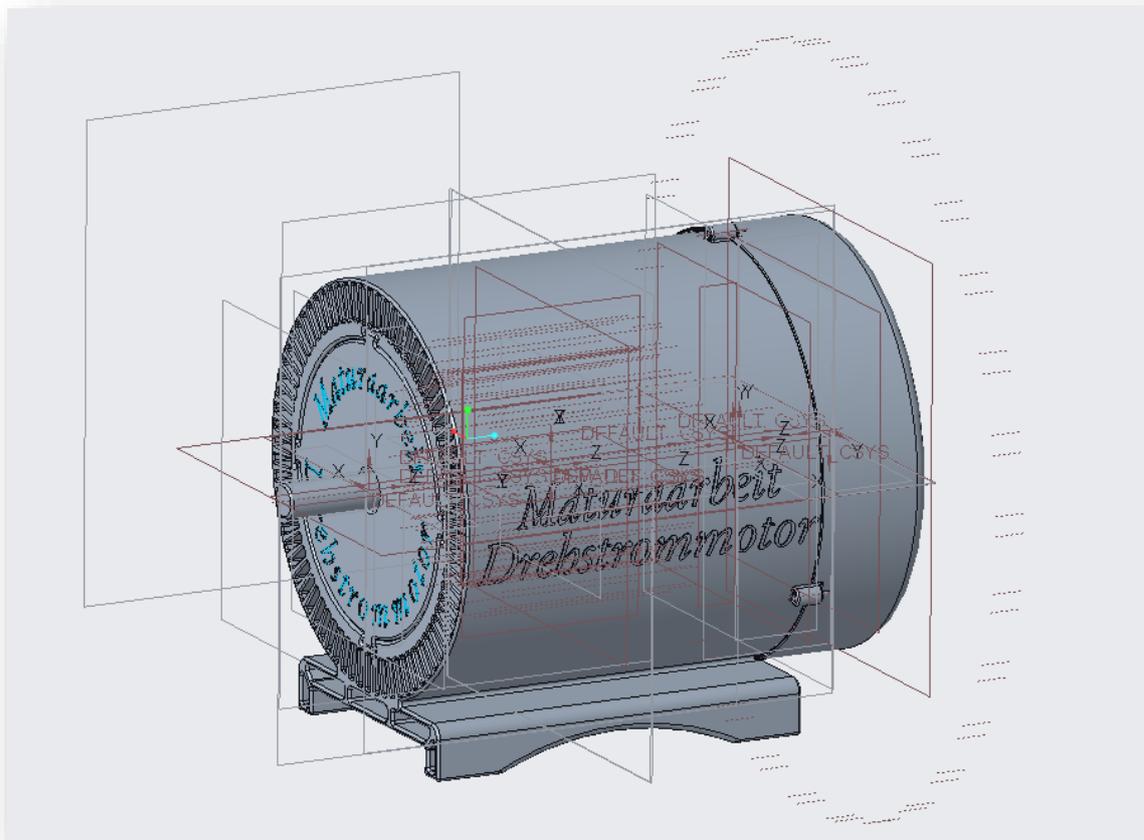


Abb. 5: Konstruktion der Version 1.0

Zu Beginn der Osterferien konnten die fertigen CAD-Dateien mit Cura (Programm zum Slicen von STL-Dateien) druckfertig formatiert werden. Der Prozess des Slicens dauerte bei mir teilweise über 15 Minuten, obwohl ich einen Rechner verwendete, der einem speziell Leistungsstarken Prozessor verbaut hat. Ursache solch langer Berechnungszeiten ist es, dass beispielsweise über 10 Millionen einzelne Druckbefehle konfiguriert werden müssen. Durchschnittlich dauert es ungefähr einer Woche, bis ein FDM-3D-Drucker diese dann ausgeführt hat.

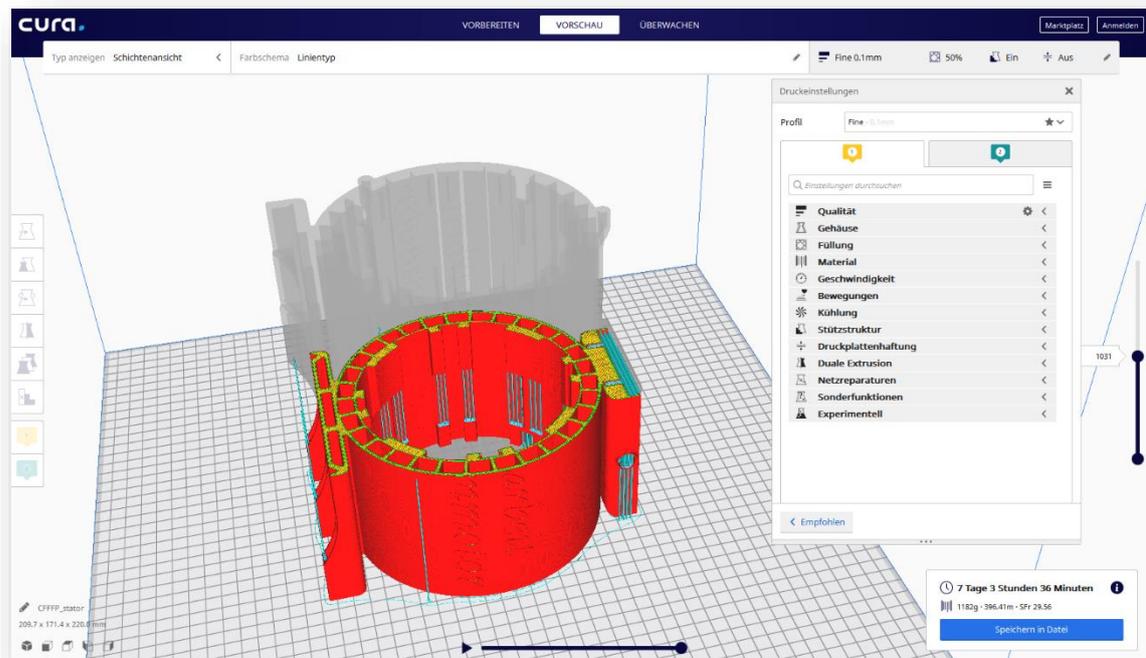


Abb. 6: Druckvorschau der Layer, nach dem Slicen in Cura.

Während der ersten Woche druckte ich das Stator-Gehäuse, was ca. 100 Stunden Druckzeit beanspruchte. Durch einen technischen Defekt wurde der Druck kurz vor Schluss abgebrochen.

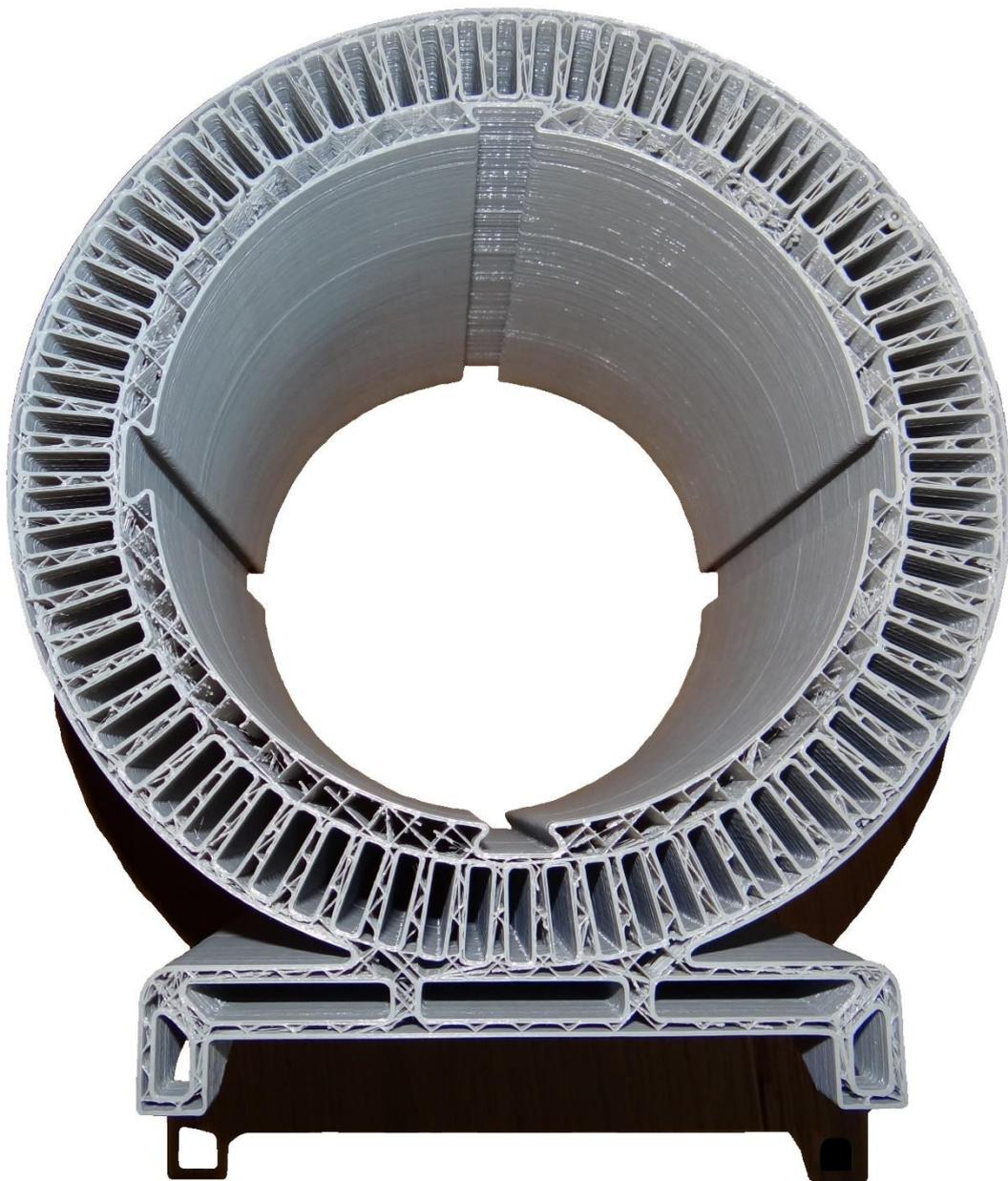


Abb. 7: Unvollendeter Druck des Stators von Modell 1.0.

Ursache könnte ein kurzzeitiger Stromausfall gewesen sein. Als der Drucker bei weiteren Versuchen, kleinere Teile zu drucken, weiterhin nicht funktionierte, nahm ich an das ein technischer Defekt am Drucker vorliegt. Die Fehlersuche führte unter anderem auch auf eine Überhitzung des Mainboards. Später fand ich in der Originalverpackung mehrere kleine Kühlkörper, die zum Aufkleben auf die Prozessoren gedacht gewesen wären. Diese hatte ich beim Zusammenbau nicht verwendet, da dieser Arbeitsschritt in der mangelhaften Anleitung nicht beschrieben war. So ging ich davon aus, dass die erstmalige, längere, ununterbrochene Verwendung des Druckers, von fast einer Woche, zu einer Fehlfunktion der Prozessoren führte. Folge dessen,

bestellte ich ein neues Mainboard und gleichzeitig machte ich mich auf die Suche nach einem zweiten, neuen 3D-Drucker. Die Entscheidung einen zusätzlichen Drucker anzuschaffen rührte daher, dass eine erfolgreiche Reparatur des defekten Druckers nicht garantiert war und ich mir weitere Zeitverzögerungen nicht erlauben konnte. Nach einigen Preis-Leistungsvergleichen fiel die Wahl auf das Modell X5ST-500-2E der Marke Tronxy, da auch dessen Gehäuse sehr stabil und würfelförmig aufgebaut ist.

Bei genauerem Betrachten des unvollständigen Stator-Gehäuses bemerkte ich bald, dass das Anschlussgehäuse, als wichtige Komponente fehlte. So nahm ich auf dem Weg zum Modell 1.1 diese und jene Ergänzung und Verbesserung vor.

5.4 Dimensionierungen

Einige Berechnungen, zur Bestimmung der, durch die Magneten auf die dünne Rotor-Hülle ausgeübten Fliehkräfte, tätigte ich schon früh. Dabei stellt sich vor allem die Frage, wie sich die Werte verschiedenen Drehzahlen und Rotordurchmessern verhalten. Auch die Grösse und die minimale magnetische Flussdichte der Permanentmagnete bestimmte ich so gut wie möglich. So entstanden bald die wichtigsten Masse für Modell 1.0 und die nachfolgenden Versionen.

Bei der Dimensionierung der Windungen des Stators, welche 1 kW elektrische Leistung aufnehmen sollten, gab es einige Schwierigkeiten. Die Feldstärke kann bei einem bestimmten Strom und einer bestimmten Anzahl Windungen zwar festgelegt werden, nicht aber direkt wie viel Strom effektiv fliesst. So bleibt es sehr anspruchsvoll optimale Werte zu bestimmen. Auch die Feldstärke, welche nötig ist, um genügend Drehmoment zu erreichen, ist schwer festzulegen, da Wirkabstände- und Winkel bei einem solchen 3D-gedruckten Motor kaum definitiv festgelegt werden können. So verbrachte ich viele Stunden um dennoch einen Weg zu finden, die unbekannt Grössen zu definieren. Auch die vielen Internetrecherchen, nach einer passenden Formel oder einem entsprechenden Berechnungstool, führten zu keinem nützlichen Resultat. Weil mir auch der betreuende Physiklehrer Herr Chiantese nicht weiterhelfen konnte, blieb mir nichts anderes übrig, als erfahrenes Fachpersonal beizuziehen.

