

Automatic Coil Winder

Martin Steiner, Max Jost

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	2
2	Mechanik	2
3	Hardware	3
4	Physikalisches Modell	3
5	Messablauf	5
6	Messschleife	6
7	Code	6
8	Messdaten	6
9	Auswertung	6
10	Conclusio	8
A	Mechanik	8
B	Anhang	12

1 Aufgabenstellung

Bau eines automatischen Coil-Winders für Drahtdurchmesser bis zu AWG 42 klein. Spulenkörper mit kreisförmigen Querschnitt, als auch mit nicht rotationssymmetrischem Querschnitt, sollen sowohl mit paralleler Drahtführung mehrlagig gewickelt werden können. Für nicht rotationssymmetrische Spulenkörper muss eine automatische Drahtspannungsvorrichtung konstruiert werden, welche eine zuvor einstellbare Spannung aufrechterhält. Die Drahtspannung soll mittels einer Wägezelle indirekt gemessen werden und die Daten zur Analyse des Wicklungsablaufes verwendet werden.

Das Wavewinding und Scatterwinding wurde nicht umgesetzt, da die Zeit für die Testung und Verbesserung des Notwendigen Arms nicht gereicht hat und die Scattersoftware steuerungstechnisch, sowohl software-, wie auch hardwareseitig, zu kompliziert (in der gegebenen Zeit) war. Als Grundlage für die Motorsteuerung wurde das 'Enceladus'-Projekt von Jan Enenkel verwendet, welcher uns dies dankenswerterweise zur Verfügung gestellt hat. Im Gegensatz zum Projektvorschlag wurde der Dancerarm, des Spannsystems, nicht mithilfe eines Magneten, sondern mit einer Rückstellfeder, realisiert.

2 Mechanik



Abbildung 1: CAD-Render des Spannsystems ohne Feder

Da es den Rahmen der Dokumentation sprengen würde, wird hier nur auf das grundlegende mechanische System, sowie auf dessen Umsetzung eingegangen. Bei weiteren Interesse wird auf den Anhang verwiesen. Aufgeteilt ist das Projekt in zwei mechanische Untersysteme, das Drahtspannsystem und der Winder.

Beide Systeme wurden mit 3D-Druck-Teilen aus PETG und Frästeilen aus MDF gebaut und mithilfe unterschiedlicher Schraubsysteme verbunden. Mit Ausnahme der Kaufteile und der Aufnahmewelle (siehe Anhang A Abbildung 10), welcher aus hochfestem Stahl passgenau gedreht wurde.

Der Winder besteht aus einer reinen Drehachsen, sowie einem Lineartisch (siehe Anhang A Abbildung 9) mit gekoppelter Trapezspindel. Beide Achsen werden jeweils durch einen Steppermotor bewegt. Für die Spulenwicklung, wird der Spulenkörper am Linksgewinde der Aufnahmewelle befestigt und die Achse vom Motor im Uhrzeigersinn gedreht. Die Trapezspindel kann hingegen in beide Richtungen gedreht werden, bzw. der Lineartisch in beide Richtungen fahren, wodurch die Position des, durch den am Tisch befestigten Aufnahmedorn laufenden, Drahtes, relativ zum Spulenkörper, verändert werden kann. Der Aufnahmedorn (siehe Anhang A Abbildung 8) ist dreiteilig und besteht aus einer Röhre mit Außengewinde, einer Abdeckkappe mit Innengewinde und einem Einlageblatt aus Teflon. Das Einlageblatt wurde mit einer CNC-Fäse hergestellt und passt genau in die Innepassung

der Aufnahmedornröhre. In der Mitte wurde mit einem Feinbohrer ein 0.5 mm starkes Loch, zur Führung des Drahtes, gebohrt. Des Weiteren ist am Lineartisch ein Rotary-Encoder verbaut, sowie ein Gleitlager zur Drahtführung. Sowohl die Gleitlagerhalterung nahe dem Encoder, als auch der Aufnahmedorn, enthalten im Inneren einen Einsatz aus Teflon, um die Reibung zwischen Draht und Führung klein zu halten und Abreibung der Drahtisolation zu vermeiden.

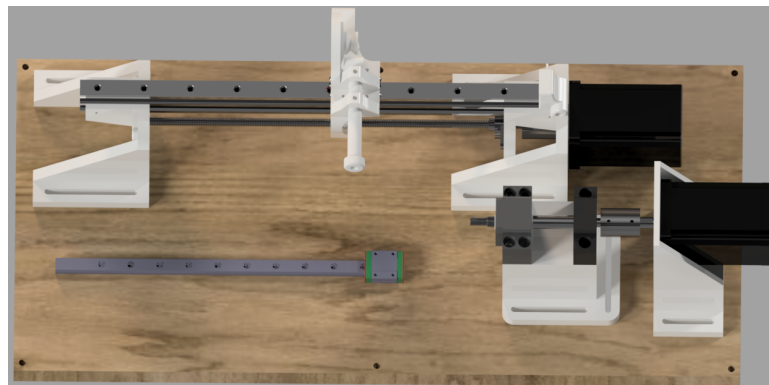


Abbildung 2: CAD-Render des Automatic-Coil-Winder ohne Rotary Encoder

Um einen gleichmäßige Wicklung zu gewährleisten, muss die Drahtspannung einstellbar sein und von dieser

