

# Automatic Coil Winder

Max Jost, Martin Steiner

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Mechanik</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Physikalisches Modell</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Messablauf</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Messschleife</b>	<b>5</b>
<b>7</b>	<b>Code</b>	<b>5</b>
<b>8</b>	<b>Messdaten</b>	<b>5</b>
<b>9</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
<b>10</b>	<b>Conclusio</b>	<b>6</b>
<b>A</b>	<b>This is an Apendix</b>	<b>6</b>

# 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

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 Schraubensysteme verbunden. Mit Ausnahme der Kaufteile und der Aufnahmewelle, welcher aus hochfestem Stahl passgenau gedreht wurde.

Der Winder besteht aus einer reinen Drehachsen, sowie einem Lineartisch 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 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.

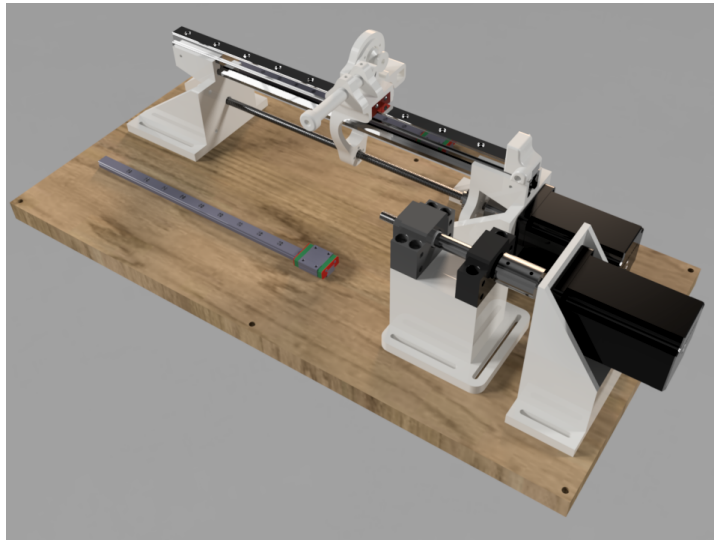


Abbildung 1: a nice plot

Um einen gleichmäßigen Drahtwicklung 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 zusammendrücken, 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  $180^\circ$  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

### 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  $\omega$  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/ $2\pi$  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 vorhandenen 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 2 eingezeichnet sind.

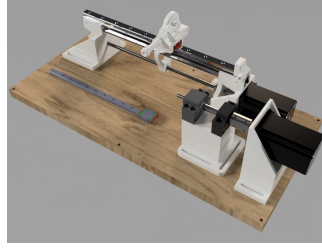


Abbildung 2: a nice plot

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  $\tau$  die Drahtspannungskraft beschreibt. Unter der Annahme, dass die Positionierung des Dancerarmes über der Wickelmaschine so erfolgt, dass der Winkel von einlaufenden und auslaufendem Draht  $180^\circ$  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 widersprüchlich 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. 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 Befehl 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. Für unseren Draht ergab sich somit ein Skalierungsfaktor von  $K_{xy} = 3$ , mit  $C = 0,75$ . 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

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  $\tau$ , bzw. Rückstellkraft  $F_R$ . Eine mögliche Erklärung für die, in (siehe autorelabel) 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. Der Draht wurde, bei nicht Verwendung des Dancerarms, direkt über das Kugellager der darunter liegenden Leiste geführt.

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

A This is an Apendix

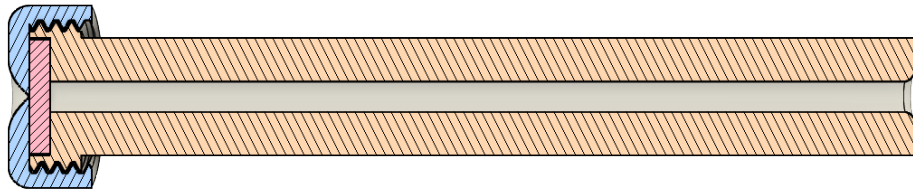


Abbildung 3: a nice plot

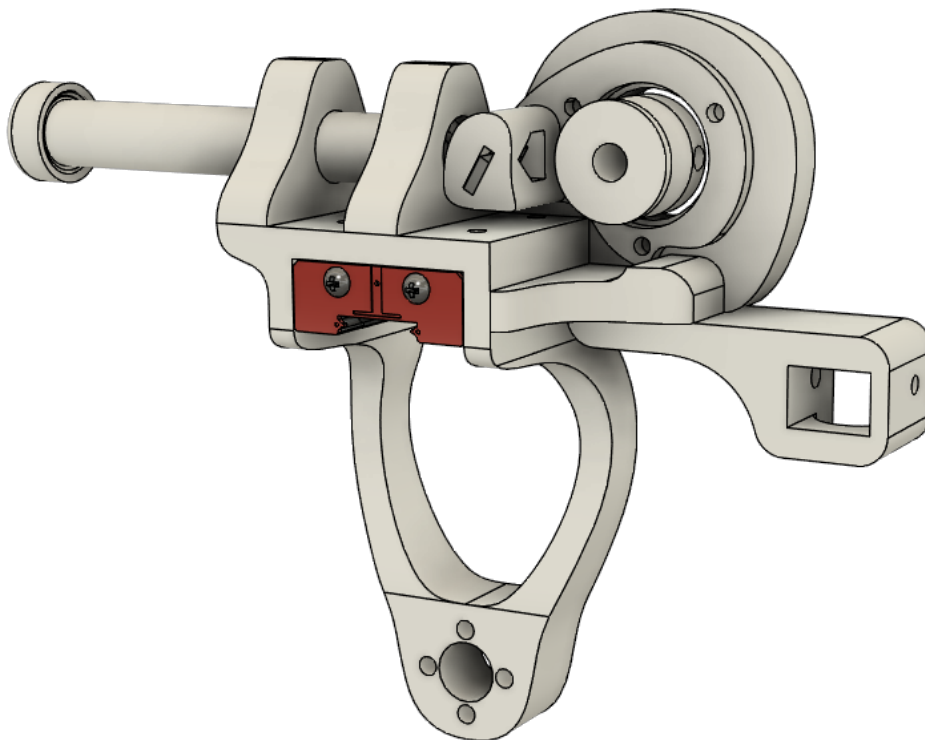


Abbildung 4: a nice plot



Abbildung 5: a nice plot