Als Erstes wendete ich mich wiederum an die Fribat. Sie teilten mir mit, dass bei ihnen solche Berechnungen nicht durchgeführt werden. Da sie sich hauptsächlich mit Asynchronmotoren beschäftigen. Eine E-Mail an die Maxon Motor AG ergab, dass diese vorwiegend Gleichstrommotoren konzipieren, welche sich im Bereich unter einem kW Leistung befinden. Als Nächstes wandte ich mich an die Elektrowicklerei Battistella, die auch keine eigenen Berechnungen macht und sich sehr wenig mit Synchronmotoren beschäftigt. Freundlicher Weise gab mir Herr Marcel Battistella den Hinweis, mich an Herrn Adrian Gyger zu wenden, der schon einige Erfahrungen mit permanent erregten Synchronmotoren besitze.

So vereinbarte ich mit ihm einen Termin, für den 29.05.19 und besuchte die Elektrowicklerei Gyger in Oensingen. Da die Bestimmung der Dimensionen für einen ungenormten Motor sehr

komplex sind, konnte auch Herr Adrian Gyger keine individuellen Masse berechnen. Sehr zuvorkommend überreichte er mir eine Normtabelle für Synchronmotoren und klärte meine restlichen Fragen, ausreichend um meinen Elektromotor zu planen.

5.5 Neuer 3D-Drucker

Noch vor dem Abschliessen der Dimensionierungen, hatte ich den Bausatz (im Anhang) für den Tronxy X5ST-500-2E Anfangs Mai erhalten. Der Grund, diesen grossen und normalerweise recht teuren DIY-Drucker zu kaufen, liegt darin, dass es mir gelang ein äusserst vorzügliches Angebot auszuhandeln. Auch mein Interesse am fortschrittlichen, grossräumigen 3D-Druck, gab mir Anlass diesen Drucker zu erwerben.

An insgesamt vier Tagen baute ich den neuen Drucker zusammen und verkabelte die Elektronik. Für die Grösse des Geräts, hatte der Zusammenbau ein gutes Konzept und die vorgefertigten Teile waren weitgehend vorbereitet. Auch die Software war sehr überzeugend und benutzerfreundlich programmiert.

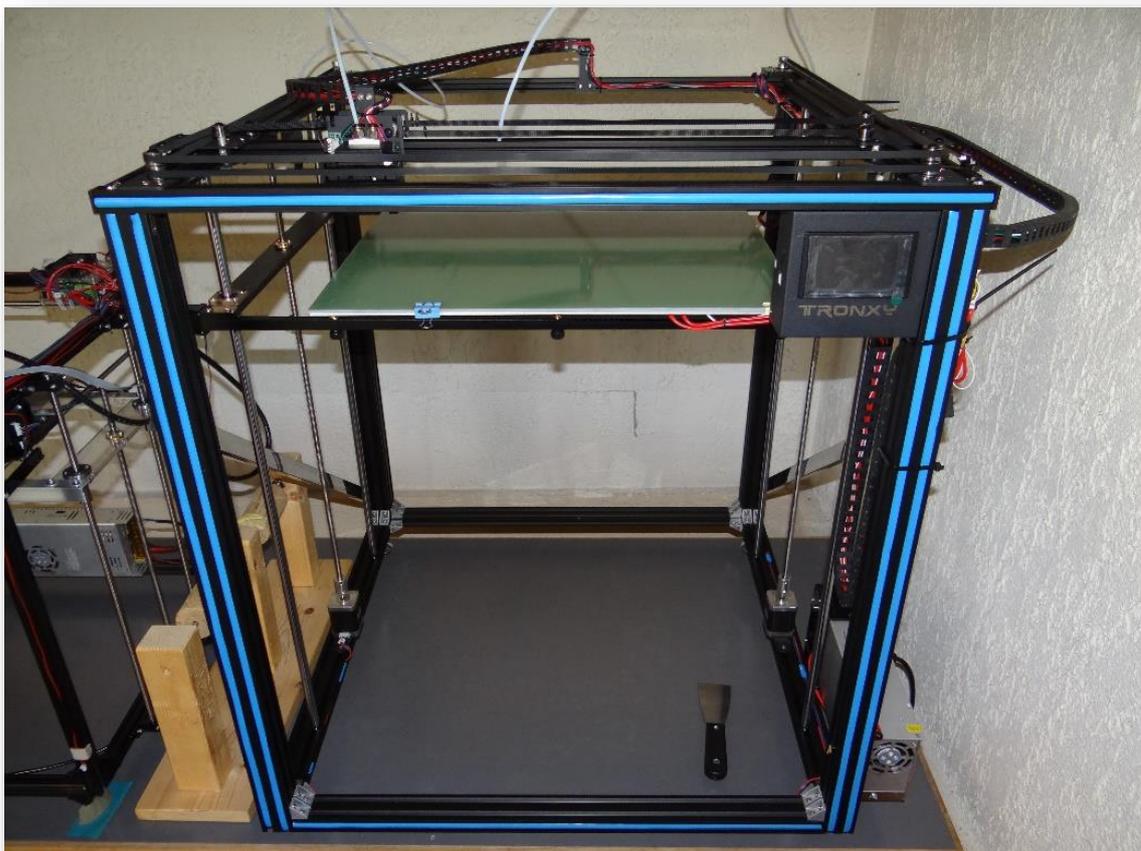


Abb. 8: Fertig zusammengebauter, verkabelter und in Betrieb genommener Tronxy X5ST-500-2E

5.6 Modell 1.1

5.6.1 Teile fertigen

Noch am selben Tag, nach dem Treffen mit Herr Gyger, begann ich die CAD-Dateien abzuändern. Der neue Stator hatte nun ein Anschlussgehäuse, mit einem Durchgang für die Litzen-drähte der drei Phasen. Die äussere Schicht des Gehäuses, wo sich die Kühlrippen befinden, konstruierte ich mit einem kleineren Durchmesser, um Materialersparnisse und kürzere Druckzeiten zu gewährleisten.

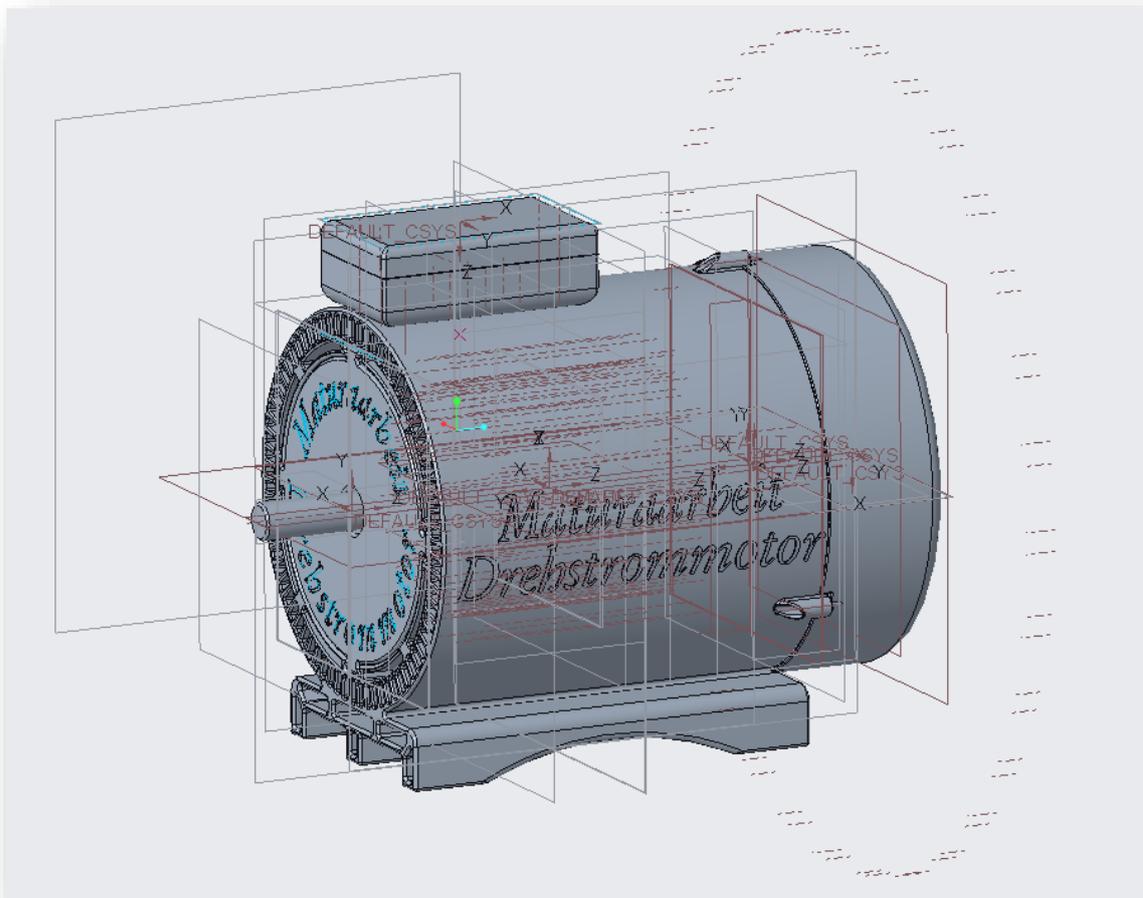


Abb. 9: Konstruktion der Version 1.1.

Auch die G-Code-Dateien wurden bei diesem Modell anders strukturiert. Einerseits verringerte ich die Wanddicke des Stators von 0.8 auf 0.4 mm, andererseits änderte ich die Füllstruktur von Linien auf Konzentrisch. Der Drucker muss so weniger an Beschleunigungen durchführen, da die konzentrischen Fülllinien deutlich länger zusammenhängend sind. Unter Verwendung von gleichgerichteten Linien, als Füllung, entstehen dagegen viele Hundert einzelne Segmente, zwischen den dünnen Wandstücken. Bei diesen Optimierungen ging es hauptsächlich darum, die Druckzeit zu reduzieren, um das Risiko eines Druckstopps zu verringern.



Abb. 10: Fertig gedrucktes Gehäuse des Motors 1.1.

Während den darauffolgenden Wochenenden, war ich damit beschäftigt alle Teile von Modell 1.1 auszudrucken, nebenbei noch Dateien zu optimieren und den neuen 3D-Drucker, mit der mir noch unbekannt Funktionen, des Dual-Drucks kennenzulernen. Einige fertig gedruckte Teile mussten auch noch nachbearbeitet werden. So schiff ich die Oberfläche des Propellers möglichst glatt und entfernte Grate und dünne Fäden aus PLA. Diese Materialüberschüsse entstehen einerseits beim Fortbewegen der Düse über nicht zu bedruckende Bereiche, andererseits sind Elemente für die Druckplattenhaftung oder Stützstrukturen zusätzliche zu entfernende Reste. Im Weiteren mussten der Rotor und zwei Kugellager auf die Welle geschoben werden. Dazu habe ich die Welle durch die knappen Öffnungen der Lager geschlagen, damit diese fest verkeilt an der gewollten Position bleiben.



Abb. 11: Propeller von Modell 1.1.

Leider musste ich kurz vor Schluss, beim Zusammenbau feststellen, dass die Teile einen leichten Verzug aufweisen, durch den jegliche runde Teile, bis zu über ein Prozent, elliptisch wurden. Alle Teile noch einmal neu zu drucken kam zeitlich und vom materiellen Aufwand her nicht infrage. Die verbleibenden Teile druckte ich dann in die richtige Richtung falsch, so dass beispielsweise die Beschriftung immer korrekt ausgerichtet ist. Denn die geplant radialsymmetrischen Teile passen, in ihrer elliptischen Form, nur noch um jeweils 180° gedreht zusammen. Bei funktionellen Komponenten wie dem Rotor, welcher einen nur sehr kleinen Abstand (0.75 mm) zum Stator aufweist, konnten diese Ungenauigkeiten nicht belassen werden. So musste ich den schon mit Magneten bestückten Rotor, dessen Aussenwand aus nicht mehr als 0.5 mm dickem Plastik besteht, auf der Drehbank meines Grossvaters so gut wie möglich rund drehen. Auch das, bei diesem Modell aus Plastik bestehende, Statorpaket musste an den exakt richtigen Stellen, geschiftet werden. Damit es im Stator-Gehäuse in die richtige Position gedrückt wird, trug ich mit dem 3D-Stift zusätzliche Plastikspuren auf. So konnte ein exakterer zylindrischer Hohlraum, für die Drehbewegung des Rotors, geschaffen werden.



Abb. 12: Beschriftete Seitenwand 1.2 von Modell 1.1.