Idealspannung nur in einem kleinen/bekannten Intervall abweichen. Hierzu wird die Rückstellkraft die auf den Draht wirkt durch zwei Schrauben, welche zwei mit Filz beklebte Platten zusammendrückt, eingestellt. Der Draht wird anschließend durch drei Kugellager geführt, wobei das zweite auf einer Wägezelle montiert ist und die Positionierung so gewählt ist, dass ein- und auslaufender Draht, am Kugellager der Wägezelle, ca. einen Winkel von 180° einschließen. Danach wird der Draht über ein weiteres Kugellager, montiert auf einer, mittels Langloch arretierbaren, Leiste, geführt. Von dort aus läuft er über das letzte Lager, welches am Tänzerarm befestigt ist. Dieser Arm ist kugelgelagert und ca. in der Mitte mit einer Feder verbunden. An dieser Feder ist an ihrem anderen Ende eine Schnur befestigt, welche durch einen Steppermotor aufgewickelt werden kann, um so die Feder zu spannen. Der bewegliche Arm kann somit dynamisch auf Drahtspannungsänderungen reagieren.

3 Hardware

- HX711
- Arduino UNO (ATMEGA328p)
- TMC2209 Driver
- Schaltplan
- Wägezelle
- Steppermotor ACT 24HS5430D8L2 full step $1,8 \pm 5$ per step; 3 A/phase; 2,4 V; 150 N.cm Haltemoment; $350 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ Drehmoment;
- Netzteil
- Stepdownconverter

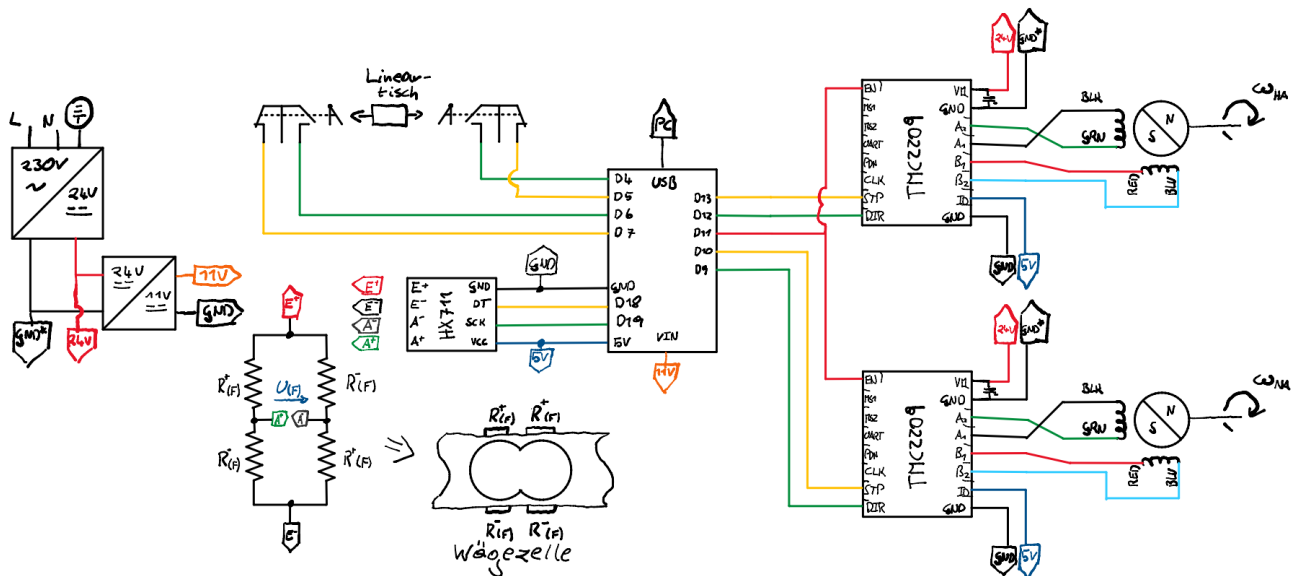


Abbildung 3: Schaltplan

4 Physikalisches Modell

Die verwendeten Spulenkörper sind geometrisch allesamt Zylinder. Somit ist für die Modellierung der Drahtwicklung nur die Umrandungskurve der Grundfläche und die Höhe des Zylinders ausschlaggebend. Der gewickelte Draht kann dementsprechend als Raumkurve aufgefasst werden, woraus wiederum das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeit ω von Hauptachse HA und Nebenachse NA abgeleitet werden kann. Für eine parallele Wicklung besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Winkelgeschwindigkeiten der Achsen. Es gilt:

$$\omega_{HA} = \pm K_{xy} \cdot \omega_{NA} \quad (1)$$

Das Vorzeichen bestimmt hier die Wicklungsrichtung der jeweiligen Lage. Für den Skalierungsfaktor K_{xy} gilt der folgende Zusammenhang:

$$K_{xy_{ideal}} = \frac{h_G}{D \cdot 2\pi} \quad (2)$$

wobei D den Drahtdurchmesser in mm und h_G die Ganghöhe, bzw. Steigung, der Trapezspindel in mm/2 π beschreibt. Abweichungen vom idealen Skalierungsfaktor können aufgrund von mehreren Störgrößen auftreten. Hierunter fallen das Umkehrspiel der Trapezmutter, Stepverluste der Motoren, elastische Verformung der Konstruktion und die Änderung des Drahtaustrittswinkels durch Verlaufen des Drahtes, bedingt durch Reibung zwischen Spulenkörper und Wickelmedium, oder Draht auf Draht. Da es für uns mit dem vorhanden Setup nicht möglich war die Störgrößen zu isolieren und einzeln zu vermessen, werden diese in dem Korrekturfaktor C zusammengefasst. Daraus folgt für den realen Achsenskalierungsfaktor der folgende Zusammenhang:

$$K_{xy} = \frac{h_G}{D \cdot 2\pi} \cdot C \quad (3)$$

Hieraus abgeleitet ergibt sich für, hardware bedingt, das Stellkonzept, dass immer der, sich schneller zu drehende, Motor angesteuert wird und der zweite Motor diesem immer, skaliert mit K_{xy} , folgt.

Bedingt durch die Konstruktion des Spannsystems (siehe Abschnitt 2) ergeben sich mehrere auf den Draht wirkende Kräfte, welche in Abbildung 4 eingezeichnet sind.

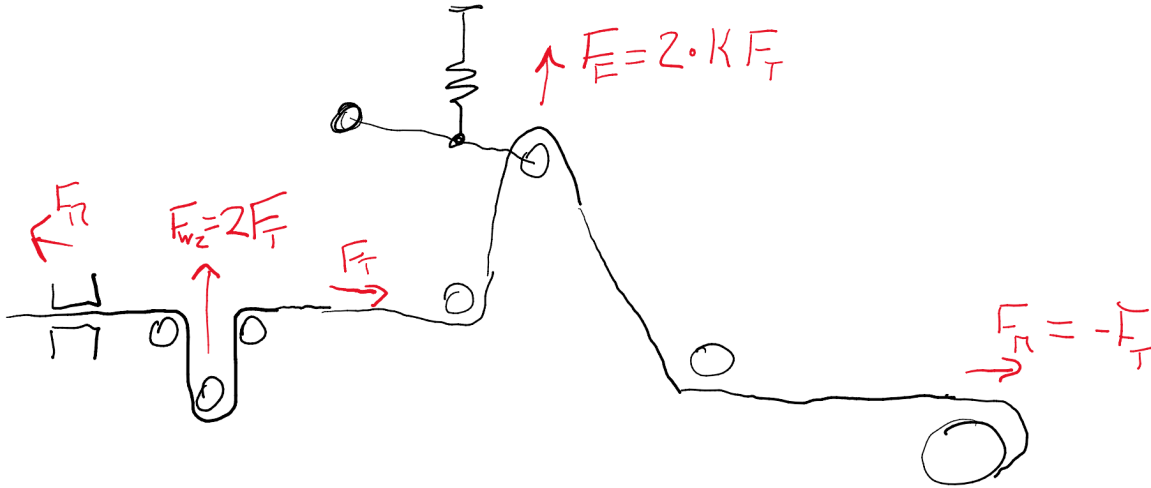


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Spannsystems und der darin auftretenden Kräfte

Die rücktreibende Kraft F_R , welche durch den Anpressdruck der Filzflächen entsteht, wird, während des Wickelprozesses, als annähernd konstant angenommen, da nur Gleitreibung vorliegt. Während der Startphasen wurde eine kurzzeitig erhöhte Drahtspannungskraft erwartet, da zuerst die vorliegende Haftreibung überwunden werden muss. Durch die in Abschnitt 2 getroffenen Annahmen muss für die Kraft am Wägezellenkugellager

$$F_{WZ} = 2\tau = 2F_T \quad (4)$$

gelten, wobei τ die Drahtspannungskraft beschreibt. Unter der Annahme, dass die Positionierung des Dancerarmes über der Wickelmaschine so erfolgt, dass der Winkel von einlaufenden und auslaufendem Draht 180° einschließt, gilt für die Federkraft F_F , mit der Federkonstante k , in Ruheposition:

$$F_F = 2 \cdot k \cdot F_T \quad (5)$$

Die Auslenkung der Feder wird idealisiert immer als vertikal angenommen. Für eine konstante Tangentialgeschwindigkeit v an der Spulenkörperoberfläche gilt für die Spulenkraft F_{SP}

$$F_{SP} = -F_T \quad (6)$$

, bzw.

$$0 \stackrel{!}{=} F_{SP} + F_R \quad (7)$$

Die Änderung der Drahtgeschwindigkeit bei der Wickelung mehrerer Lagen wurde aufgrund der geringen Dicke des Drahtes und der geringen Anzahl an geschichteten Lagen im Experiment ebenfalls vernachlässigt. Beim

Wickeln eines rotationssymmetrischen Spulenkörpers wäre die Drahtspannung ohne Dancerarm theoretisch am Anfang etwas höher, da aufgrund der Haftreibung F_R größer ist, und danach konstant. Durch diesen Spannungsunterschied beim Start des Systems ändert sich, bei eingebautem Dancerarm, die Auslenkung der Feder des Arms und wegen der Trägheit des Systems schwingt dieses um die neue Ruheposition. Im theoretisch ideal Fall würde diese Schwingung mit der Zeit abklingen, in einer realen Anwendung ist dies aber nicht zu erwarten, da das gesamte System nie perfekt starr ist und selbst auch immer schwingt, was zu unterschiedlichsten Überlagerungen führen kann.