Nach der Fertigstellung aller Teile, habe ich das Problem der Ungenauigkeit des Druckers gesucht und fand heraus, dass das Aluminiumprofil der beweglichen x-Achse schräg stand. Deswegen wurden effektiv gar nicht genug lange X-Bewegungen ausgeführt, weil nach dem Satz des Pythagoras ungewollt auch noch eine Y-Komponente hinzukommt. Diese Ungenauigkeiten verursachten die oberen Abweichungen. Nach genauerem Hinschauen und einem Hinweis meines Vaters, fanden wir heraus, dass das Grundgestell des Druckers in verschiedene Richtungen um mehrere zehntel Millimeter schief verschraubt war. Durch eine aufwendige Adjustierung der Hauptprofile, konnte im oberen Bereich, wo sich der Druckkopf bewegt, eine Verbesserung der Abweichung erlangt werden, die um das Zehnfache grösser war, als die Korrekturen im unteren Bereich. Fazit daraus ist, solch grosse 3D-Drucker, mit einer Höhe von fast einem Meter, müssen sehr präzise zusammengebaut werden, um danach überzeugende Druckresultate zu erhalten.

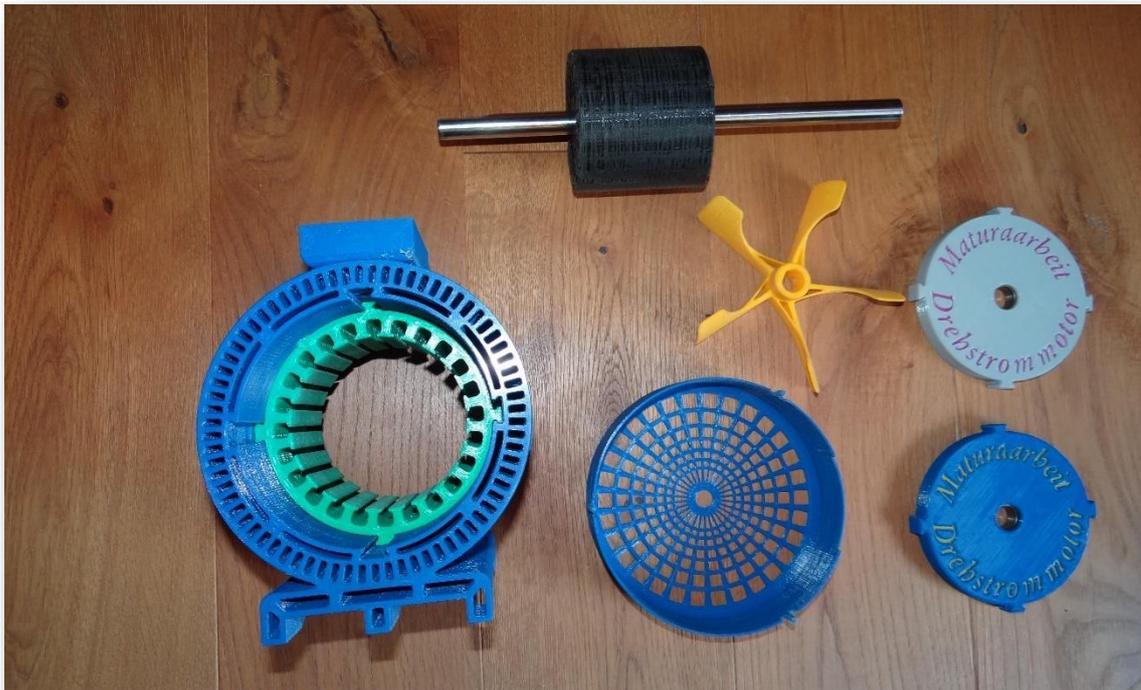


Abb. 13: Zusammenstellung aller nachbearbeiteten Teile.

Als die Teile aus PLA soweit fertig waren, kontaktierte ich Herr Daniel Petermann, Geschäftsführer der Fribat, um festzulegen, wann die Möglichkeit besteht die Statorspulen zu wickeln. Ursprünglich vorgesehen war, den Kupferlackdraht selber zu kaufen, die Spulen zu wickeln und sie danach einzulegen. Da gutes Material, schwer zu bekommen ist und ich als Privater dafür einiges mehr bezahle, schien es mir vernünftiger eine Elektrowicklerei mit genügend Erfahrung und Equipment herbeizuziehen. Im Verlauf der Arbeit realisierte ich zudem, dass die Spulen aus Kupferdraht, ohne eine spezielle Maschine und zusätzliche Hilfsmittel, kaum sauber gewickelt und eingelegt werden können.

5.6.2 Wickeln Motor 1.1

Bei der Fribat in Schötz stellten wir am 26.06.19 fest, dass aufgrund einiger Fehlüberlegungen die vorgesehene Wicklung, mit 0.65 mm Drahtdurchmesser nicht in die Nuten des Statorpakets passt. Grund war, dass die Berechnungen des Querschnitts die zusätzliche Dicke des Isolierlacks nicht berücksichtigten. Zudem war das gesamte Stator-Gehäuse, für die sich überlappenden Enden der Wicklungen zu knapp bemessen. Herr Anton Hügi, Spezialist für nicht genormte Motoren, wickelte mir trotzdem die nötigen Spulen, mit einem dünneren Drahtdurchmesser von 0.6 mm. Auch jegliches Isolations- und Befestigungsmaterial gab er mir nach Hause, damit ich die Wicklungen selbständig einlegen konnte.

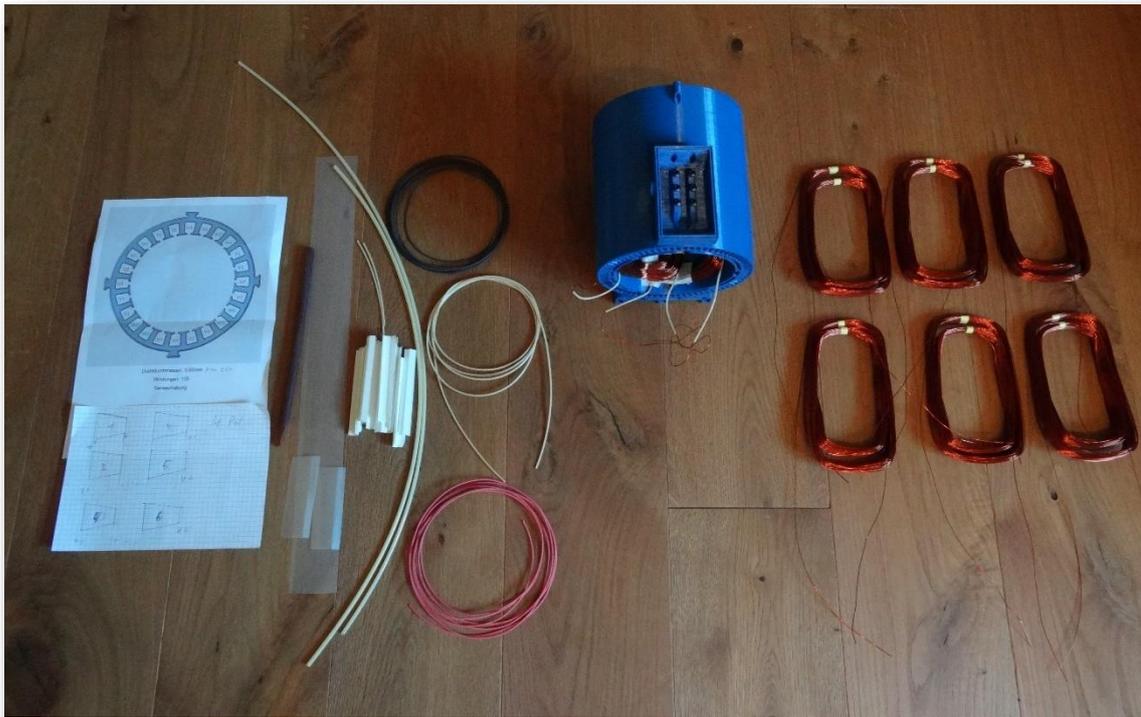


Abb. 14: Material um das Statorpaket von Modell 1.1 zu wickeln.

Das Stator-Gehäuse musste auch für die dünneren Wicklungen noch ausgefräst werden, um nur annähernd genügend Platz zu haben. Somit war klar, dass zusätzlich ein Modell 1.2 entwickelt werden musste, damit das Endresultat nicht aus einem manuell veränderten, kompromissreichen Modell besteht. Des Weiteren musste ich feststellen, um den Rotor im Nachhinein noch in den Motor einzubringen, müsste die Wicklung überall genügend weit nach aussen gedrückt werden können. Das heisst auch dort, wo beim Betrieb nur die relativ dünne Welle dreht, muss genügend Platz sein um den Rotor durchzuschieben. Weil das Stator-Gehäuse von Modell 1.1 mit nur 0.4 mm Wanddicke gedruckt war, konnte der instabil gewordene Motor kaum richtig bearbeitet werden, da er zu wenig bruch- und schlagfest war.

Herr Hügi zeigte sich sehr engagiert und interessiert und gab mir zahlreiche Tipps und Verbesserungsvorschläge, welche im Modell 1.2 dann zum Tragen kamen. Beispielsweise war es seine Idee, die Seitenwände mit den Lagersitzen, durch Verschraubung mit dem Gehäuse, solider, praktischer und besser zentriert an der vorgesehenen Stelle zu fixieren. Auch die Nuten-Schlitze mussten geschmälert werden, damit die Deckschieber genügend Halt bekamen und nicht gleich wieder herausgedrückt wurden oder seitlich abrutschten.

5.6.3 Druckprobleme

Der neue 3D-Drucker führte die Z-Achsenbewegungen nicht gleichmässig aus, dies stellte ein weiteres Problem dar, weil dadurch viele Teile Risse bekamen, dies wiederum beeinflusste die Festigkeit zusätzlich negativ.

Das grosse Druckbett (50x50 cm), bedingt grössere Abstände der Führungsstangen, was die unregelmässigen Bewegungen sicherlich begünstigt. Zudem enthielt der Bausatz des 3D-Druckers aussergewöhnlich kurze Linearlager enthalten hatte (30 mm lang für 12 mm Stangendurchmesser), welche auch zu Unstetigkeiten der Bewegung führten, da sie viel schneller verkeilen und während des Drucks zu sprung-



Abb. 15: Risse in der Aussenhülle des Stator-Gehäuses.

haften Z-Bewegungen führen. Dies wiederum beeinträchtigt die Schichthaftung, weil sich der extrudierte Kunststoff unzureichend oder überhaupt nicht mit dem restlichen Druck verbindet. Da die Objekthaftung auf der innovativen, beheizten Fiberglasplatte nahezu perfekt ist, gibt es zwar kein Warping, jedoch erhöhte Kräfte innerhalb des Drucks, sobald die oberen Schichten grosser Objekte zu schnell abkühlen. Durch solche Spannungen im Druckobjekt, die beim Erhärten und Zusammenziehen des Kunststoffs entstehen, können sich Risse und Spalte bilden. Folge dessen experimentierte ich bei weiteren Drucken mit erhöhten Extrusions- und Druckbetttemperaturen, sowie mit geminderter Kühlung, um eine möglichst gleichmässige Abkühlung und eine bessere Schichthaftung zu erreichen. Dennoch gelang es mir nie grössere Teile vollständig, ohne Risse zu drucken. Denn die Wirkung des beheizten Druckbetts hat ab einer bestimmten Höhe kaum noch Einfluss. Zudem beträgt die Druckzeit bei solchen Objekten mehrere Tage, wodurch sich die Umgebungstemperatur von Tag zu Nacht verändert und die Effizienz der Objektkühlung entsprechend beeinflusst. Denn die Ventilatoren kühlen, unabhängig von der Umgebungstemperatur mit derselben Luftmenge. Als Anmerkung, die 3D-Drucker stehen in einem unbeheizten Gartenhaus, um nachts den unangenehmen Geräuschpegel im Haus zu umgehen, deswegen unterliegt der Druckprozess den erwähnten Temperaturschwankungen.

5.6.4 Wicklungen einlegen und Inbetriebnahme

Zu Beginn der Sommerferien (29.06.19) war dann alles Material für Modell 1.1 bereit. In das zuvor mit einem Dremel, zur Platzvergrößerung ausgefräste Stator-Gehäuse, mit eingebautem Statorpaket aus PLA, konnten nun die Spulen aus 0.6 mm dickem Kupferlackdraht eingelegt werden. Das Einlegen, ging den Verhältnissen, mit mangelndem Platz und zu breiten Nuten-

Schlitzten, entsprechend gut. Es dauerte jedoch dennoch fast einen Tag, bis ich die gesamte Wicklung sauber eingelegt und die Spulen der einzelnen Phasen gegeneinander isoliert hatte. Für mein erste Mal, die gesamte Statorwicklung selbständig einzulegen, lief alles recht gut. Nach einigen Platzoptimierungen, um letztendlich den Rotor problemlos einschieben zu können, mussten die einzelnen Spulen noch in Serie geschaltet und die Ein- und Ausgangslitzen, zur Verschaltung, zum Anschlussgehäuse gezogen werden. Als alle Drähte richtig zusammenge­lötet waren, wurden alle offenen Leiterenden zusätzlich mit Röhrchen isoliert, um allfällige Kurzschlüsse zu vermeiden.

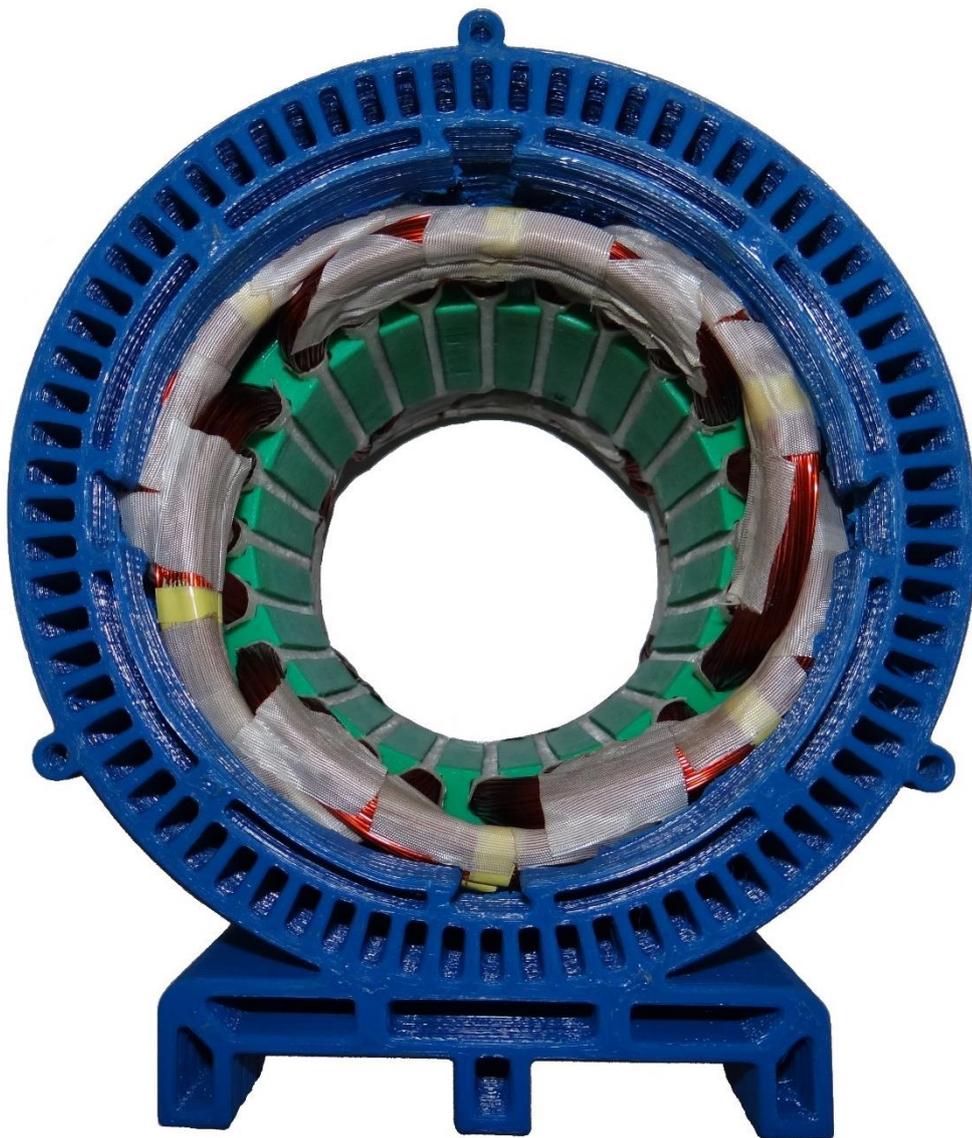


Abb. 16: Fertige Wicklung des Statorpakets von Modell 1.1.

Zur Überprüfung des Drehfelds wurde Modell 1.1 an den Frequenzumrichter angeschlossen und ein kleiner Rotor eines Asynchronmotors entlang der Wicklung geführt. Schon nach einigen Sekunden Betrieb fiel mir eine starke Wärmeentwicklung auf. Mir war nach dem sofortigen

Stopp erst nicht klar, warum sich die Wicklungen so stark erhitzen. Später erfuhr ich, dass ohne den eingebauten Rotor kein Gegen-EMK entsteht und somit die gesamte elektrische Leistung in Wärme umgesetzt wird. Das ohne den permanent erregten Rotor nur eine sehr gering Prüfspannung verwendet werden darf, bestätigte mir auch Herr Hügi. Hierbei wirkt verstärkend, dass bei einem Leiter mit steigender Temperatur der Widerstand sinkt und die Stromstärke, bei gleichbleibender Spannung, erhöht wird. Es entwickelt sich somit noch mehr Wärme.

Bei den ersten sehr kurzen Testläufen wurde die Scheitelspannung auf 110 Volt gesenkt und Frequenzen unter 25 Hz verwendet. Durch ein kurzzeitiges Erhöhen der Frequenz bis auf 50 Hz streifte der Rotor am Stator. Die resultierende Reibungswärme brachte die sehr dünne (<0.4 mm) Rotor-Hülle an gewissen Stellen zum Schmelzen. Das flüssige Plastik verklebte den Rotor mit dem Statorpaket. Gründe hierfür sind, dass der Rotor und der Stator nicht vollständig rund sind und durch die erhöhte Frequenz sicherlich auch die kleinen Unwuchten zum Tragen kamen. So war klar für Modell 1.2 mussten jegliche Teile noch einmal neu gedruckt werden, da jetzt auch der erste Rotor unbrauchbar geworden war. Die Magnete wurden wegen der fehlenden Schutzschicht nicht mehr im Rotor festgehalten. Genauer gesagt schossen die Magneten teilweise sogar heraus, da jeder der 40 Magneten eine Kraft von fast 100 N hat und diese sich durch die Anordnung im Rotor alle untereinander abstossen.

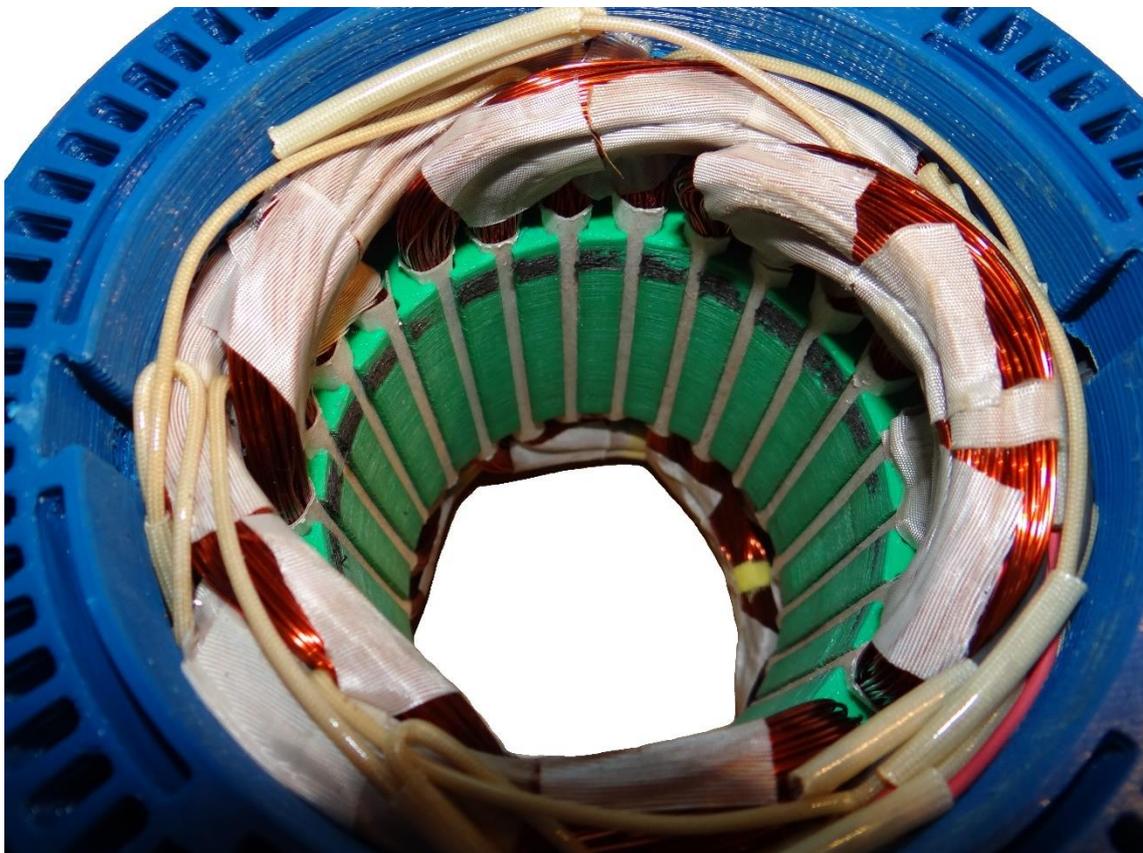


Abb. 17: Mit Plastik vom Rotor verklebter Stator.

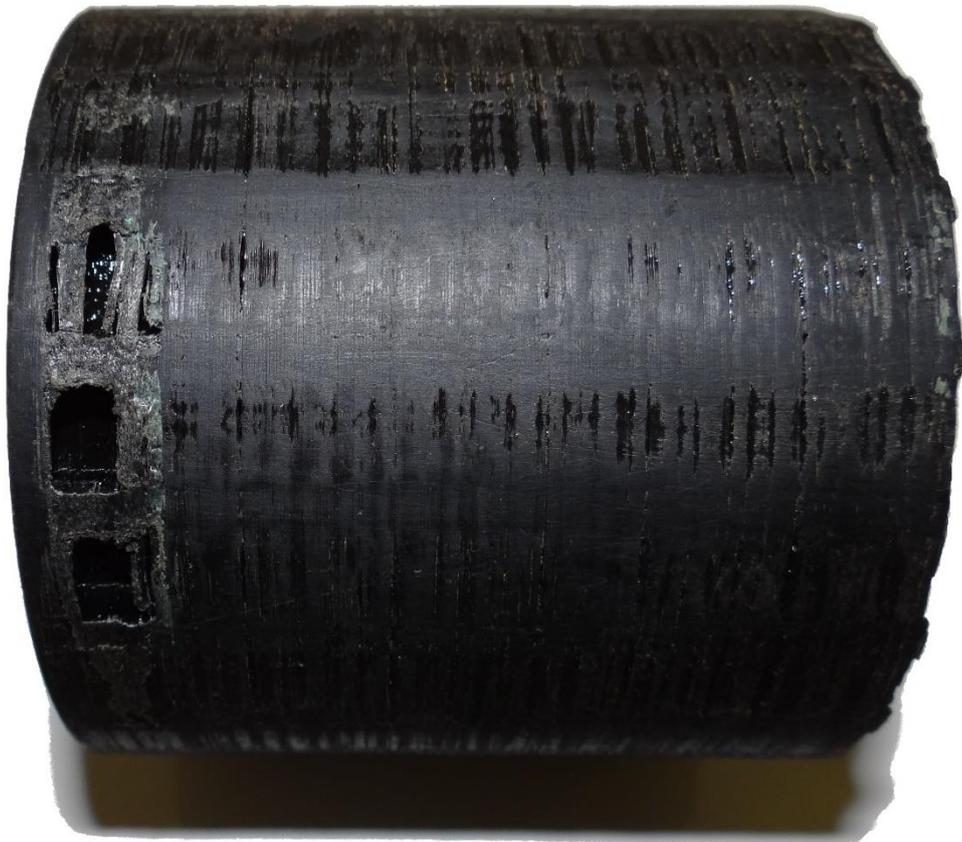


Abb. 18: Beschädigter Rotor.

Um die Welle und die Magneten des defekten Rotors weiterhin verwenden zu können, musste ich die Lager von der Welle abziehen. Wobei das Anbringen zuvor einiges einfacher gewesen war, da nun der Rotor im Weg stand. Um die Kugellager schonend zu entfernen, musste dieser erst kompliziert auf eine Seite geschlagen werden. Nun konnte ein Lager auf dem Schraubstock aufgelegt und die Welle heraus gehämmert werden. Professionelles Werkzeug, wie ein Abzug wäre in dieser Situation sicherlich hilfreich gewesen. Durch die Vibrationen wurde die dünne, brüchige Aussenwand rissig und die Magneten schossen plötzlich, wegen der starken Abstossung untereinander, heraus. Dabei zerstörten sich die starken Neodym Magnete teilweise selbst, da sie mit hoher Geschwindigkeit gegeneinanderstiessen oder an die Wand prallten.