Für Spulenkörper mit quadratischer, oder rechteckiger Grundfläche ergibt sich keine gleichmäßige Drahtgeschwindigkeit, da abhängig vom bewegten Winkel unterschiedlich viel Draht eingezogen wird. Somit ist auch die Drahtspannung, ohne Dancerarm, nicht konstant. Wird der Dancerarm verwendet, so ändert sich die Position des Arms bei jeder Spannungsänderung, wobei es, wie bereits weiter oben beschrieben, zu einer Schwingung um die neue Ruheposition kommt. Da die Spannungsänderungen kontinuierlich und periodisch sind, ist hier eine erzwungene Schwingung zu beobachten.

Wie sich experimentell allerdings herausstellte, weist die Drahtspannungskraft eine Geschwindigkeitsabhängigkeit auf. Bei höherer Aufwickelgeschwindigkeit liegt auch eine höhere Drahtspannung vor. Dies lässt widerspricht dem oben beschriebenen Modell und deutet auf eine geschwindigkeitsabhängige Rückstellkraft $F_R(v)$ hin, auf welche näher in Abschnitt 10 eingegangen wird.

5 Messablauf

Für die Experimente wurde aus Kostengründen Nähgarn verwendet mit einem Durchmesser $D = 0,25$ mm verwendet. Daraus ergibt sich nach Gleichung 2 ein Skalierungsfaktor von $K_{xy} = 4$. Das zu wickelnde Medium (Faden, Draht, etc.) wird dann durch das Spannsystem und die Maschine eingeführt und am Spulenkörper befestigt. Die Maschine wird, mittels Commandlinebefehlen im Userinterface (UI), an ihre Startposition gefahren. Danach wird der Befehl zum Start des Kalibrationsscriptes gegeben, woraufhin das Programm einen zum tarieren der Wägezelle, sowie zum Messen eines Referenzgewichtes, auffordert. Zur Messung des Referenzgewichtes wird ein Smartphone an die eine Seite des Drahtes gebunden und die andere Seite fixiert. Da die Wägezelle so auf das doppelte Gewicht des Smartphones kalibriert wird, gilt für die ab nun, an der Wägezelle gemessenen Werte, $F_{WZ} = F_T$. Da sich in zuvor durchgeführten Tests gezeigt hat, dass die Wägezelle, hinsichtlich relativer Kraftänderungen, wiederholbare Ergebnisse produziert, bei Kalibration mit dem selben Gewicht, die absoluten Werte aber teils stark schwanken, wurde die Kalibration mittels Referenzgewicht nur einmal vor der Messserie durchgeführt. Da für unser Experiment das Augenmerk auf dem relativen Änderungen der Drahtspannung liegt, wurden die möglichen Absolutwertänderungen (z.B. Temperaturdrift) vernachlässigt, auch da eine erneute Kalibration ein Öffnen des Spannsystems voraussetzt, was zu weitaus schwerwiegenden Problemen mit der Wiederholgenauigkeit führen würde. Danach können die Befehle zur Durchführung unterschiedlicher Wickeloperationen gesendet werden. Es wird eine halbe Testlage gewickelt um zu sehen ob der Skalierungsfaktor stimmt und wenn nötig nachgestellt und erneut getestet (siehe Abbildung 5). Für unseren Draht ergab sich somit ein Skalierungsfaktor von $K_{xy} = 3$, mit $C = 0,75$.

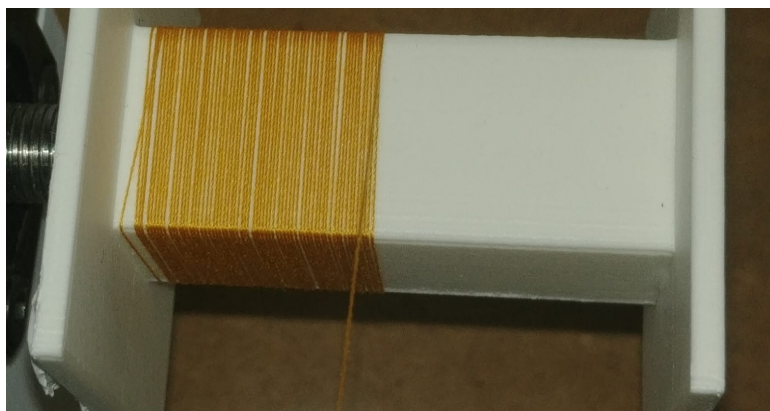


Abbildung 5: Einlagige Wicklung von Nähgarn ($D = 0,25$ mm) auf Zylinder mit quaderförmigen Querschnitt ($s = 20$ mm). Skalierungsfaktor $K_{xy} = 3$, Korrekturfaktor $C = 0,75$.

Danach wird die Messdatenübertragung per UI gestartet, wodurch die Übertragung der Messwerte über die Seriellchnittstelle beginnt. Bis zur Beendigung der Messung durch einen Commandlinebefehlen werden kontinuierlich Messdaten an den Computer übertragen. Für den genauen technischen Ablauf der Messung, siehe Abschnitt 6.

6 Messschleife

- Wie oft wird gesampelt?
- Wie wird gemittelt?
- Wie lange dauert die ganze Messschleife?
- Wie lange dauern die Messzeiten der einzelnen SW-Blöcke?