5.7 Modell 1.2

5.7.1 CAD-Konstruktion

Bei den Verbesserungen der CAD-Dateien wurde der Gesamtdurchmesser und die Gesamtlänge vergrößert, um allgemein mehr Platz zu schaffen. Bei Version 1.2 wurden gleich auch noch die ursprünglich vorgesehenen, dickeren Kupferdrähte (0.67 mm + Isolierlack) berücksichtigt. Um das Anschlussgehäuse anwendungsfreundlicher zu gestalten, wurde auch dieses vergrößert. Auch die dünneren Nuten-Schlitze und die Gewindekanäle zur Befestigung der Seitenwände wurden ergänzt. Da es nötig war wieder dickere Aussenwände zu drucken, mussten beim Stator-Gehäuse weitere Materialeinsparungen gemacht werden, um die Druckzeit nicht weit über 100 Stunden heraus schreiten zu lassen. Dementsprechend wurde die Anzahl Kühlrippen verringert, da diese aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen sowieso nicht effektiv kühlen. Sie dienen lediglich der Optik und Stabilität, welche auch bei weniger als der Hälfte der Rippen noch gewährleistet ist. Zudem wurden im Innern mehrere Ausparungen gemacht, um mehr Platz für die Windungen zu schaffen und zusätzlich kann so noch Luft von aussen direkt zu den Windungen gelangen. So kann eine bessere Kühlung des Motors gewährleistet werden. Er ist zwar dadurch auf keine Weise mehr wasserdicht, was mir bei einem Prototyp dieser Art jedoch nicht notwendig erschien.

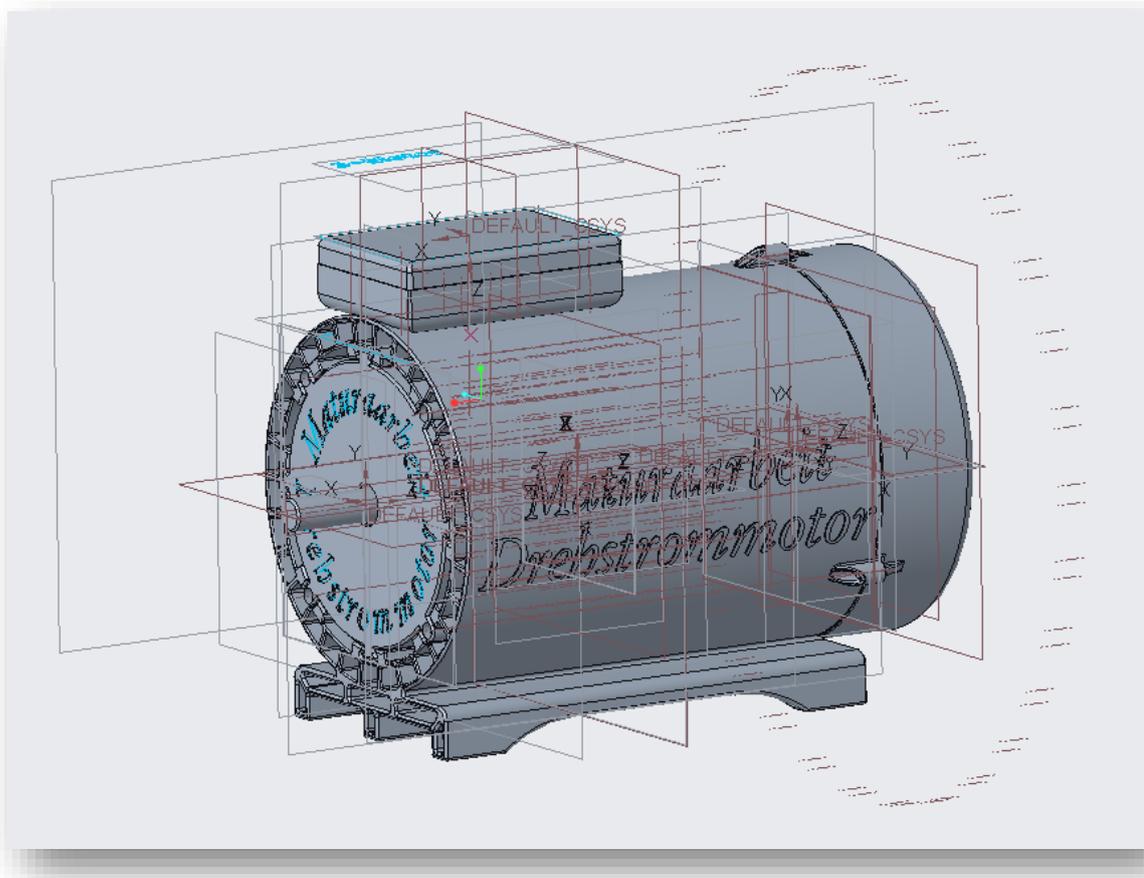


Abb. 19: Konstruktion von Modell 1.2.

5.7.2 Reparatur FLSUN Drucker

Das neue Mainboard für den FLSUN (Marke des kleineren 3D-Druckers) Drucker war inzwischen auch gekommen. Und da dieser meines Wissens nach recht genau druckte und ein weiterer Drucker, für das schnelle fertigstellen von Modell 1.2 hilfreich sein kann, nahm ich mir vor, ihn zu reparieren. Als dieser Drucker neu war, sollte er Dual-Druck-fähig sein, was softwaretechnisch jedoch nach vielen Versuchen unmöglich erschien. So hatte ich ihn bis anhin auf Single-Extruder umgerüstet verwendet. Gerne hätte ich die Möglichkeit genutzt mit zwei verschiedenen Farben respektive Materialien gleichzeitig zu drucken. Deswegen nahm ich mir vor, es mit dem neuen Mainboard ein zweites Mal zu versuchen, die passende Software für den Dual-Druck zu installieren. Als das alte Board entfernt und die vielen Kabel provisorisch an das neue angeschlossen waren, installierte ich die mitgelieferte Software für den Chimera Dual-Druck. Beim Versuch den Drucker so in Betrieb zu nehmen traten die mir bereits bekannten Fehler auf, dass jegliche Komponenten für die zweite Farbe nicht angesteuert werden konnten. Es blieb nichts anderes übrig, als jegliche Sensoren und elektrisch funktionelle Komponenten einzeln auf Defekte und Fehlfunktionen zu überprüfen. Dazu musste ein grosser Teil der Verkabelung gelöst werden, um die Anschlüsse eindeutig den jeweiligen elektrischen Elementen zuzuordnen. Verschiedene Versuche, mithilfe der Steuerungssoftware Repetier Host, sollten potenzielle Problemursachen identifizieren. Beispielsweise kann, durch einen bestimmten Programmcode, eine Abfrage des momentanen Zustands von Temperatur- oder Endstop-Sensoren ausgelöst werden. Da ich aber nichts Eindeutiges finden konnte, versuchte ich es mit einer anderen Konfigurationsdatei. Nach langer Suche fand ich, auf dem Internet, unter einigen anderen, unbrauchbaren Dateien eine passende, die zur erfolgreichen Konfiguration der Software genutzt werden kann. Nach vollendeter Softwareinstallation und der kompletten mechanischen Umrüstung des 3D-Druckers von Single auf Dual-Extruder, mussten nur noch sämtliche Kabel an der richtigen Stelle angeschlossen und neu verkabelt werden. Als auch das letzte Kabel sauber verstaubt und beschriftet war, konnte mit der Inbetriebnahme des Druckers begonnen werden.

Bei der Funktionsüberprüfung der Endstopp-Begrenzer stellte ich fest, dass bei der Nivellierung der z-Achse der zugehörige Sensor nicht aktiviert wurde. Dieser Fehler war zuvor aus unerklärlichen Gründen auch schon aufgetreten. Egal ob ein Sensor für die manuelle Nivellierung oder ein induktiver Autonivellierungssensor angeschlossen war, die Druckplattform wurde unbegrenzt angehoben. Somit konnte der Fehler nur noch in der Software liegen. Jedoch war diese halbwegs funktionierende Konfigurationsdatei höchst wahrscheinlich die einzige, die mir zur Verfügung stand, da es im Internet nur sehr wenig entsprechende Angebote gab. Deswegen entschied ich mich, die vorhandene Datei selbst umzuprogrammieren. Mit dem passenden Programm Arduino (Version 1.8.1) durchsuchte ich dann die unzähligen Zeilen der verschiedenen Softwaredateien, bis schliesslich der zugehörige Befehl auffindig gemacht werden konnte. Da dieser ein # vorangestellt hatte, wurde er vom Mainboard als Text interpretiert und darum funktionierte der gesamte Druckprozess nicht mehr. Nach dem Entfernen des # funktionierte die abermals installierte Druck-Software nahezu einwandfrei. Ein letzter Fehler, den ich noch auffindig machen konnte war der vorprogrammierte Abstand der zwei Druckdüsen, des Chimera

Druckkopfs. Nach dem richtigen Einstellen dieser Distanz, konnte auch dieser Drucker für die Herstellung der Motorteile genutzt werden. Jedoch hatte mich dieses Unterfangen ganze drei Tage gekostet, alles in allem hat es sich aber dennoch gelohnt.

5.7.3 Teile fertigen

Während den folgenden zwei Wochen war ich grösstenteils damit beschäftigt, alle Teile von Modell 1.2 mit den beiden 3D-Druckern auszudrucken.

Nach dem etwas vergrösserten Kühlungspropeller und dessen Abdeckung, wurde der Rotor gedruckt. Um die Magnete in der Richtung parallel zur Drehachse auf eine saubere Art und Weise festzuhalten, fertigte ich dieses Mal zusätzlich eine passende Abdeckscheibe. Im Nachhinein musste ich leider feststellen, dass es mindestens ebenso aufwendig ist, wenn alle Magneten auf einmal im Rotor platziert und festgehalten werden müssen, wie wenn jede Nut einzeln mit Magneten bestückt und danach mit dem 3D-Druckstift zugeklebt wird. Nach dem komplizierten Aufbringen der Scheibe konnte diese nur mit mehreren Schraubzwingen festgehalten werden, um sie so mit den 3D-Druckstift am Rotor festzukleben. Die Hülle dieses zweiten Rotors war doppelt so dick eingeplant, damit sie auf der Drehbank problemlos rund gedrechselt werden konnte. Um sicher zu gehen, dass die «Schweissnaht» zwischen Abdeckscheibe und Rotor nicht reisst, fertigte ich Gewindestangen an, mithilfe derer die Abdeckscheibe und der Rotor zusammengezogen wurden. Nachdem der Rotor rundgedrechselt und glatt geworden war, erhitze ich die «Schweissnaht» ein weiteres Mal, um sicher zu gehen, dass sie dem Druck der Magneten standhält. Nach dem Abschleifen hervorstehender Plastikerhöhungen und dem Polieren der gesamten Rotor-Hülle konnten die Gewindestangen letztlich entfernt werden.

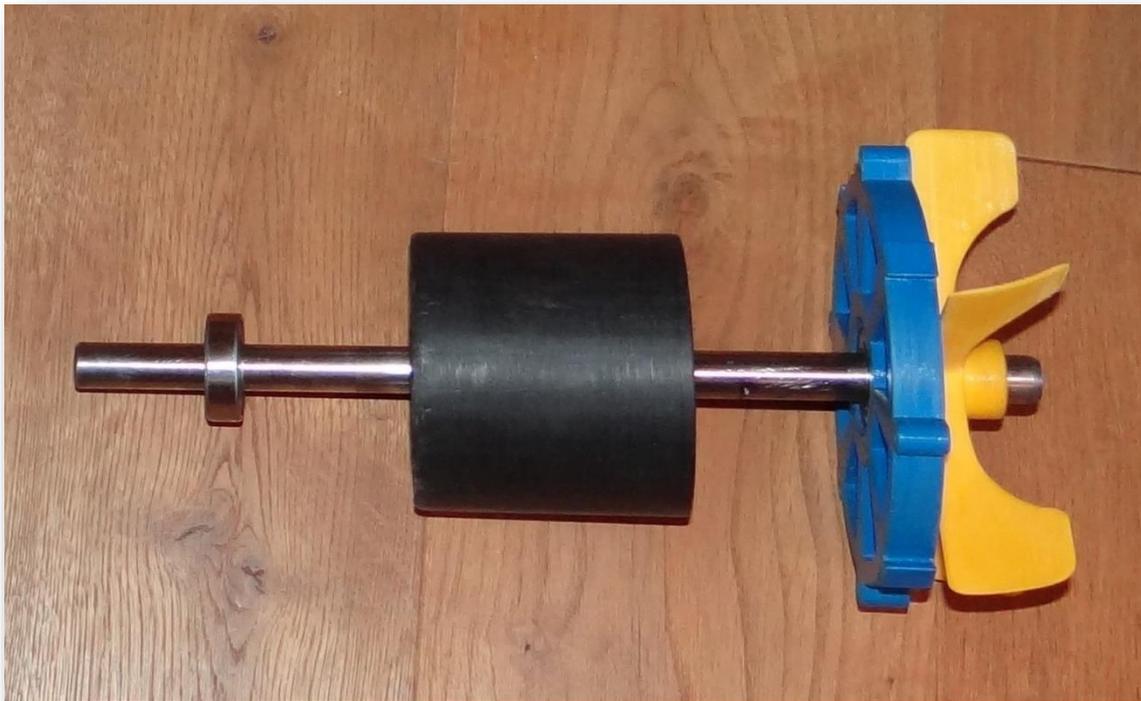


Abb. 20: Mit Kugellagern, Rotor, Seitenwand und Propeller bestückte Welle.

Sobald mir die Chimera Drucktechnik einigermaßen vertraut war, konnte die zweifarbige Lagerwand 2.1 begonnen werden. Nebenbei behielt ich immer auch noch ein Auge auf den laufenden Druck des zweiten Stators. Bei dieser Version des Stator-Gehäuses, fiel meine Entscheidung auf ein Spezialfilament, da Material gespart werden musste, um die Druckzeit zu verringern. Und dennoch sollten die hohen Ansprüche an die Stabilität, besser eingehalten werden. Nur war das gesamte Gehäuse der Version 1.2 auch noch um einiges grösser. Das genannte Spezialmaterial war ein faserverstärktes PLA, welches speziell für technische Anwendungen mit hohen Ansprüchen auf Zug-, Schlag- und Bruchfestigkeit entwickelt wurde. Zudem ist bei dieser Kunststoffzusammensetzung die Schichthaftung verbessert und die Schrumpfung verringert worden. Diese beiden Eigenschaften sind ideal für das Drucken grosser Objekte. Auch für die Nachbearbeitung (Schleifen, Fräsen, Gewinde schneiden) der fertigggedruckten Teile wurde dieses Material speziell optimiert.



Abb. 21: Nachbearbeitetes Stator-Gehäuse von Modell 1.2.

Sobald der Stator fertiggestellt war, konnte der grössere Drucker auf das nächste Spezialfilament umgerüstet werden. Der Stator von Motor 1.2 sollte nämlich mit dem magnetischen Iron PLA gedruckt werden. Da das enthaltene Eisenpulver abrasiv wirkt, ersetzte ich die Messingdüse durch eine entsprechende Edelstahldruckdüse, mit demselben Durchmesser von 0.4 mm. Beim Versuch die Lagerwand 2.1 in den fertigen Stator einzusetzen musste ich jedoch eine weitere Unannehmlichkeit feststellen, dass diese um 1–2 mm zu gross war. Grund dieser Abweichung war, dass die Software des älteren FLSUN Druckers den Schrumpfungsfaktor (Druckobjekte verkleinern sich beim Abkühlen und Erhärten des Kunststoffes) des Plastiks besser berücksichtigt, als die des neueren Tronxy Druckers. So gesehen war die Lagerwand eigentlich gar nicht zu gross, sondern das Stator-Gehäuse kleiner als in den CAD-Dateien vorgesehen. Da die schon mit Spezialfilament gedruckten Teile einiges mehr an Zeit und Geld beansprucht hatten, war es sinnvoller noch zwei weitere, kleinere Lagerwände 2.2 und 2.3 zu drucken.

5.7.4 Wickeln Motor 1.2

Mit dem Geschäftsführer der Fribat hatte ich nach Fertigstellung aller Teile des Motors 1.2, einen weiteren Termin festgelegt, um die Statorwicklungen zu fertigen. So ging ich am Morgen des 15.07.19 mit dem Stator zur Elektrowicklerei Fribat nach Schötz. Da der Stator dieses Mal mit eisenhaltigem Filament gedruckt wurde, mussten wir die Nuten sicherheitshalber isolieren,

um einen Kurzschluss zwischen den einzelnen Phasen zu verhindern. Die Deckschieber bestehen, wie auch das «Isolationspapier» aus einem hitzebeständigen, reissfesten Polyester und müssen aus Meterstücken auf die passende Länge zugeschnitten werden. Nach dem zuschneiden von genügend faserverstärkten Isolations-Streifen in der richtigen Breite und Länge, konnte ich diese mit einer Abkantmaschine zu U-förmigen Profilen weiterverarbeiten.

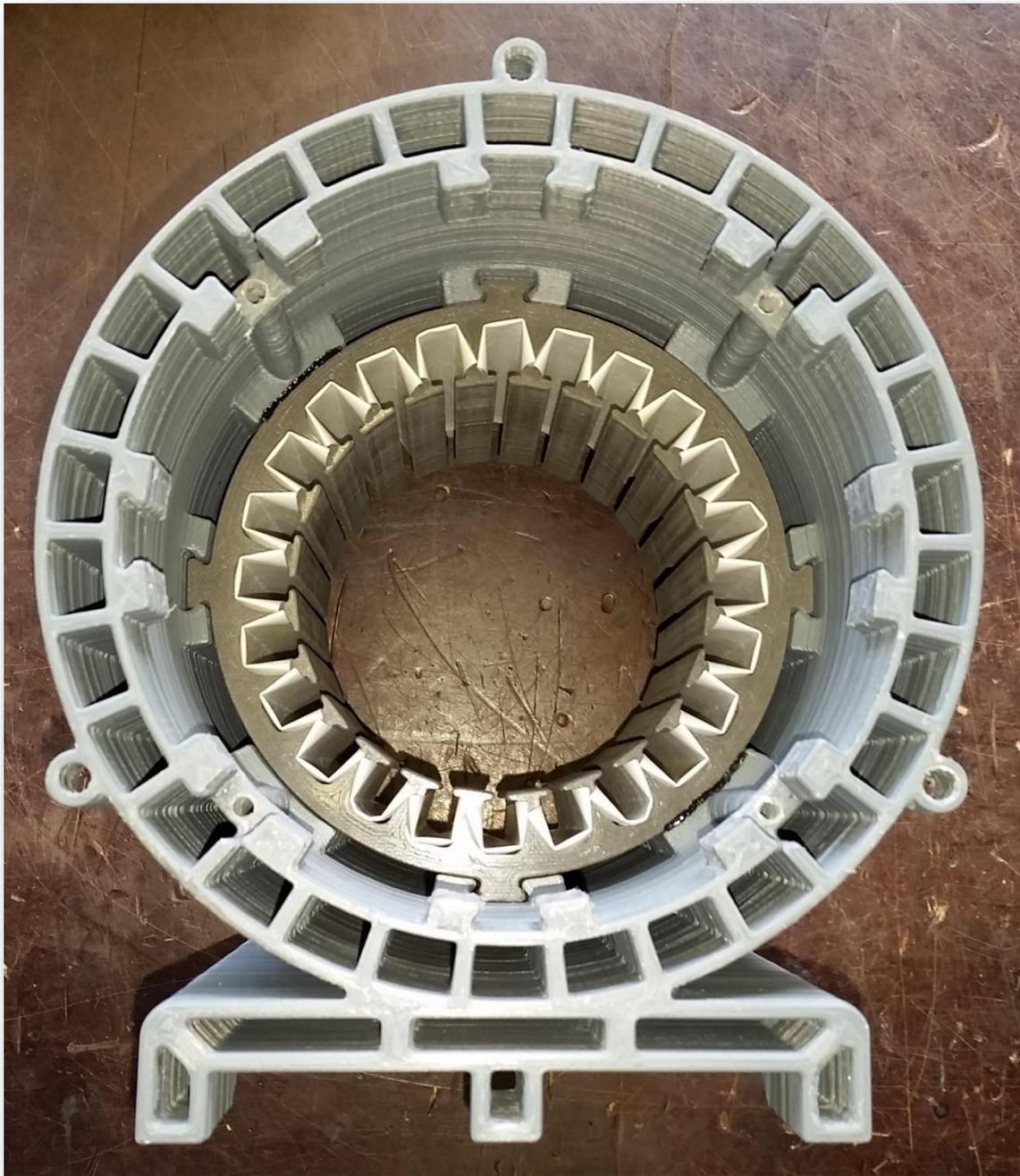


Abb. 22: Isolierter Stator 1.2 vor dem Wickeln.

Als die Isolation ins Statorpaket eingebracht war, konnten wir die Wickelmaschine auf die gewünschten Windungslängen der Zwillingspulen einstellen. Nun durfte ich zum ersten Mal auch die Maschine bedienen und die sechs Spulen für den Motor 1.2 selber wickeln. Das Einlegen der Wicklungen verlief, wegen der deutlich besseren Platzverhältnisse, sehr gut. So hatten die vorgesehenen 105 Windungen pro Nut, bei einem Durchmesser des Kupferlackdrahts von 0.67 mm, und der zusätzlichen Isolation problemlos Platz.



Abb. 23: Einlegen der Kupferlackwicklung in das mit Iron-PLA gedruckte Statorpaket.

Am Nachmittag konnte ich den fertig verschalteten Stator mit nach Hause nehmen. Jegliches Material für Modell 1.1 und 1.2 wurde mir von der Fribat grosszügigerweise kostenlos zur Verfügung gestellt, deshalb möchte ich mich schon an dieser Stelle herzlich bei Herr Petermann und dem Mitarbeiterteam für die freundliche und engagierte Unterstützung bedanken.

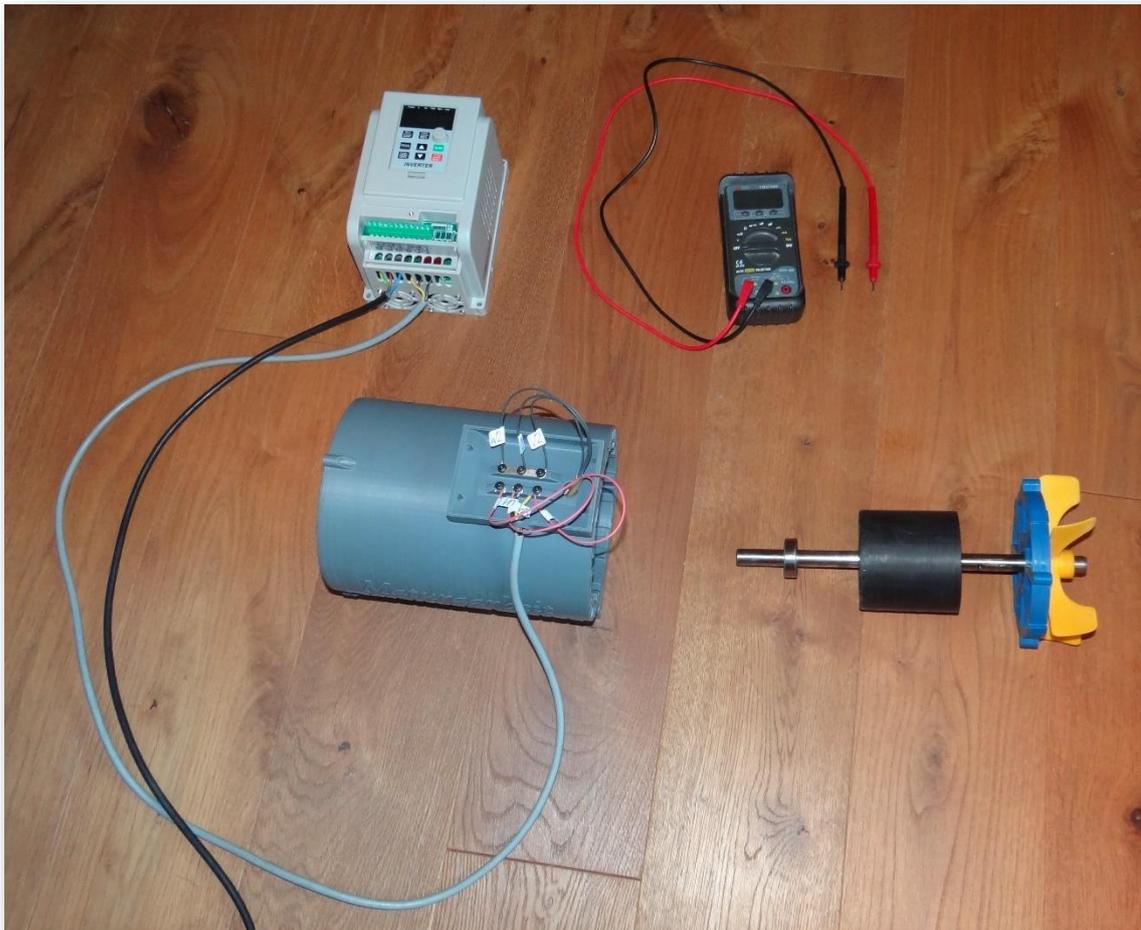


Abb. 24: Verschalteter Motor 1.2, an Frequenzumrichter angeschlossen und oben rechts Multimeter für Messungen.

5.7.5 Inbetriebnahme Motor 1.2

Um die Wicklung genug weit nach aussen zu drücken, damit danach der Rotor spielend eingebaut werden kann, können zwei konische Holzstücke vorsichtig von beiden Seiten her hineingedrückt werden. Die Fribat hatte jedoch keine Holzklötze in der passenden Grösse, also schnitt ich zuhause zwei Stücke in der gewünschten Form zu. In einem zweiten Schritt wurden die beiden Teile bei meinem Grossvater auf der Drehbank, in die gewünschte konische Form mit glatten Oberflächen, gedreht.



Abb. 25: Konische Holzklötze, um die Wicklung in Form zu drücken.

Vor dem Anschliessen an den Frequenzumrichter, mussten die einzelnen Drähte noch richtig den drei Phasen zugewiesen werden, um ein Drehen in die falsche Richtung oder gar eine Fehlfunktion zu vermeiden. Erfreulicherweise funktionierte das Modell 1.2 beim ersten Versuch einwandfrei.

Auf das Problem mit der Erhitzung der Wicklungen, musste allerdings auch bei diesem Motor noch Acht gegeben werden.