7 Code

In der Dokumentation bitte vollständig hinzufügen

8 Messdaten

Für die Durchführung der Experimente wurden zwei Zylinder mit gleicher Höhe $h = 50$ mm, aber unterschiedlicher Grundfläche, als Spulenkörper verwendet. Die Grundfläche der einen Spule (SP_K) entspricht einem Kreis mit Radius $r = 10$ mm, die der zweiten Spule einem Quadrat (SP_Q) mit Seitenlänge $s = 20$ mm. Die Experimente werden in Abschnitt 9 näher ausgeführt. Zur beispielhaften Darstellung der Rohdaten ist hier der, absichtlich herbeigeführte, Abriss des Drahtes während einer Wickeloperation dargestellt.

9 Auswertung

Wurde im Folgenden ein Versuch ohne Dancerarm durchgeführt, so wurde der Draht direkt über das Kugellager der darunter liegenden Leiste geführt. Des weiteren gilt für alle folgenden Graphiken, dass die Unsicherheitsbalken stets die einfache Standardabweichung angeben.

Wickelt man die selbe Wicklung, auf der Spule SP_K , zweimal mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, so wird der, bereits in Abschnitt 4 erwähnte, Effekt einer geschwindigkeitsabhängigen Drahtspannung, bzw. Rückstellkraft F_R sichtbar. Der Versuch wurde je einmal mit Dancerarm und einmal ohne Dancerarm durchgeführt.

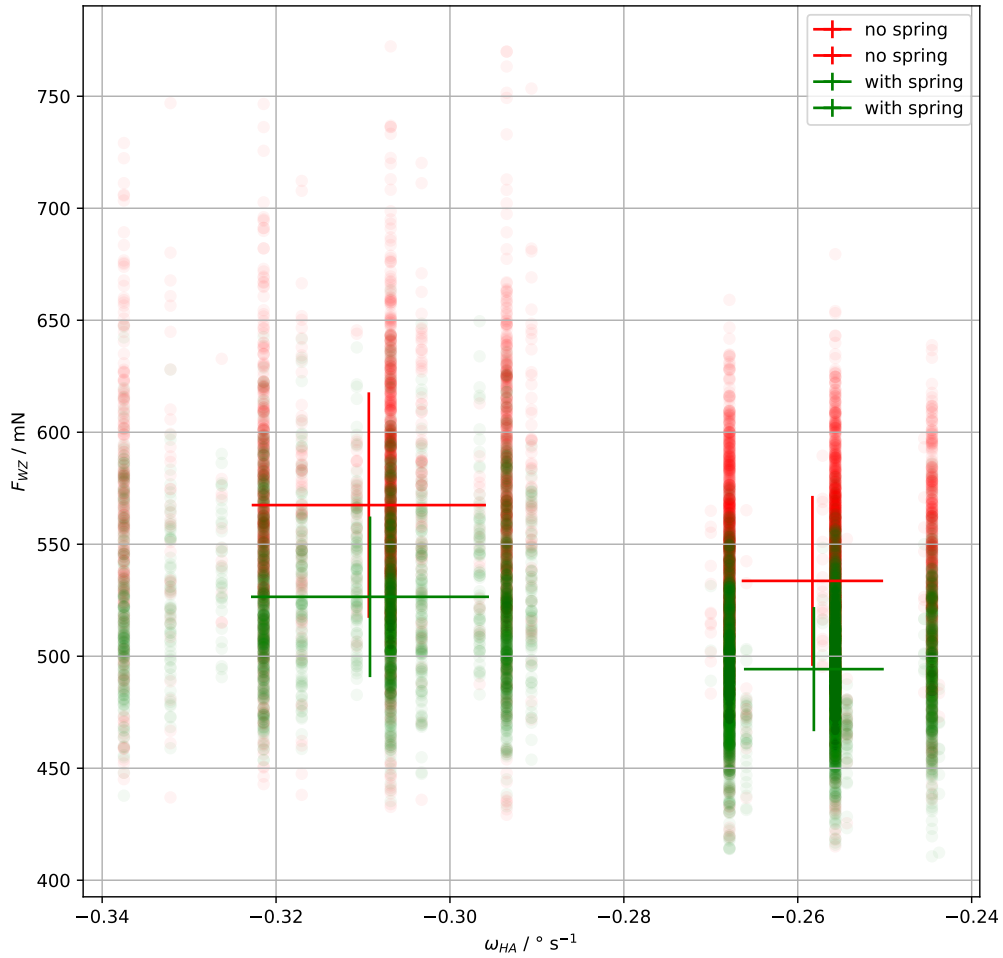


Abbildung 6: Darstellung der an der Wägezelle gemessenen Kraft während einer Wickelphase mit vorgegebener, konstanter Geschwindigkeit, F_{WZ} in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit der Hauptachse ω_{HA} . Die, mit Unsicherheitsbalken versehenen, vier Datenpunkte beschreiben jeweils das arithmetische Mittel des angegebenen Größe.

Eine mögliche Erklärung für die, in siehe Abbildung 6 ersichtliche, Geschwindigkeitsabhängigkeit der Drahtspannungskraft $\tau(v)$, bzw. Rückstellkraft $F_R(v)$, wäre, dass sich die Reibung an Filz !!!!!!!!!!!!!!!