5.8 Abdeckungen der Anschlussgehäuse

Die beiden Deckel, für die Anschlussgehäuse, dienen der Sicherheit, damit die Phasendrähte und deren Verschaltung nicht offen liegt. Da es aber vorgesehen war das Typenschild auf deren Oberfläche zu integrieren, konnten diese Teile erst gegen Ende der praktischen Arbeit konstruiert und gedruckt werden, da zuvor die entsprechenden technischen Daten nicht bekannt waren. Die Buchstaben und Zahlen wurden bei beiden Schildern direkt mit einer zweiten Farbe gedruckt, was mich vor noch unbekannte Herausforderungen stellte.

Denn bei den zweifarbigem Seitenwänden wurde ein Negativ der Buchstaben gedruckt und danach mit einer anderen Farbe als Hintergrund überdruckt. Diese Variante ist einfacher in der praktischen Umsetzung, erfordert jedoch eine bestimmte Breite der dünnsten Linien, da die Hintergrundfarbe sonst fast vollkommen abgedeckt wird.

Um alle wichtigen technischen Informationen auf dem Typenschild drucken zu können, mussten teilweise sehr kleine Flächen (<1 mm breit) gezeichnet werden. Da auch das Logo der Fribat noch dazu kam, erwies sich schon die Konstruktion geeigneter Dateien als recht aufwendig. Zudem müssen Beschriftungen bei diesem Vorgehen in beiden CAD-Dateien erstellt werden, einmal als Negativ und ein zweites Mal bei der Füllung, für die zweite Farbe.

Beim ersten Druckversuch stellte sich heraus, dass die bekannten Probleme (Die Hauptfarbe

bedeckt fast den gesamten Druckbereich, wegen kleiner Schrift und verhindert so ein klares erscheinen der Schriftfarbe) auch hier auftreten, da die Slicing-Software die Hauptfarbe zuerst drucken lässt, also das Negativ. So vertauschte ich die Farben des Filaments am Drucker und in den Dateien, damit die feinen Buchstaben zu aller erst aufgetragen werden und danach von der Grundfarbe umrandet werden.

5.9 Leistungsmessungen

5.9.1 Elektrische Leistung

Die zuvor unbekannt Funktion, der Displayumschaltung des Frequenzumrichters, erwies sich, bei der Messung der aufgenommenen elektrischen Leistung, als sehr praktisch, da während des Betriebs die momentane Stromstärke abgelesen werden kann.

Für folgende Versuche, zur Feststellung der aufgenommenen Leistung, wurde ein Modul zur Temperaturmessung ergänzt. Die verschiedenen Versuche ergaben, dass bei höheren Spannungen und Frequenzen eine exponentielle Erhitzung der Wicklung nicht zu verhindern ist. Das Anlaufdrehmoment ist zwar bei höherer Spannung besser und der Motor läuft dadurch auch selbständig an. Die resultierenden hohen Temperaturen sind ab 80 °C jedoch nicht mehr zulässig, für die Magneten, wie auch für alle PLA Teile, welche spätestens ab 150 °C zu schmelzen beginnen. Ganz besonders bei den starken Neodym Magneten, die spätestens ab 80 °C ihre Magnetisierung verlieren können, muss Acht gegeben werden. Der, im Verhältnis zu herkömmlichen Elektromotoren, grosse Luftspalt zwischen Rotor und Statorpaket garantiert zwar eine reibungslose Drehbewegung, senkt jedoch den Wirkungsgrad. Da die Intensität von Magnetfeldern bezüglich des Wirkungsabstands logarithmisch abnimmt, ist die Wechselwirkung des Drehfeldes im Stator, mit den Permanentmagneten im Rotor geschwächt. Somit kann der Motor nur ein abgeschwächtes Drehmoment erzeugen und die durch das Gegen-EMK verursachte Ausgleichsspannung kann nicht optimal aufgebaut werden. Diese fehlende Intensität der Wechselwirkung verursacht eine Umwandlung der aufgenommenen elektrischen Leistung zu Wärme (entsprechend der Wärmeentwicklung bei 5.2.6.4). Somit ist bei beiden Motoren, schon bei einem geringen Motorstrom, eine Temperaturzunahme zu verzeichnen.

5.9.2 Mechanische Leistung

Um den Wirkungsgrad $\cos \varphi$ eines Elektromotors zu bestimmen, muss man die mechanische Leistung messen und danach mit der elektrischen vergleichen. Da die Krätemessung bekanntlich aber nicht sehr einfach ist, musste zuerst eine geeignete Methode gefunden werden. Eine für Motoren oft verwendete Variante ist es, den Motor mit einem Generator zu koppeln, dessen Wirkungsgrad bekannt ist. Dementsprechend kann dann der Stromfluss beim Motor, mit dem generierte Strom des Generators, unter Berücksichtigung dessen schon bekannten Wirkungsgrades, verglichen werden, um so den gesuchten Wirkungsgrad, des zu prüfenden Motors zu

erhalten. Nun musste erst einmal ein passender Generator gefunden werden, der danach mechanisch mit dem Drehstrommotor gekoppelt werden kann.

Bei meinen ersten Überlegungen kam mir der E-Bike Motor, den ich von Herrn Hendriksen bekam, in den Sinn, worauf ich dessen Funktionsweise genauer untersuchte. Durch die spärlichen Informationen des Aufklebers war ersichtlich, dass die Betriebsspannung 36V Gleichstrom beträgt, die maximale Leistung bei 250W ist und die Drehzahl an der Achse 72 Umdrehungen pro Minute erreichen kann. Der Wirkungsgrad konnte nicht, wie anfänglich angenommen, durch die Produktnummer auf dem Internet ausfindig gemacht werden. Obwohl bei den Versuchen, den generierten Strom mit dem Multimeter zu messen, ein beträchtlicher Widerstand auf der Antriebswelle zu verspüren war, kam ich letztlich zum Schluss, dass das Verhältnis von Kraft und Strom nicht stimmen konnte. Gründe dafür könnten die mehrfache Übersetzung, von insgesamt 1:50.25 sein oder aber ein Bremswiderstand in der Elektronik.

Im Verlauf mehrerer Versuche dies zu realisieren, wurde mir klar, dass mit den beiden Motormodellen kaum möglich sein wird eine zuverlässige Messung durchzuführen. Denn einerseits sind die Gehäuse nicht dafür vorgesehen, um mit Schrauben in einem Versuchsaufbau befestigt zu werden und andererseits fehlte mir ein geeigneter Generator.

5.10 Schriftliche Arbeit

In den letzten zwei Wochen der Sommerferien war ich grösstenteils damit beschäftigt, die Arbeit schriftlich zu dokumentieren. Dabei konnte ich mich teilweise noch einmal intensiv mit bestimmten Teilthemen auseinandersetzen. Zusätzlich beschäftigte mich die Suche, Verbesserung und Erstellung geeigneter Bilder, der jeweiligen Arbeitsabschnitte.

Auch in den letzten zwei Monaten kamen noch zahlreiche Ergänzungen und Verbesserungen hinzu, bevor ich die gesamte Arbeit korrigieren lies und noch einmal komplett überarbeitete.

6 Ergebnis

Nach ungefähr 450 Arbeitsstunden und weiteren 400 Stunden Druckzeit der beiden 3D-Drucker, entstanden zwei leicht voneinander abweichende Elektromotoren und einige zusätzliche Teile.

Effektiv kann eigentlich nur der weiterentwickelte Motor betrieben werden, da ein zweiter Rotor fehlt. Denn für einen weiteren Rotor, würden wiederum Magneten und eine eigene Achse mit Kugellagern benötigt, welche die Kosten unnötig stark strapaziert hätten. Auch die Fertigung eines weiteren Rotors hätte einiges an Zeit in Anspruch genommen, da ein präzises Resultat nicht sehr einfach zu realisieren ist. Der Wechsel der gesamten Rotor-Einheit, kommt auch kaum infrage, da hierzu jedes Mal die Lagerpositionen auf der Achse geändert werden müssten, wegen der unterschiedlichen Längen der Motoren von Modell 1.1 und 1.2. Nur schon der Ein- und Ausbau, wie auch der leicht zu kleine Durchmesser des ersten Stators, sprechen gegen den mehrfachen Wechsel. Zudem steht mir auch nur ein Frequenzumrichter zur Verfügung und ein Betrieb zweier Motoren über denselben, könnte Probleme mit der Maximalleistung hervorrufen.

Letztendlich entstand also ein funktionsfähiger und optimierter Drehstrommotor, für die jeweils unvollendeten Zwischenmodelle, kamen während der einzelnen Schritte der Entwicklung einige Teilen hinzu. Die aufgenommene elektrische Leistung liegt bei Modell 1.2 über 2.2 kW, da der Wirkabstand von Stator und Rotor zu gross sind und somit viel elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird. Die zu schwache Interaktion der beiden Magnetfelder lässt sich durch den grossen, Luftspalt erklären. Die fehlenden Eisenhüllen um die Magneten und Kupferdrähte, vergrössern den Abstand für die Interaktion am wesentlichsten. Wie in der Arbeit beschrieben, ist die mechanische Wirkleistung sehr wahrscheinlich um einiges kleiner, wie oben erwähnt, konnte sie aber nicht eindeutig gemessen werden. Die Drehzahl liegt, entsprechend der Polpaarzahl Zwei, bei einer Frequenz von 50 Hz, theoretisch bei 1500 Umdrehungen/Minute. Praktisch liegt die Grenze jedoch bei ungefähr 750 Umdrehungen/Minute, da die mechanischen Ungleichheiten und verstärkte Wärmeentwicklung dem Motor entsprechend schaden würden. Die maximale Betriebsspannung beträgt bei Dreieckschaltung 230 V und bei Sternschaltung 400 V, kann jedoch durch den Frequenzumrichter spielend gesenkt werden, um der Überhitzung entgegenzuwirken. Die Gewichte der beiden Modelle liegen mit 3.7 und 4.5 kg deutlich unter denen herkömmlicher Motoren. Dementsprechend könnten solche Motoren, mit genügender Optimierung des Wirkungsgrades, vielseitig eingesetzt werden.



Abb. 26: Die wichtigsten Teile, als Ergebnis der Maturaarbeit Drehstrommotor aus dem 3D-Drucker.

6.1 Diskussion

Das Endresultat von Modell 1.2 entspricht zwar nun den Vorstellungen von ganz am Anfang, der Weg dorthin war jedoch auf keinen Fall so vorgesehen. So war es mein Ziel den Motor in weniger als der Hälfte der Zeit zu fertigen und den Rest für Theorie und Messungen zu verwenden. Nun dauerte aber die Planung und Dimensionierung schon einiges länger als vorgesehen und das Drucken aller letztlich benötigten Teile, nahm fast fünfmal mehr Zeit in Anspruch, als im Zeitplan einkalkuliert war. Auch die Probleme mit der Ungenauigkeit kamen unvorhergesehen, da ich anfänglich mit einer höheren Genauigkeit der 3D-gedruckten Teile gerechnet hatte. Die Wicklung des fertigen Motors ist letztlich aber um einiges professioneller gelungen, da die Elektrowicklerei Fribat entsprechende Unterstützung leistete.

Während zahlreichen Recherchen, für die Planung und Dimensionierung, fand ich mehrere Artikel und Dokumente, die im Zusammenhang mit meinem Projekt stehen. Unter anderem die Artikel «Forscher entwickeln direktgekühlten E-Motor aus Kunststoff» (Konstruktionspraxis, 2019) und «Forscher drucken erstmals kompletten Elektromotor» (Konstruktionspraxis, 2019), welche sich mit ähnlichen Problematiken auseinandersetzen, wie die meiner Maturaarbeit. Auch das Informationsdokument der Maxon Motor AG «Gleichstrommotor mit eisenloser Wicklung» (Maxon, 2019) befasst sich, theoretisch gesehen, mit vergleichbaren Änderungen

herkömmlicher Elektromotoren. Dies zeigt, dass die Thematik meiner Arbeit nicht eine vollkommen neue ist. Obwohl mir bei den ersten, oberflächlichen Recherchen Ende 2018 keine wesentlichen Informationen, entsprechend meiner Idee gefunden, zuhandenkamen. Dennoch sind und werden Forschungen und Entwicklungen auf diesem Gebiet immer bedeutender. Da man einerseits mit einer Zunahme des Luftverkehrs rechnen kann, für dessen Luftfahrzeuge leichte und effiziente Motoren fundamental sind. Andererseits sind neue, dezentrale Produktionsverfahren, wie auch die Additive-Fertigung zukünftig sehr wichtig für eine individuelle, kostengünstige Herstellung.