Für den nächsten Versuch wurden die selbe Wicklung, bei gleichbleibenden Wickelparametern, einmal mit Dancerarm und einmal ohne, je für beide Spulenkörper, durchgeführt. Da die Zeit zwischen zwei Messwerten nicht konstant ist, sondern leicht schwankt (für Erklärung siehe Abschnitt 6), wurden die Daten Interpoliert, um äquidistante Messwertschritte zu erhalten. Danach wurde jeweils eine Fast-Fourier-Transformation FFT durchgeführt und das Ergebnis in Abbildung 7 dargestellt.

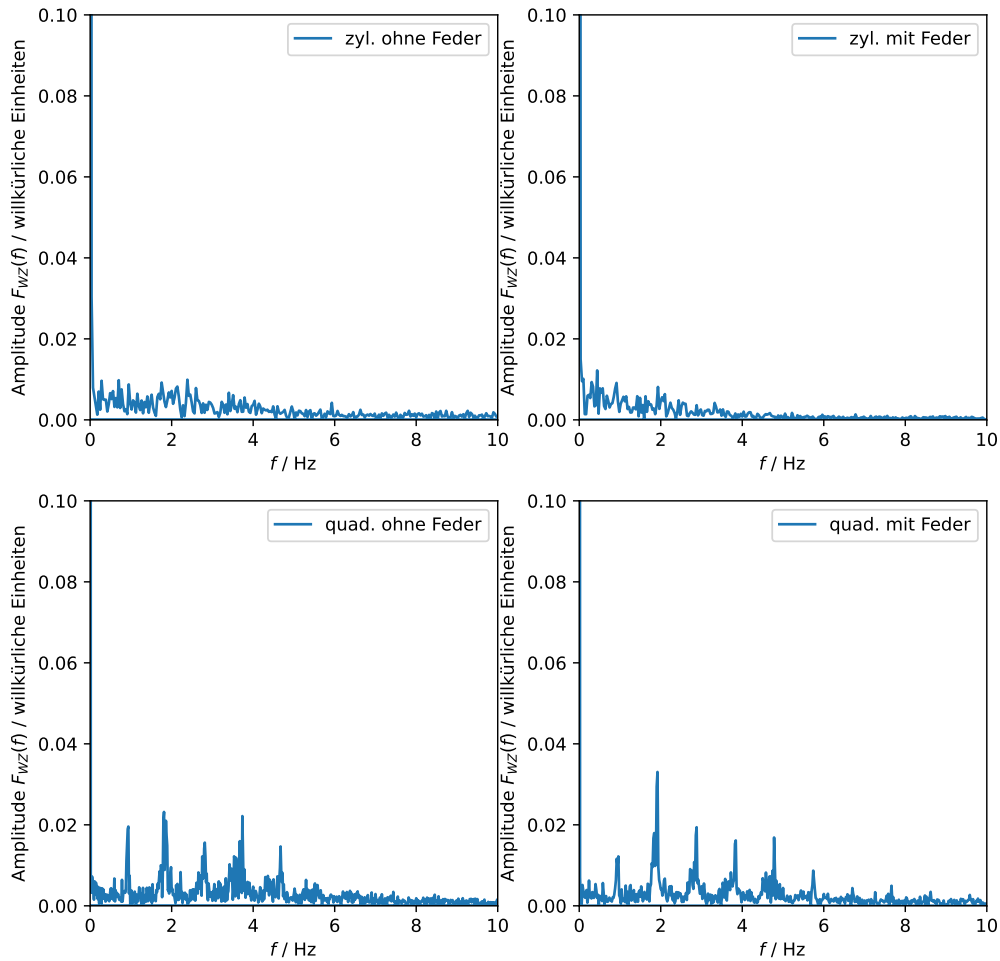


Abbildung 7: Darstellung der FFT s für beide Spulenkörper, je einmal ohne Dancerarm und einmal mit Arm

Betrachtet man die zwei, SP_K , zugehörigen Graphen, in Abbildung 7, so sieht man, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt wenn der Dancerarm nicht verwendet wird. Der Einfluss der, in Abschnitt 4 vermuteten, abklingenden Schwingung, angeregt durch den Wechsel von Haft- zu Gleitreibung, scheint vergleichsweise wenig Einfluss auf die Schwingung der Drahtspannung zu haben. Sieht man sich hingegen die zwei Graphen von SP_Q an, so fallen sofort die deutlichen Peaks in der FFT auf welche auf das periodische Schwingen der Drahtspannung hindeuten.

Zur Untersuchung der Start-, bzw. Abbremsphasen eines Wickeldurchganges sind in autoref!!!! die zwei Phasen, je für beide Spulentypen dargestellt. Die Messungen wurde jeweils mit der selben Beschleunigung und Endgeschwindigkeit durchgeführt.

10 Conclusio

Wie sich herausgestellt
geschwindigkeitsabhängigkeit

A Mechanik

Im Folgenden befinden sich weiterführende Erklärungen, auf welche, aufgrund des vorgegebenen Dokumentationsumfanges, nicht näher in der eigentlichen Dokumentation eingegangen werden konnte.

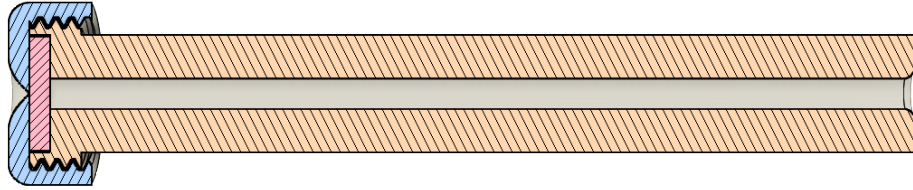


Abbildung 8: Schnittzeichnung des Drahtführungsdorns: Röhre mit Außengewinde (orange); Tefloneinlageblatt mit Mittenbohrung (rot); Abdeckkappe mit Innengewinde (blau)

Die, in Abbildung 8 gezeigte, Eigenkonstruktion, bzw. Eigenentwicklung bietet einige Vorteile im Vergleich zu den aktuell, kommerziell erhältlichen Führungsdornen. Durch unvermeidliche Abnutzung des Auflagematerials (hier Teflon), aufgrund von Reibung, muss hier nicht der gesamte Dorn, sondern lediglich das winzige Teflonblättchen ersetzt werden. Die Produktionskosten des gesamten hier gezeigten Dorns betragen 1€, ein Wechsel des Teflonblättchens wenige Cent. Hingegen kostet der Wechsel eines kommerziellen Führungsdorns 35€. Außerdem kann, durch diesen Wechsel, auch ganz einfach auf unterschiedliche Drahtdurchmesser umgestellt werden, ohne den bereits eingebauten Dorn wechseln zu müssen.

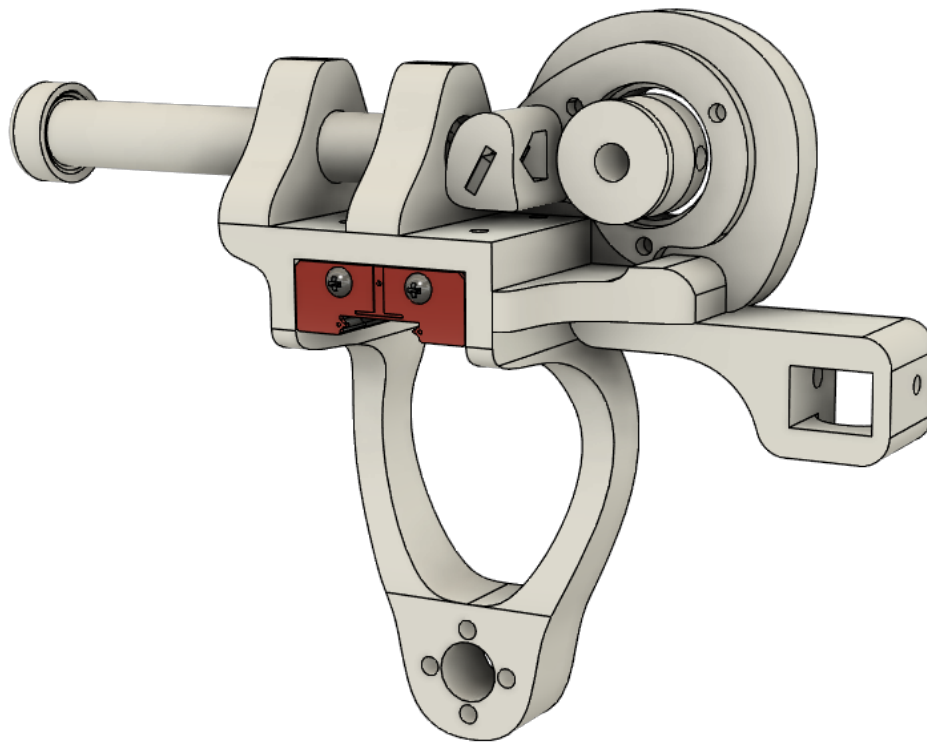


Abbildung 9: Lineartisch mit Führungswaagen, Schleppkettenhalterung, Drahtführungsdom, Teflon-Gleiterlager und V-Nut-Aufsatz für Rotary-Encoder

In der Bohrung am unteren Ende von Abbildung 9 sitzt im Winder die Trapezmutter, welche die Verbindung zwischen Linearführung und Trapezspindel, bzw. Antrieb, ist. Die Form der Verbindungsbeine zwischen Trapezmutter und Oberseite ist absichtlich so konstruiert, da so ein weiterer Verfahrensweg mit der Maschine realisiert werden kann und weil durch die gebogenen Form leichte Änderungen im Abstand von Linearführung und Trapezspindel ausgeglichen werden können. Eine starre Ausführung ist in dieser ersten Version des Winders für uns, auf Grund der verwendeten Produktionsmethoden und des Budgets, nicht umsetzbar gewesen, da die parallele Ausrichtung von Linearführung und Trapezspindel so kaum, bzw. nur mit aufwendigen Mess- und Justierarbeiten, möglich ist.



Abbildung 10: Schnittzeichnung der Aufnahmewelle

Die in Abbildung 10 dargestellte Aufnahmewelle wurde aus hochfestem Stahl an einer Drehbank hergestellt. Das in der Zeichnung rechte Gewinde ist als Linksgewinde ausgeführt um ein selbstständiges Abdrehen des Spulenkörpers, während des Wickelprozesses zu verhindern, während das andere Gewinde zur Vorspannung des Festlagers verwendet wird. Auf der linken Seite des Bildes ist eine kleine Nut sichtbar, welche für einen Spannrings zur Fixierung am BF10-Loslager, vorgesehen ist. Verwendet wurde ein BK10-Festlager mit Schrägkugellagern. Zur Montage der Welle wurde diese im Tiefkühler auf $T = -31^\circ$ gekühlt. Danach wurden die Alulagerblöcke am Herd aufgeheizt und die Welle, mittels Kühl Spray, auf $T = -55^\circ$ gekühlt. Aufgrund der temperaturabhängigen Ausdehnung der Materialien, ließen sich die Welle so mit einem Gummihammer in die Lagerblöcke einbringen und war nach Temperierung auf Raumtemperatur passgenau im Lager.

B Anhang

Automatic Coil Winder

Aleksey Sokolov, Max Jost, Martin Steiner

Zielsetzung

Bau eines automatischen Coil-Winders für Drahtdurchmesser bis zu AWG 42 (0,0633 mm) klein. Spulenkörper mit kreisförmigen Querschnitt, als auch mit nicht rotationssymmetrischem Querschnitt, sollen sowohl mit paralleler Drahtführung, als auch mit 'wave winding', oder dem teils randomisierten 'scatter winding', mehrlagig gewickelt werden können. Für nicht rotationssymmetrische Spulenkörper muss eine automatische Drahtspannungsvorrichtung konstruiert werden, welche eine zuvor einstellbare Spannung aufrechterhält. Weiters soll die zugehörige Software, bei bekannten Materialparametern und Spulenwiderstand R , eigenständig die Wicklungszahl bestimmen.

Projektaufbau

Der Coil-Winder besteht aus einer Hauptachse, auf welcher der Spulenkörper mittels Servo-/Stepper-Motor gedreht wird. Parallel dazu befindet sich eine weitere lineare Achse, auf welcher sich die Drahtführung befindet. Diese wird durch einen Steppermotor, welcher eine Welle dreht, bewegt. Abhängig vom Drahtdurchmesser muss die Führungsspitze natürlich passend gewechselt werden. Um die aktuelle Position der Führungseinheit zu bestimmen werden Endschalter an der Achse befestigt, womit eine festgelegte Startposition erreicht werden kann. Aus der Startposition und der gedrehten Stepps kann auf die aktuelle Position umgerechnet werden. Um einen Steppverlust zu verhindern, könnten closed loop Stepper Motoren verwendet werden. Mit einem Hallsensor kann die Drehzahl der Hauptachse zusätzlich bestimmt werden.

Die Drahtspannungsvorrichtung besteht aus einem rein mechanischen Klemmmechanismus, welcher eine gewisse Reibung für den Draht bietet, welcher danach in das magnetische Spannsystem geführt wird. Dort wird er über eine Rolle geführt, welche am Ende eines Stabes sitzt. Dieser ist am anderen Ende drehbar gelagert. Mittels eines Elektromagneten, der sich über dem Stab befindet, kann die rücktreibende Kraft, die auf den Draht wirkt, eingestellt werden. Mit einem Magnetfeldsensor kann das Magnetfeld, und mit einem Potentiometer der Winkel des Stabes, gemessen werden.

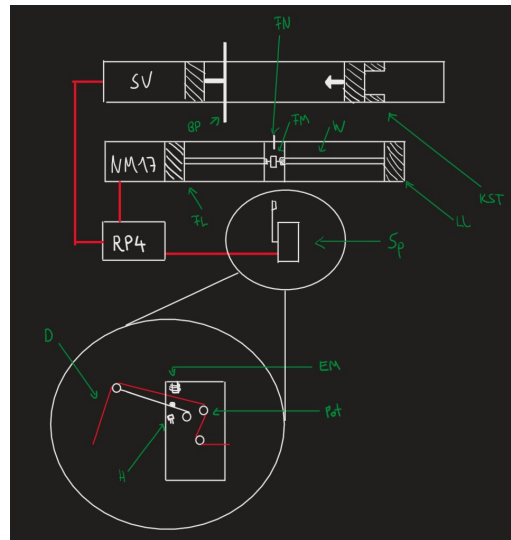


Abbildung 1: Skizze des Coil-Winders und der magnetischen Spannvorrichtung. **SV**: Servomotor; **NM17**: Steppermotor; **BP**: Befestigungsplatte; **FN**: Führungsspitze; **FM**: Führungsmechanismus; **RP4**: Raspberry Pi 4; **W**: Welle; **LL**: Loslager; **FL**: Festlager; **KST**: Konterreitsstock; **SP**: Spannsystem; **EM**: Elektromagneten; **Pot**: Potentiometer; **H**: Hallsensor; **D**: Draht;

Physikalische/Hardware Anforderungen

1. mechanische Steifigkeit und Genauigkeit der Konstruktion.
2. Ermittlung der Wirkkraft des magnetischen Spannsystems.
3. Schnelle Schaltzeiten für das Schalten der Stepper Motoren.
4. Auflösungziel: $\Delta l = 0,05$ mm.

Komponenten und Kosten

Tabelle 1: Skizze

Komponente	Kosten / €
NEMA 17 (closed loop)	15 - 60
Servo Motor	15 - 60
Stepper Driver	6 - 10
sonst. Mat.	50 - 80
Arduino	vorhanden
RP4 (oder Alternative)	vorhanden
Summe	86 - 210