6.2 Reflexion

Abschliessend möchte ich noch kurz meine Sicht auf den Prozess und die Resultate erläutern. Zu Beginn meiner Arbeit, die letztlich fast ein Jahr lang andauerte, war mir noch sehr wenig über die Elektrotechnik bekannt. Denn zuvor hatte ich mich nie bis ins Detail mit den Gesetzmässigkeiten der Elektrizitätslehre beschäftigt. Der praktische Anwendungsbereich der Motorentechnik war für mich komplettes Neuland. Einzig im Bereich des 3D-Drucks, hatte ich vorher bereits einige Erfahrungen gesammelt. Dennoch konnte ich auch diesbezüglich noch sehr viel dazulernen, wie es in der vorliegenden Arbeit genauer beschrieben ist. Jedoch durfte ich während der gesamten Entwicklung und Optimierung der Motoren viele nützliche Erfahrungen sammeln. Angefangen bei den physikalischen Grundlagen elektrischer Felder, bis hin zur praktischen Umsetzung eines Drehstrommotors, war es immer sehr spannend. Die Fribat ermöglichte mir den einzigartigen Einblick in die Wicklungstechnik und die Herstellung von Industriemotoren. Alles in allem hatte ich so viele, spannende Stunden für die Umsetzung meines Projekts verbracht und dabei viel Knowhow für meinen zukünftigen Werdegang erarbeitet. Somit ist die Arbeit für mich ein voller Erfolg und ich kann jedem empfehlen, ein interessantes Thema auszusuchen, um ambitioniert eine zufriedenstellende Arbeit zu erstellen.

7 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung/Variable	Beschreibung
Deckschieber	Verhindert, dass die einzelnen Kupferdrähte aus den Nuten entgleiten und so den Rotor behindern würden.
FDM	Fused Deposition Modeling
Filament	Plastik für den 3D-Druck, in Form eines dünnen (1.75 oder 3 mm), bis zu mehrere hundert Meter langen Strangs auf Spulen gewickelt. Die Zusammensetzungen des Kunstoffs können den Bedürfnissen entsprechend gewählt werden.
G-Code	Dateiendung oder Befehlsform, welche die einzelnen Komponenten des 3D-Druckers ansteuert.
Gegen-EMK	Die sogenannte Gegen Elektromotorische Kraft, begrenzt die Drehzahl von Elektromotoren, indem eine der Betriebsspannung entgegengesetzte Induktionsspannung den vollen Stromfluss verhindert.
Hz	Herz, Einheit für Frequenzen, ein Hz entspricht einem Vorgang pro Sekunde.
kW	Kilowatt, Einheit für Leistung
SLA	Stereolithografie, Abkürzung kommt vom englischen «stereolithography apparatus» und bedeutet Stereolithografie Gerät. (Wikipedia, 2019)
Slicing	Heisst so viel, wie in Scheiben aufteilen. In Bezug auf den 3D-Druck ist gemeint, dass die geforderten Bewegungen, des Druckkopfs, auf den einzelnen Druckhöhen errechnet werden.
SLS	Selektives Laser-Sintern
STL	Stereo Lithographie/Standard Triangulation Language (Wikipedia, 2019)
V	Volt, Einheit für Spannung
Warping	Verzug und daraus resultierendes Ablösen von der Druckplatte.
Zwillingspule	Wird verwendet, um den Strom derselben Phase in zwei nebeneinander liegenden Nuten verteilt fliessen zu lassen. Dadurch wird ein gleichmässigeres Feld erzeugt. Das heisst es gibt eine äussere und eine passende innere Spule, die kleiner ist.

8 Quellenverzeichnis

(Stand 08.10.2019)

- (7. 8 2019). Von formlabs: <https://formlabs.com/de/blog/3D-drucktechnologie-vergleich-fdm-sla-sls/> abgerufen
- (7. 8 2019). Von 3D-Printerstore.ch: https://www.3d-printerstore.ch/3D-Filament-Resin/3D-Filament-1-75-mm:::49_51.html abgerufen
- (8. 8 2019). Von Götz Ingenieurbüro: <http://www.goetz-automation.de/Schrittmotor/SchrittmotorEMK.htm> abgerufen
- Chua Chee Kai, G. G. (9. 8 2019). *Wikipedia*. Von STL-Schnittstelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/STL-Schnittstelle> abgerufen
- Grehn, J., & Krause, J. (2007). Bewegte Ladungsträger und magnetisches Feld. In J. Gomoletz, J. Grehn, J. Krause, G. Peters, D. H. Schmidt, & D. H. Schwarze, *Metzler Physik* (S. 230-271). Braunschweig: Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH.
- Grehn, J., & Krause, J. (2007). Elektrische Ladung und Elektrisches Feld. In J. Gomoletz, J. Grehn, J. Krause, G. Peters, D. K. Schmidt, & D. Schwarze, *Metzler Physik* (S. 186-229). Braunschweig: Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH.
- Grehn, J., & Krause, J. (2007). Elektromagnetische Schwingungen und Wellen. In J. Gomoletz, J. Grehn, J. Krause, G. Peters, D. H. Schmidt, & D. H. Schwarze, *Metzler Physik* (S. 272-339). Braunschweig: Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH.
- Juschkat, K. (20. 09 2019). *Konstruktionspraxis*. Von Forscher entwickeln direktgekühlten E-Motor aus Kunststoff: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/forscher-entwickeln-direktgekuehlten-e-motor-aus-kunststoff-a-796239/> abgerufen
- Juschkat, K. (20. 09 2019). *Konstruktionspraxis*. Von Forscher drucken erstmals kompletten Elektromotor: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/forscher-drucken-erstmal-kompletten-elektromotor-a-695730/> abgerufen
- Motor, M. (20. 09 2019). *Maxon*. Von maxon DC und EC Motoren: https://www.maxongroup.ch/medias/sys_master/root/8803449896990/maxonDCmotor-Notizen.pdf?attachment=true abgerufen
- Ratgeber&Beratung, C. (3. 10 2019). *Conrad*. Von Elektromotoren > Aufbau, Funktionsweise und Arten einfach erklärt: <https://www.conrad.ch/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/elektromotor.html> abgerufen
- Schmid, S. a. (7. 10 2019). *Wikipedia*. Von Stereolithography: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> abgerufen
- Wikipedia*. (7. 10 2019). Von Polylactide: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide> abgerufen

9 Danksagung

Damit meine Arbeit überhaupt in diesem Umfang gelingen konnte, waren zahlreiche Experten und Helfer notwendig, die im richtigen Moment mit gutem Rat und Tat zur Seite standen oder mich bei der Fertigung der Elektromotoren unterstützten. Darum möchte ich mich an dieser Stelle bei allen beteiligten Personen recht herzlich bedanken.

Als erstes möchte ich mich bei meinem Betreuer Herr Stefano Chiantese bedanken, der mir seine Unterstützung für die Arbeit von Anfang an zusagte und immer wieder bestmöglich im theoretischen Teil mithalf.

Auch Herr Paul Hendriksen, der sich mehrmals Zeit nahm um mir Ratschläge bezüglich meines Vorhabens zu geben und allgemeine Problematiken aus dem Fachgebiet der Elektrotechnik erläuterte, gebührt mein Dank.

Für die zuvorkommende Einführung in Creo Parametric, welche als Grundlage für meine Arbeit diente, möchte ich Herr Xavier Lehoux Mitarbeiter der Liebherr France SAS in Colmar Merci sagen.

Herr Brun Stefan von der Maxon Motor AG möchte ich für die freundliche Beantwortung meiner Anfrage erwähnen.

Den Hinweis von Herr Marcel Battistella, Kontakt mit der Elektrowicklerei Gyger aufzunehmen weis ich sehr zu schätzen.

Der Firma Gyger Elektromotoren in Oensingen und ganz besonders Herr Adrian Gyger, der mir letztlich als einziger bei der Dimensionierung der Wicklung weiterhelfen konnte, möchte ich auch ein besonderes Dankeschön aussprechen.

Der Elektrowicklerei Fribat in Schötz gilt ein ganz besonderer Dank, da ohne sie ein professionelles Resultat der Arbeit auf keinen Fall möglich gewesen wäre.

Bei Herr Daniel Petermann dem Geschäftsführer, der stets meine E-Mails beantwortete möchte ich mich speziell bedanken.

Dem Wickler, Herr Anton Hügi, der sich sehr viel Zeit nahm um mir das Wickeln beizubringen und meine vielen Fragen zu beantworten gilt ein ganz besonderer Dank. Denn ohne seine sehr engagierten Ratschläge wäre der zweite Motor kaum so gut gelungen.

Zu guter Letzt möchte ich auch meine hilfsbereiten Eltern erwähnen, die mir bei Unsicherheit gute Ideen gaben und im schriftlichen Teile der Arbeit Korrekturarbeiten übernahmen.

Meine Mutter wies mich auf allfällige Rechtschreibfehler und Verbesserungsmöglichkeiten in der Wortwahl hin.

Mein Vater konnte als Elektroingenieur, meiner mangelnden Erfahrung mit sehr guten Ratschlägen nachhelfen und nahm sich besonders viel Zeit, um meine hartnäckigen Fragen zu beantworten.

10 Anhang

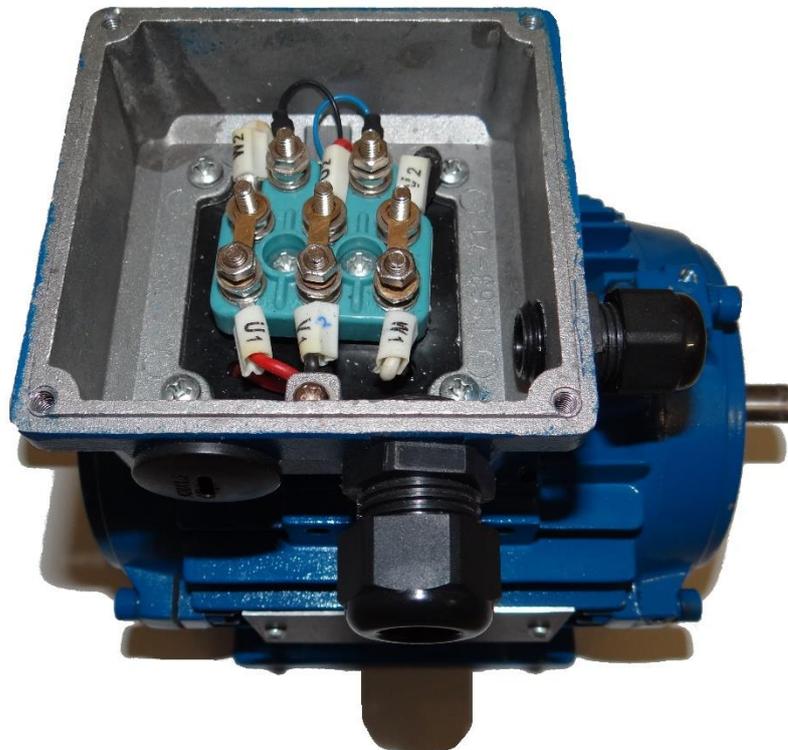


Abb. 27: Anschlussgehäuse mit Schaltbrett, es liegt eine Dreiecksschaltung vor.

Fribat						
IEC 34-1	TYPE KAE1A63A-2B35E1K -PTC				IE1	
	N°: 714036290257			4 kg	CE	
3- Motor	Th.Cl 155(F)	IP55	S1	IM B35	Tamb. 40°C	
Volt Δ	Volt Y	Hz	rmp	kw	Cos Phi	A
230	400	50	2715	0.18	0.75	0.87 / 0.50

Abb. 28: Typenschild des Asynchronmotors, der Firma Fribat.

Maturaarbeit Drehstrommotor aus dem 3D Drucker
10 Anhang

	A	B	C	D	E	F	G
1	Fliehkraft	16.65495743					
2							
3	Radius	Drehzahl	ω	m			
4	0.045	1500	157.0796327	0.015			
5							
6							
7	Magnete	26.52900463					
8							
9	Breite	Höhe	relativ r				
10	10	5	0.038				
11							
12							
13	Widerstand Draht	9.105161666					
14							
15	Windungen	Länge	Breite	Querschnitt	Gesamtlänge	Drahtradius	Temperatur
16	1260	150	80	1.130973355	579.6	0.6	30
17							
18							

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1						Dimensionierung Drehstrom-Synchronmotor			
2									
3									
4	Leistungsbedarf in W	Scheinleistung	Stränge	Volt		Amper Y	Amper Δ		
5	1000	1200.00	3	230		3.012262274	5.217391304		
6									
7									
8	Widerstand Spannung	44.08333333							
9									
10									
11									
12	Feldstärke	Feldkonstante	Windungen	Länge	Strom				
13	0.025132741	1.25664E-06	100	0.005	1				
14									
15									
16									
17	Anziehungskraft einer Spule		Querschnitts-Fläche						
18	20		0.004						
19									
20									
21	0.376991118								
22									

Abb. 29: Berechnungen in Excel



Abb. 30: Bausatz für den Tronxy X5ST-500-2E.



Abb. 31: Propellerabdeckung von Modell 1.1



Abb. 32: Beschriftete Seitenwand 1.1 von Modell 1.1.



Abb. 33: Innenseite der Seitenwand 1.2 von Modell 1.1.



Abb. 34: Spulen wickeln bei der Fribat in Schötz.

11 Deklaration

„Ich erkläre hiermit,

- dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst habe,
- dass ich auf eine eventuelle Mithilfe Dritter in der Arbeit ausdrücklich hinweise,
- dass ich vorgängig die Schulleitung und die betreuende Lehrperson informiere, wenn ich diese Maturaarbeit, bzw. Teile oder Zusammenfassungen davon veröffentlichen werde, oder Kopien dieser Arbeit zur weiteren Verbreitung an Dritte aushändigen werde.“

Ort: Kottwil

Datum: 11.10.2019

Unterschrift:

