

# Regelung eines Wickelantriebs mit einem Versuchsstand

Alexander Stark

22220529

Kiran Krishnakumar

22213304

Technischer Bericht m Studienfach „Fertigungsautomatisierung“

bei

Prof. Dr. Ing. Reiner Schütt, Fachhochschule Westküste

vorgelegt am

23.01.2023

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	2
Einführung [Alexander Stark] .....	3
Kurze Betrachtung des Wickelprozesses.....	3
Problemstellung.....	4
Zielsetzung der Arbeit .....	5
Versuchsaufbau [Alexander Stark] .....	5
Klärung der Aufgabenstellung [Alexander Stark] .....	7
Umsetzung.....	9
Inbetriebnahme des Seilzugsensors und des Drehgebers [Alexander Stark] .....	9
Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Drehzahlregelung im Antriebsregler [Alexander Stark] .....	12
Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Lageregelung (Tänzerregelung) unter TwinCAT3 [Alexander Stark] .....	14
Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Fadengeschwindigkeitsregelung [Kiran Krishnakumar] .....	18
Automatisiertes Auf- und Abwickeln eines Fadens bei parametrierbarer Tänzerhöhe, Fadengeschwindigkeitsprofilen und Reglerparametern [Alexander Stark].....	19
Ermittlung des Schlupfes am Drehgeber bei unterschiedlichen Fadengeschwindigkeiten [Kiran Krishnakumar].....	22
Schaffung einer geeigneten Bedienoberfläche [Kiran Krishnakumar].....	23
Zusammenfassung und Ausblick [Kiran Krishnakumar] .....	24
Quellenverzeichnis .....	26

### Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Tänzers (Quelle: Kiel, 2007).....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung eine Zentrumswicklers .....	4
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (eigene Darstellung, 2022). 6	
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer möglichen Bedienoberfläche (eigene Darstellung, 2022).....	9
Abbildung 5: Verlauf des Seilzugsensorwerts und Verhältnis der gemessenen Werte .....	10
Abbildung 6: Inkremental-Drehgeber Rückgabewert in Inkrementen (grün) und Umrechnung in mm/s (blau) .....	11
Abbildung 7: Darstellung eines PT1-Gliedes zur Signalaufbereitung (Quelle: ).....	12
Abbildung 8: Kaskadenregler der Wickelantriebe .....	12
Abbildung 9: Drehzahlverlauf linke Wickelspule voll, rechte Wickelspule leer.....	13
Abbildung 10: Drehzahlverlauf linke Wickelspule leer, rechte Wickelspule voll.....	13
Abbildung 11: Aufbau des PI-Regelkreises für die Lageregelung des Tänzers .....	14
Abbildung 12: Sprungantwort Tänzer auf eine Drehzahländerung des rechten Antriebs...	16
Abbildung 13: Tänzerregelung mit PI-Regelalgorithmus .....	17
Abbildung 14 PI-Regelkreis für die Fadengeschwindigkeitregelung .....	18
Abbildung 15 Sprungantwort: Fadengeschwindigkeit und Drehzahl des linken Antriebs .	18
Abbildung 16: Automatische Referenzierung "Abwickeln" .....	20
Abbildung 17: Darstellung und Berechnung des Trapezprofils.....	21
Abbildung 18 die Bedienoberfläche für die Steuerung des Wickelantriebs .....	24
Tabelle 1: Auszugskraft des Seilzugs in Abhängigkeit der Lage (Quelle: ).....	7
Tabelle 2: Bewertung der Drehzahlregelung in den Antrieben.....	14
Tabelle 3 Vergleich des Schlupfs bei verschiedenen Einstellungen .....	22

## Einführung [Alexander Stark]

Hochautomatisierte Produktionen spielen in der heutigen Industrie eine große Rolle. Die Forderungen der Konsumgesellschaft führen in der fertigenden Industrie zu immer kleineren Taktraten. Diese können von einem Minutentakt bis hin zu einem Millisekunden Takt führen. Diese hochfrequente Fertigung lässt sich am Beispiel einer Fertigung für eine Tageszeitung veranschaulichen. Nach Weidenbach (2022) hatte die Süddeutsche Zeitung zum 4. Quartal 2021 eine Auflage von 314.200 Exemplaren. Wird von einer Druckzeit von Redaktionsschluss (Annahme: 21:00 Uhr) bis zum Ende der Auslieferung (Annahme: 2:00 Uhr) ausgegangen, ergibt sich ein Produktionszeitraum von 5 Stunden für die tagesaktuelle Ausgabe. Dabei wird in diesem Beispiel außer Acht gelassen, dass gewisse Teile der Zeitung schon vorgedruckt werden können. Für den nicht vordruckbaren Teil der Zeitung, ergibt sich in diesen 5 Stunden eine Taktrate von 62.840 Exemplaren pro Stunde. Resultierend in einen kontinuierlichen Herstellungsprozess mit einem sehr schnellen Materialfluss, wird damit alle 57 Millisekunden eine neue Zeitung fertiggestellt. Dieses Beispiel lässt sich auch auf andere Branchen mit hohen Absatzmengen wie etwa der Textilindustrie übertragen. Wickelprozesse und deren Antriebe spielen dabei eine zentrale Rolle. Über Abwickelantriebe werden Materialbahnen einem Prozess zugeführt. Wird das Material im Anschluss durch Querschneider oder fliegende Sägen nicht vereinzelt, erfolgt über einen Aufwickelantrieb wieder eine Speicherung des bearbeiteten Materials. Erforderlich hierfür ist eine Abstimmung der Antriebe aufeinander und auf die geforderte Durchlaufgeschwindigkeit des Materials durch den Prozess. Der Sammelbegriff für diese Art von Antrieben lautet Gleichlaufantriebe (Kiel, S.351). Das Spektrum der zu wickelnden Materialien ist dabei sehr breit und resultiert in verschiedenen Anforderungen auf die Wickelantriebe. Es reicht von flächigen Materialbahnen wie etwa Blech- und Papierbahnen bis zu dünnen rundlichen Materialien wie etwa Fäden, Drähten oder Garnen.

### Kurze Betrachtung des Wickelprozesses

Wie bereits erwähnt sind Wickelantriebe bei kontinuierlichen Produktionsprozessen von zentraler Bedeutung. Das Spektrum der zu wickelnden Materialien ist dabei sehr breit. Es reicht von flächigen Materialbahnen wie etwa Blech- und Papierbahnen bis zu dünnen rundlichen Materialien wie etwa Fäden, Drähten oder Garnen. Ziel ist es das Material mit einer definierten Zugkraft auf einem Coil oder eine Rolle aufzuwickeln. Eine Häufige Art diese Zugkraft zu definieren ist der Einsatz von Tänzern. Für sehr große

Zugkraftstellbereiche ( $F \geq 150\text{N}$ ) können auch Zylindersysteme zum Einsatz kommen. Abbildung 1 zeigt schematisch die Darstellung eines solchen Tänzers. Die Umlenkung der Materialbahn erfolgt dabei um  $180^\circ$ . Über die Positionierung des Tänzers (im Bild gekennzeichnet mit  $D_s$ ) wird zudem die Synchronisation der beiden Wickelantriebe gewährleistet.

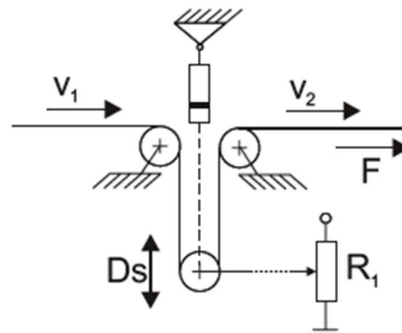


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Tänzers (Quelle: Kiel, S. 364)

Die dabei am häufigsten eingesetzten Antriebselemente sind Zentrumswickler. Dabei ist der Antrieb direkt oder über ein Getriebe an das Zentrum der Wickelachse gekoppelt. Das Drehmoment wird über die Wickelwelle und die bereits aufgewickelten Bahnen auf die Wickelbahn übertragen. In Abbildung 2 ist der Aufbau eines Zentrumswicklers schematisch dargestellt.

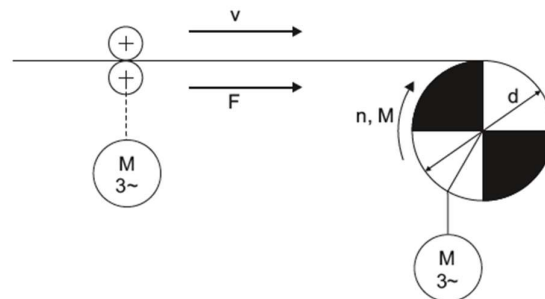


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Zentrumswicklers (Quelle: Kiel, S. 377)

### Problemstellung

Mathematisch gesehen handelt es sich bei den aufgewickelten Materialbahnen um eine Spirale. Physikalische Größen wie Gewicht und Durchmesser der Wickelrolle ändern sich während des Betriebs abhängig davon, ob Material auf- oder abgewickelt wird. Um die Wickelgeschwindigkeit über den Prozess konstant zu halten sind bei kleinem Durchmesser hohe Drehzahlen und ein geringes Drehmoment nötig, während bei großem Durchmesser

ein erhöhtes Drehmoment und niedrigere Drehzahlen nötig werden. Bei sauber aufgewickelten Bahnen mit definierter Materialstärke, wie etwa bei Blech- oder Papierbahnen, kann bei der Regelung der Antriebe auf den sich ändernden Durchmesser und damit auf die sich ändernde Umfangsgeschwindigkeit der Walzen einfacher Rücksicht genommen werden als bei unregelmäßig aufgewickelten Bahnen, wie etwa bei Fäden oder Garnen. Um hier Rückschlüsse auf die aktuelle Wickelgeschwindigkeit zu bekommen, wird daher ein externer Drehgeber eingesetzt, welcher über Reibkraft mit dem Wickelgut verbunden ist und dadurch von Schlupf betroffen sein kann.

Zu Beginn findet zwischen den Antrieben des Wickelprozesses keine Synchronisation oder Regelung statt. Die Antriebe befinden sich in einem zueinander unregelmäßigen Betrieb und können nur getrennt manuell betrieben werden.

### **Zielsetzung der Arbeit**

Die Arbeit dient als Prüfungsleistung im Modul „Fertigungsautomatisierung“ bei Prof. Dr. Ing. Rainer Schütt als Teil des Masterstudiengangs „Automatisierungstechnik“ an der FH Westküste. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Motion Control Anwendung mit Hilfe der Programmierungsumgebung TwinCAT3 und einer Software SPS in Betrieb genommen werden. Anhand eines Versuchsaufbaus mit Beckhoff Servokomponenten soll untersucht werden, inwieweit die Umsetzung einer Software SPS über EtherCAT für die Motion Control Anwendungen geeignet ist. Im konkreten Fall handelt es sich bei der Anwendung um einen Faden-Wickelantrieb mit zwei Wickelachsen und einem Tänzer.

## **Versuchsaufbau [Alexander Stark]**

Der Versuchsaufbau dient als Vorführmodell für einen Wickelprozess. Bei der Wickelanlage handelt es sich um zwei Zentrumswickler, auf welche ein Faden über eine Peripherie von einem Wickler auf den anderen Wickler auf- oder abgewickelt wird. Die Hardwarekomponenten des Aufbaus sind wie folgt gegliedert und aufgelistet.

Aktoren:

- 2x Servomotoren AM8031 der Firma Beckhoff
- 2x Servoumrichter AX5101 der Firma Beckhoff

Sensoren:

- 1x Seilzugsensor SX-50-1250-10V-SA12 der Firma WayCon (S2)
- 1x inkrementaler Drehgeber 05.2400.1222.1024 der Firma Kübler (S1)

- 1x induktiver Näherungssensor (S3)
- 1x mechanischer Endschalter LS-20 der Firma Eaton (S4)

Steuereinheit:

- Software SPS in TwinCat3 auf einem Labor-PC

Kommunikation:

- EtherCAT
- Buskoppler EK1814 mit EtherCAT Gateway

Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau der Wickelanlage mit den zugrunde liegenden Prozessebenen, Peripheriegeräten und dem Kommunikationsfluss.

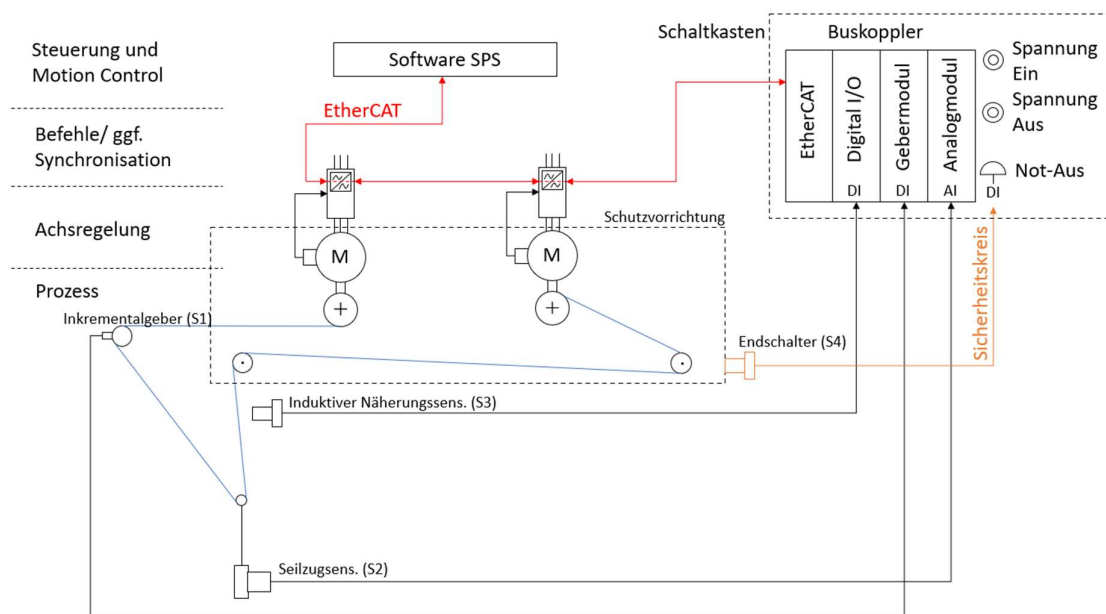


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (eigene Darstellung, 2022)

Der Aufbau besteht dabei im Kern aus zwei Servoantrieben. Der Faden (blau) läuft über mehrere Umlenkrollen, einem externen Inkrementalgeber und einem Tänzer von einer Spule an Achse 1 zu einer anderen Spule an Achse 2 und umgekehrt. Die Spulen sind direkt über einen Flansch mit der Welle der Servoantriebe verbunden. Der Inkrementalgeber (S1) erfasst dabei die die Wickelgeschwindigkeit des Fadens unabhängig vom Wicklungsdurchmesser der Spulen. Über den Tänzer mit dem integrierten Seilzugsensor (S2) wird auf den Faden, abhängig von der Lage des Tänzers, eine konstante Zugkraft ausgeübt, welche aus Tabelle 1 entnommen werden kann. Ein induktiver Näherungssensor erfasst den Endanschlag des Tänzers. Über einen mechanischen Endscharter wird die Sicherheitsabdeckung über den Spulen detektiert. Die Kommunikation zwischen den Sensoren/Aktoren und der Steuerebene erfolgt über das EtherCAT Kommunikationsprotokoll. Ein Buskoppler wandelt die Signale

der Sensoren in EtherCAT-Signale um. Bei der Software SPS handelt es sich um einen Labor-PC, auf dem die Entwicklungsumgebung TwinCAT3 von Beckhoff läuft.

Messbereich [mm]	Auszugskraft	
	$F_{\min}$ [N]	$F_{\max}$ [N]
50	5,8	6,2
75	3,6	3,8
100	3,4	3,6
125	4,2	4,4
150	6	6,8
225	4,2	4,4
250	5	6,4
300	2,8	3,2
375	4	4,4
500	3	3,6
625	4,4	5,2
750	3,2	4,4
1000	2,8	3,4
1250	4,6	5,6

*Tabelle 1: Auszugskraft des Seilzugs in Abhängigkeit der Lage (Quelle: WayCon)*

## Klärung der Aufgabenstellung [Alexander Stark]

Wie bereits beschrieben soll in dieser Arbeit eine Fadenwickler als Motion Control Anwendung softwareseitig realisiert und untersucht werden. Die zu absolvierende Gesamtaufgabe wird dazu in verschiedene Teilaufgaben untergliedert.

### Inbetriebnahme des Seilzugsensors und des Drehgebers

Zunächst soll bei der Inbetriebnahme der Sensoren und Aktoren auf die Funktionstüchtigkeit und Auslesbarkeit der Sensoren geachtet und diese gegebenenfalls hergestellt werden. Dabei ist besonders die Parametrierung des analogen Seilzugsensors und des digitalen Drehgebers zu achten. Die Sensorwerte sollen in sinnvollen physikalischen Größen dargestellt und verarbeitet werden.

### Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Drehzahlregelung im Antriebsregler

Die in den Antriebsreglern integrierte Kaskadenregelung wird auf Drehzahlregelung umgestellt. Durch eine Aufzeichnung von Sprungantworten auf die Antriebe bei voller und leerer Spule, sowie diversen Drehzahlen, soll eine ausreichende Parametrierung ermöglicht werden, um eine fundierte Bewertung des Regelkreises zu treffen.

### Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Lageregelung (Tänzerregelung) unter TwinCAT3



Die Lageregelung des Tänzers soll ein PI-Regler entworfen werden, welcher die Tänzerposition in cm als Regelgröße und einen Drehzahl-Sollwert in Inkrementen pro Sekunde als Stellgröße an den Aktor ausgibt. Der Aktor ist hierbei ein Servomotor, der für mit seiner Drehzahl die Höhe des Tänzers regelt. Der andere Servomotor bestimmt die Störgröße. Die Parametrierung und Bewertung des Reglers erfolgen mit Hilfe von Sprüngen auf den regelnden Motor. Der Tänzer soll dabei auf eine definierbaren Arbeitshöhe geregelt werden. Bei einer Auslenkung des Tänzers zu den Systemgrenzen soll eine Abschaltung erfolgen.

### **Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Fadengeschwindigkeitsregelung**

Ähnlich wie für die Tänzerregelung soll ein PI-Regler für die Fadengeschwindigkeit entworfen werden. Aus den bereits bekannten Gründen dient hier ein externer Inkrementalgeber als Messerwertgeber. Die Regelgröße ist hierbei die Fadengeschwindigkeit in einer physikalisch sinnvollen Größenordnung (m/s, mm/s, etc.), die Stellgröße ist ein Drehzahl-Sollwert in Inkrementen pro Sekunde an den Motor, welcher für den Tänzerlageregelkreis die Störgröße liefert. Die Parametrierung und Bewertung des Reglers erfolgen mit Hilfe von Sprüngen auf den regelnden Motor.

### **Automatisiertes Auf- und Abwickeln eines Fadens bei parametrierbarer Tänzerhöhe, Fadengeschwindigkeitsprofilen und Reglerparametern**

Unter Verwendung der entworfenen Regler soll ein parametrierbarer Automatikbetrieb der Wickelanlage ermöglicht werden.

### **Ermittlung des Schlupfes am Drehgeber bei unterschiedlichen Fadengeschwindigkeiten**

Der externe Drehgeber ist nur durch Haftreibung mit dem Faden verbunden. Für eine exaktere Ermittlung der Fadengeschwindigkeit soll der Schlupf am Drehgeber bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ermittelt werden.

### **Schaffung einer geeigneten Bedienoberfläche**

Zur allgemeinen Bedienung der Anlage soll eine geeignete Bedienoberfläche in der Programmierumgebung TwinCAT3 erstellt und zur Verfügung gestellt werden. Diese soll dem Anlagenbediener einige Einstellmöglichkeiten bieten. So soll durch den Bediener ein Drehzahlprofil für die Fadengeschwindigkeit über eine Erfassung der Beschleunigungs- und

## Umsetzung

Bremszeiten, sowie der Zielgeschwindigkeit des Fadens vorgegeben werden können. Zusätzlich soll die Wickelrichtung des Fadens (Auf-/Abwickeln), sowie die Tänzerhöhe durch den Bediener festgelegt werden können. Dieser soll außerdem die Möglichkeit haben, eine Referenzfahrt zu initiieren. Nachfolgend ist in Abbildung 1 ein Schema der Bedienoberfläche für die Benutzereingaben dargestellt. Die Programmierung und der Zugriff auf die Bedienoberfläche erfolgt über die Visualisierungsfunktion Entwicklungsumgebung Beckhoff TwinCAT3.

<input type="checkbox"/> Achsen initialisiert	<input type="radio"/> Referenzieren starten
<input type="checkbox"/> Achsen in Betrieb	<input type="checkbox"/> Achsen referenziert
$V_{\text{soll}}$ [m/s] : <input type="text"/>	<input type="radio"/> Aufwickeln(On)/ Abwickeln(Off)
$t_{\text{Beschl.}}$ [s] : <input type="text"/>	<input type="radio"/> Vorgang Starten
$t_{\text{Brems.}}$ [s] : <input type="text"/>	<input type="radio"/> Vorgang Stop
Tänzerhöhe [cm]: <input type="text"/>	

Abbildung 4: Schematische Darstellung einer möglichen Bedienoberfläche (eigene Darstellung, 2022)

Im Allgemeinen ist bei der Umsetzung auf eine physikalische Darstellung nach dem internationalen Einheitssystem (SI) zu achten. Weiter sind die physikalischen Grenzwerte mit Rücksicht auf Sach- und Personenschäden auszulegen. Bei der Programmierung des Systems ist zudem auf das Abfangen von Fehlereingaben, sowie auf das umfängliche Darstellen des Anlagenzustandes in der Visualisierung zu achten.

## Umsetzung

Die Umsetzung erfolgte am realen Versuchsaufbau. Dazu wurden zunächst alle Komponenten in Betrieb genommen, bevor mit der Bearbeitung der Aufgabenstellung begonnen werden konnte.

### Inbetriebnahme des Seilzugsensors und des Drehgebers [Alexander Stark]

Der digitale Inkremental-Drehgebersensor (S1) und der analoge Seilzugsensor (S2) sind an den Buskoppler der Anlage angebunden. Für den Drehgebersensor ist dazu ein spezielles Gebermodul im Koppler integriert, für den Seilzugsensor ein Analogmodul. Der Buskoppler wandelt die Signale in digitale Signale um, die über das Gateway via EtherCAT an die Steuerung übertragen werden. Für die Einbindung in das Programm müssen die Sensoren

zunächst linearisiert und die Werte in sinnvolle physikalische Größen nach dem SI-Einheitensystem gewandelt werden.

S1 deckt einen Messbereich von 1m ab. Aus dem technischen Datenblatt geht dabei eine Linearität mit einer Abweichung von  $\pm 0,5\%$  hervor (WayCon). Der Analogausgang liefert einen Sensorwert, der entsprechend interpretiert werden muss. Durch das folgende Schaubild wird der lineare Verlauf der Sensorgröße und das Verhältnis zwischen der vom Sensor erfassten Tänzerhöhe in Inkrementen und der tatsächlich gemessenen Tänzerhöhe in cm deutlich. Dazu wurde der an S1 befestigte Tänzer händisch auf eine Höhe gesetzt, anschließend der Sensorwert ausgelesen und mit der gemessenen Höhe in cm verglichen.

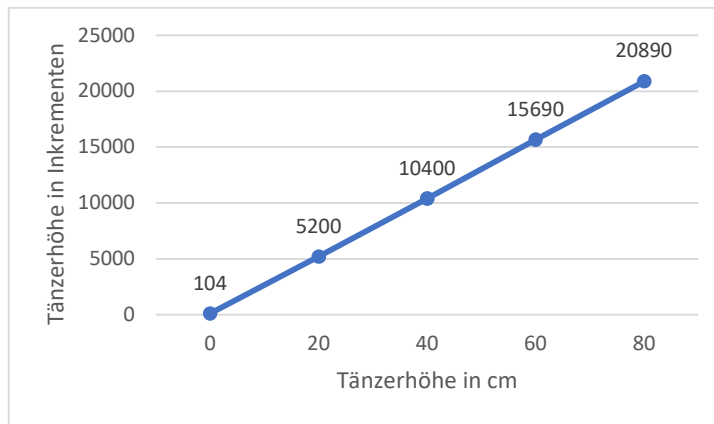


Abbildung 5: Verlauf des Seilzugsensorwerts und Verhältnis der gemessenen Werte (eigene Darstellung, 2023)

Der Sensor zeigt dabei ein Offset von 104 Inkrementen, welches bei der Umrechnung des Sensorwertes beachtet werden muss. Ein einfacher Dreisatz liefert:

$$1 \text{ cm} = 260 \text{ Inc}$$

Die Umrechnung erfolgt durch folgende Formel:

$$\text{Sensorwert in cm} = \frac{\text{Sensorwert in Inc} - 104}{260}$$

Der Inkremental-Drehgeber liefert 1024 Impulse pro Umdrehung in zwei, um  $90^\circ$  versetzten, Kanälen plus einen Nullimpuls zurück. Softwareseitig werden im Gebermodul an beiden Kanälen die steigenden und fallenden Flanken der Impulse ausgewertet, wodurch sich die Auflösung effektiv auf 4096 Impulse pro Umdrehung erhöht. Der Encoder inkrementiert dabei eine 16 Bit Integer Variable für jede Umdrehung von 0 auf 65536. Im folgenden Schaubild ist dieser Vorgang für ca. 1,5 Umdrehungen dargestellt (grün), ebenso ist die Umrechnung der Fadengeschwindigkeit in mm/s dargestellt (blau).

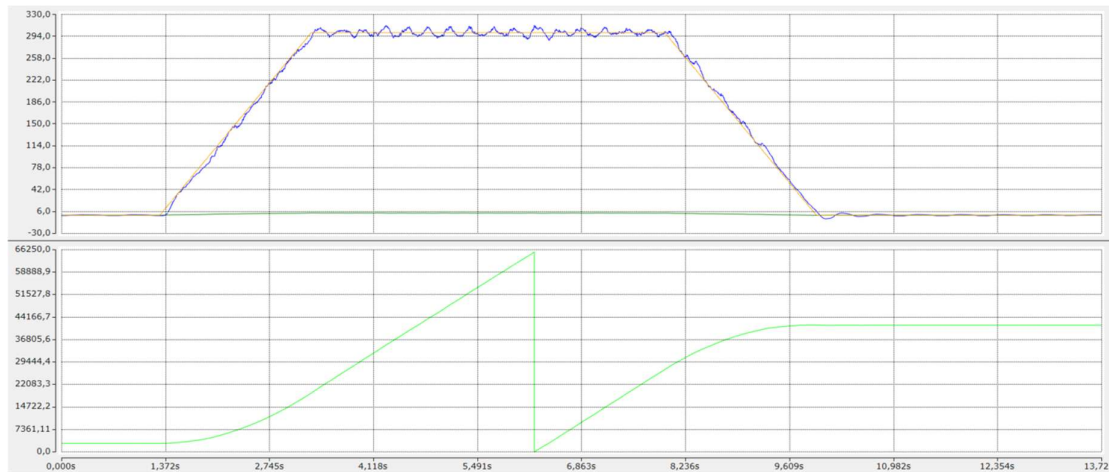


Abbildung 6: Inkremental-Drehgeber Rückgabewert in Inkrementen (grün) und Umrechnung in mm/s (blau) (eigene Darstellung, 2023)

Die Drehgeschwindigkeit des Inkrementalgebers lässt sich durch die Änderung des Wertes über der Zeit darstellen durch:

$$V_{IncPerSec} = \frac{Sensorwert - Sensorwert_{alt}}{\Delta T}$$

$\Delta T$  gibt dabei die Zeitdifferenz in Bezug auf die Zykluszeit des SPS-Tasks (hier 0,2ms) wieder. Über den Durchmesser der direkt an die Welle angeflanschten Drehrolle des Fadens, lässt sich dieser Wert in eine Fadengeschwindigkeit umrechnen (hier mm/s).

$$V_{mmPerSec} = \left( \frac{V_{IncPerSec}}{4096} \right) * \pi * \phi_{Encoder}$$

Bei der programmtechnischen Umsetzung muss darauf geachtet werden beide Drehrichtungen des Sensors abzufragen. Des Weiteren entsteht beim Erreichen des Sensorwerts 0 eine große Differenz, da der  $Sensorwert_{alt}$  noch bei 65536 steht. Durch die hohe Differenz entsteht für einen kurzen Impuls ein sehr hoher rechnerischer Geschwindigkeitswert, welcher sich negativ auf diesem Signal nachfolgende Regelungen auswirken kann. Dies muss im Programm abgefangen werden. Durch die hohe Abtastrate ist es sinnvoll das Signal durch einen Filter für die nachgelagerten Regelungen zu glätten. Hierzu wird ein PT1-Filter eingesetzt. Der PT1-Filter zeigt ein, durch die Filterzeit parametrierbares, Verzögerungsverhalten. Das nachfolgende Schaubild verdeutlicht exemplarisch, wie dieses Verhalten zu einer Aufbereitung des Geschwindigkeitssignals beiträgt. Das blaue Signal bildet dabei das Messsignal ab. Es wird deutlich, mit einer höheren Filterzeit (im Schaubild  $T_{duration}$ ) steigt der Grad der Signalglättung (rot mit niedriger Filterzeit, grau mit höherer Filterzeit). Für diese Zeitkonstante ist im Programm ein sinnvoller Wert zu wählen.

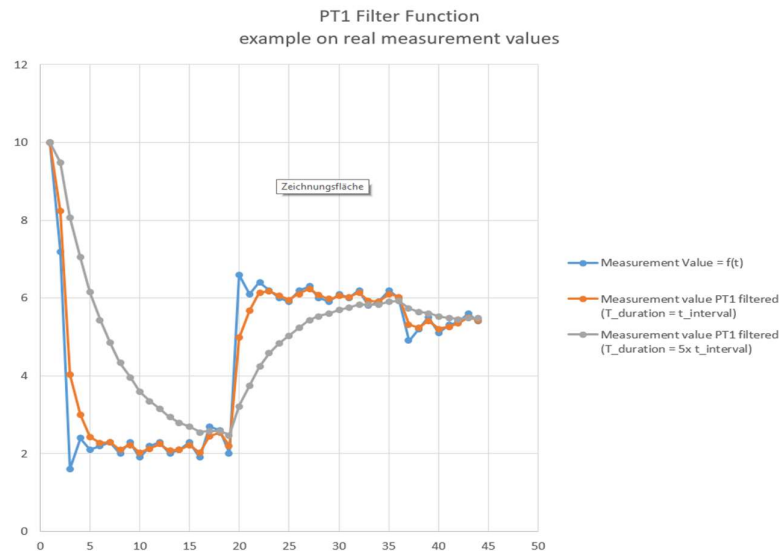


Abbildung 7: Darstellung eines PT1-Gliedes zur Signalaufbereitung (Quelle: Rotronic)

## Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Drehzahlregelung im Antriebsregler [Alexander Stark]

Die Servomotoren befinden sich anfangs in einem Kaskadenregler mit Lage-, Drehzahl- und Stromregelung. Für den Betrieb mit PI-Reglern, welche als Stellgröße einen Drehzahlwert vorgeben, wird die äußerste Kaskade aufgetrennt, sodass die Drehzahlwerte an den Ausgängen der Regler direkt auf die Antriebe übertragen werden können. Dies kann in TwinCAT in den Einstellungen der Antriebe vorgenommen werden. Der Kaskadenregler wird nach der zweiten Kaskade auf einen Drehzahlsollwert umgestellt. Abbildung 8 stellt den umgestellten Kaskadenregler dar.

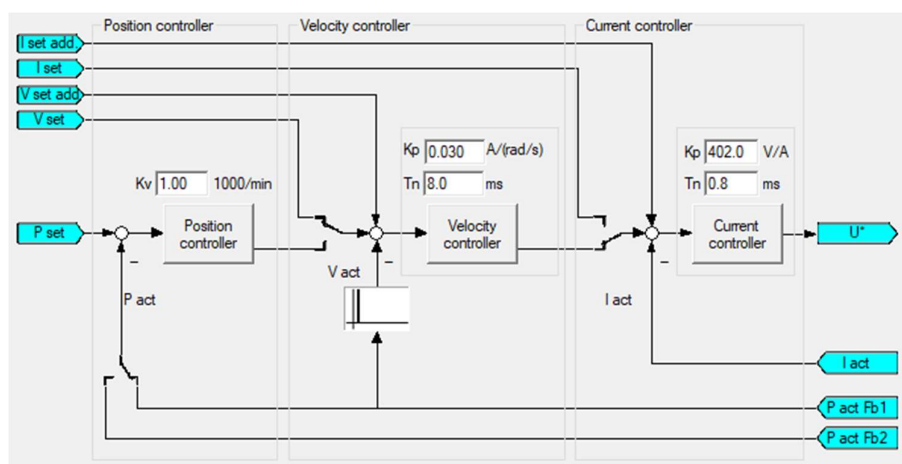


Abbildung 8: Kaskadenregler der Wickelantriebe (TwinCAT XAE Shell, 2023)

## Umsetzung

Für eine mathematische Parametrierung des Drehzahlreglers muss zuerst der innere Regelkreis in der ersten Kaskade für den Moment bestimmt werden, bevor der äußere Regelkreis in der zweiten Kaskade für die Drehzahl bestimmt werden kann. Um diese zeit- und rechenintensive Vorgehensweise zu umgehen, ist eine experimentelle Parametrierung bei der Drehzahlregelung der Achsen erfolgt. Dazu wurde ein Startwert für  $K_p$  und  $T_n$  festgelegt und schrittweise verändert. Festgelegt wurden die Werte für  $K_p=0,03 \text{ A/(rad/s)}$  und  $T_n=8\text{ms}$ . Die Auswertung der Regelung erfolgte anhand zweier Szenarien.

Szenario 1: linke Wickelspule voll, rechte Wickelspule leer, hier exemplarisch:  $\omega = 2 \text{ U/s}$

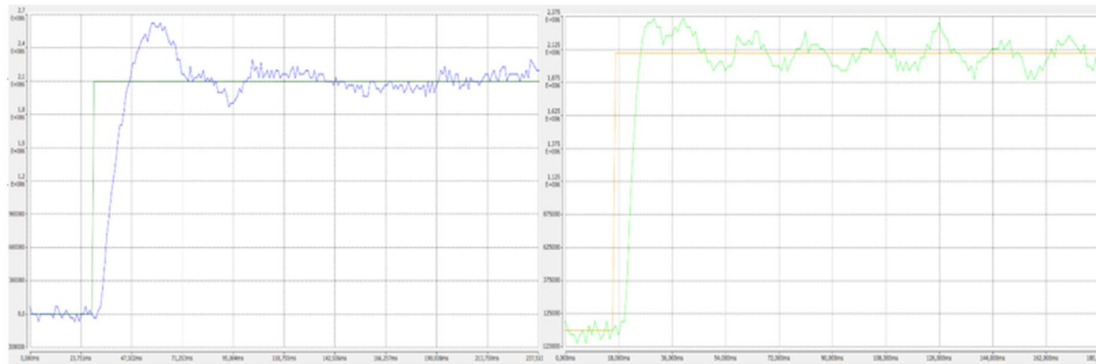


Abbildung 9: Drehzahlverlauf linke Wickelspule voll, rechte Wickelspule leer (eigene Darstellung, 2023)

Szenario 2: linke Wickelspule leer, rechte Wickelspule voll, hier exemplarisch:  $\omega = 2 \text{ U/s}$

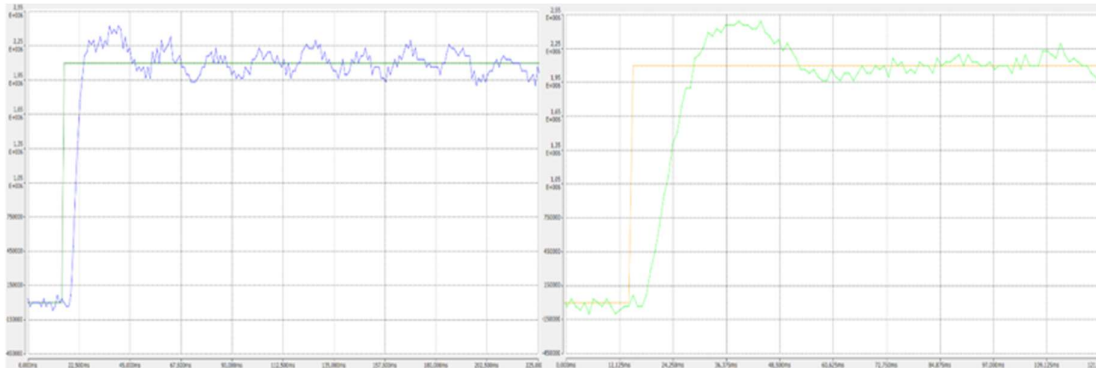


Abbildung 10: Drehzahlverlauf linke Wickelspule leer, rechte Wickelspule voll (eigene Darstellung, 2023)

Das Verhalten beider Antriebe lässt sich in beiden Szenarien durch ein  $PT_2T_1$ -Verhalten beschreiben. Bei den jeweils vollen Wickelspulen zeigt die Drehzahlregelung, vermutlich wegen des erhöhten Massenträgheitsmoments durch den Faden, ein stärkeres Überschwingen. Die Ausregelzeit  $T_{\text{Ausf}}$  und die Überschwingweite, sowie die Schwankungen des Istwertes um die Sollgröße können aus der folgenden Tabelle entnommen werden.

Spule	T_Ausr [ms]		Überschwinger [%]		Istwertschwankung [%]	
	voll	leer	voll	leer	voll	leer
links	41	27	24,9	12,5	±9	±9
rechts	38	28	18,7	15,4	±9	±11

Tabelle 2: Bewertung der Drehzahlregelung in den Antrieben

Die Werte aus der Tabelle bestätigen, dass der Regler bei voller Spule ein sowohl links, als auch rechts, stärkeres Überspringen zeigt. Dies resultiert auch in einer größeren Ausregelzeit. Bei leerer Spule ist der Überschwinger in beiden Fällen nur knapp über dem Rauschen des Ist-Werts.

### Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Lageregelung (Tänzerregelung) unter TwinCAT3 [Alexander Stark]

Ziel der Lageregelung ist es, den Tänzer während des Betriebs auf einer konstanten Höhe zu halten und diese gegebenenfalls auf eine neue Sollwertvorgabe zu regeln. Die Regelgröße ist hierbei die Höhe des Tänzers. Die Stellgröße ist die Drehzahl des rechten Wickelantriebs. Die Störgröße ist die Drehzahl des linken Wickelantriebs, welcher die Geschwindigkeit regelt, mit der der Faden von der linken Spule auf auf- oder abgewickelt wird. Je nach Drehrichtung hat zieht sie den Tänzer entweder nach oben oder lässt ihn nach unten absinken. Die Umsetzung des Lagereglers erfolgt mit Hilfe eines PI-Reglers, der Aufbau kann aus dem folgenden Schaubild entnommen werden.

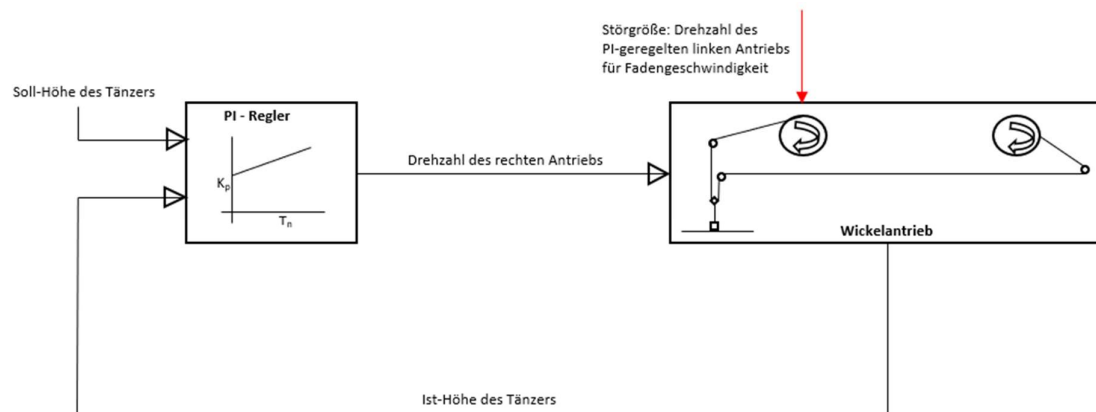


Abbildung 11: Aufbau des PI-Regelkreises für die Lageregelung des Tänzers (eigene Darstellung, 2023)

Die programmtechnische Umsetzung des Lagereglers erfolgt mit Hilfe einer CASE-Anweisung für drei Zustände.

## Umsetzung

---

Zustand 0 (Stillstand):

In diesem Zustand ist der Regler inaktiv. Als Stellwert wird an beider Achsantriebe die Drehzahl  $\omega=0$  ausgegeben.

Zustand 1 (Referenzfahrt):

Bevor die Tänzerregelung aktiviert werden kann, wird der Tänzer mit konstanter Stellwertvorgabe an den rechten Antrieb auf eine Referenzhöhe gefahren. Der linke Antrieb bleibt im Stillstand.

Zustand 2 (Tänzerregelung aktiv mit Grenzwertüberwachung):

Nach der Referenzfahrt findet in diesem Zustand die aktive Regelung statt. Das PI-Regelverhalten wird durch die folgende Funktion dargestellt.

$$\omega_{soll_{rechts}} = k_p * \Delta_{Lage} + \frac{(k_p * T_a)}{T_n} * \Delta_{Lage_{alt}} \text{ mit } \Delta_{Lage}$$

$$= \text{Tänzerhöhe}_{soll} - \text{Tänzerhöhe}_{ist}$$

$$\omega_{soll_{rechts}} = \text{Stellwert für rechten Antrieb}$$

$$k_p = \text{Verstärkungsfaktor}$$

$$\Delta_{Lage} = \text{Differenz zwischen Lagesollwert und Lageistwert}$$

$$T_a = \text{Abtastzeit}$$

$$T_n = \text{Nachstellzeit}$$

Zusätzlich findet eine Grenzwertüberwachung statt, welche im Falle eines Erreichens der Systemlagegrenzen die Antriebe in den Zustand 0 versetzt. Die ermittelten Drehzahlsollwerte werden direkt an den Drehzahlregler des Antriebs übermittelt.

Für die Parametrierung des PI-Reglers wird ein Drehzahlsprung von 0 U/s auf 3 U/s auf den rechten Antrieb gegeben, bei stillgesetztem linkem Antrieb (vgl. Abbildung 12).



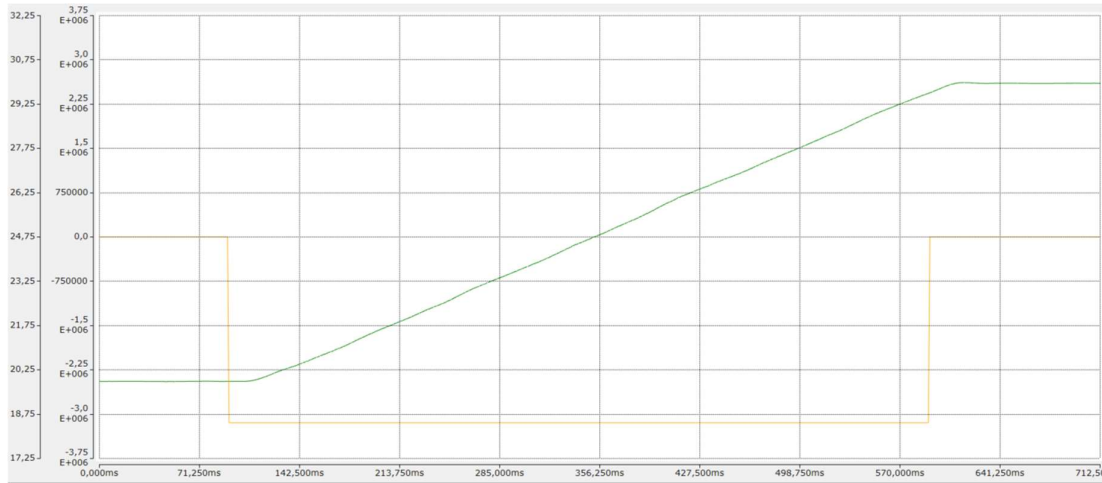


Abbildung 12: Sprungantwort Tänzer auf eine Drehzahländerung des rechten Antriebs (eigene Darstellung 2023)

Die Auswertung der Sprungantwort ergibt:

$$K_s = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{10,11 \text{ cm}}{3 \frac{U}{s}} = 3,37 \frac{\text{cm}}{\frac{U}{s}}$$

$$T_1 = 0,9 * (T_{75\%} - T_{25\%}) = 0,9 * (0,462 \text{ s} - 0,219 \text{ s}) = 0,219 \text{ s}$$

$$T_t = 13 \text{ ms}$$

Damit lassen sich die Parameter für die Reglereinstellung berechnen durch:

$$K_p = \frac{1}{K_s} * \frac{T_1}{T_t - T_r} = \frac{1}{3,37} * \frac{\frac{U}{s}}{\text{cm}} * \frac{0,219 \text{ s}}{2 * 0,013 \text{ s}} = 2,5 \quad \text{mit der Näherung } T_t \approx T_r$$

$$T_n = \min(T_1, 8 * T_t) = \min(0,219 \text{ s}, 0,104 \text{ s})$$

Für den PI-Regler zur Tänzerlageregelung ergeben sich somit die Parameter  $K_p=2,5$  und  $T_n=0,104 \text{ s}$ .

In der Folge wird dem Regler eine Störgröße aufgeschaltet. In Schaubild 13 ist im ersten Diagramm der Verlauf der Tänzer Soll- und Istwerte abgebildet. Anhand des gelben Trapezverlaufs lässt sich die Fadengeschwindigkeit nachvollziehen. Im dritten Diagramm sind die Drehzahlverläufe des linken und des rechten Antriebs zu sehen. Die Geschwindigkeit des Fadens wird auf 750 mm/s gesetzt, gleichzeitig wird die Tänzerhöhe während des Betriebs von 30cm auf 40cm erhöht. Durch die Störgröße erfährt der Regler eine leichte Abweichung von seinem Sollwert in Höhe von 0,8 bis 1 cm. Nach dem Abschalten der Störgröße erreicht er wieder seinen Sollwert. Bei der sprunghaften Sollwertänderung zeigt der Regler ein PT2-Verhalten mit einer Anregelzeit von  $T_{ANR}=57 \text{ ms}$  und einem Überschwingen von 0,9% (berechnet ohne Einfluss der Störgröße). Anhand des abgebildeten Drehzahlverlaufs des rechten Stellantriebs ist zu erkennen, dass durch die

## Umsetzung

schnelle Anpassung der Tänzerhöhe durch den Regler eine hohe mechanische Kraft auf den Faden ausgeübt wird. Diese ließe sich durch eine rampenförmige Annäherung an den neuen Sollwert reduzieren. Des Weiteren besteht bei dem entwickelten PI-Algorithmus optimierungsbedarf bezüglich des Störgrößenausgleichs. Denkbar wäre hier eine zusätzliche Störgrößenaufschaltung, um die bleibende Regeldifferenz zu reduzieren.

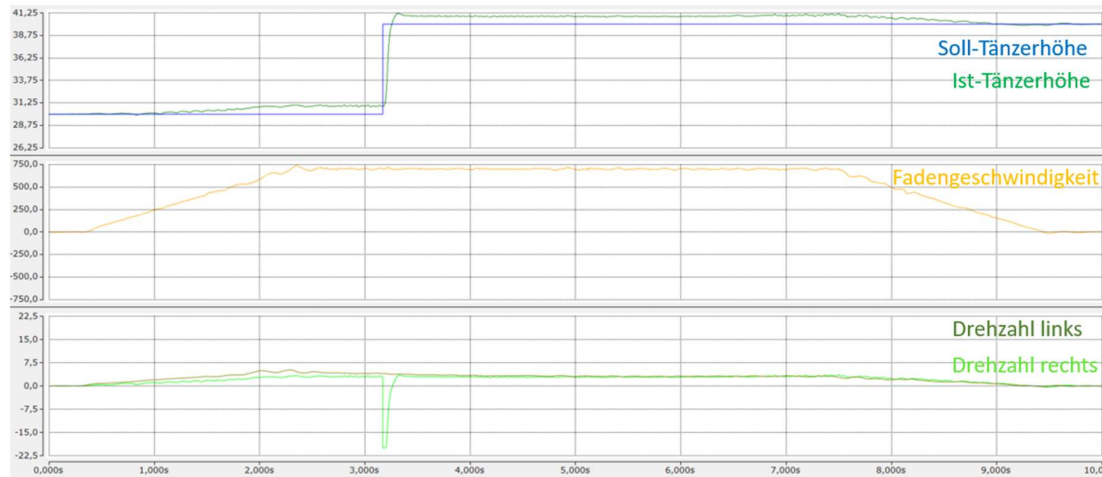


Abbildung 13: Tänzerregelung mit PI-Regelalgorithmus (eigene Darstellung, 2023)

Erst wenn die Tänzerregelung aktiv ist, kann die Geschwindigkeitsregelung gestartet werden.

### Aufbau, Parametrierung und Bewertung der Fadengeschwindigkeitsregelung [Kiran Krishnakumar]

Um die Fadengeschwindigkeit zu regeln wird ein PI-Regler verwendet, der die Drehzahl des linken Antriebs steuert. Die Drehzahl des rechten Antriebs wird ebenfalls von einem PI-Regler für die Tänzerregelung geregelt.

Abbildung 14 zeigt den Regelkreis. Da die aktuelle Fadengeschwindigkeit vom Encoder aufgrund des niedrigen Task Cycle stark schwankt, wird ein Filter verwendet, um den Geschwindigkeitswert vom Encoder zu stabilisieren. Der Eingang des PI-Reglers sind Soll- und Ist-Fadengeschwindigkeit und der Ausgang ist die Drehzahl des linken Antriebs.

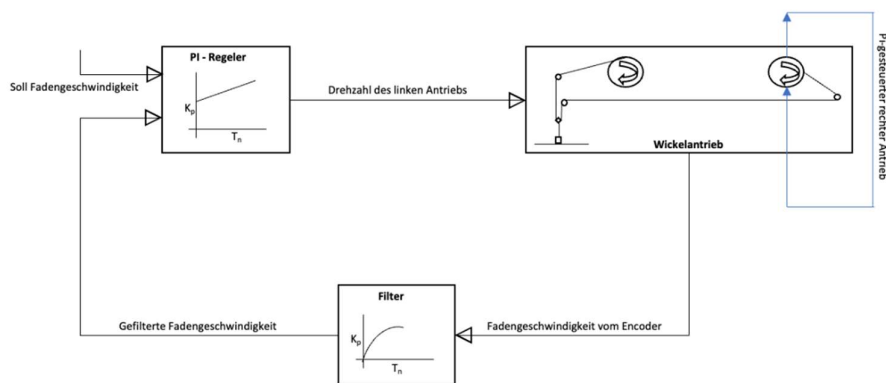


Abbildung 14 PI-Regelkreis für die Fadengeschwindigkeitsregelung

### Berechnung der Regler-Parameter

Zur Berechnung der Parameter für den PI-Regler wurde dem linken Antrieb eine Sprungantwort von 0 bis 2 U/s gegeben. Die Sprungantwort der Fadengeschwindigkeit wurde in mm/s aufgezeichnet.

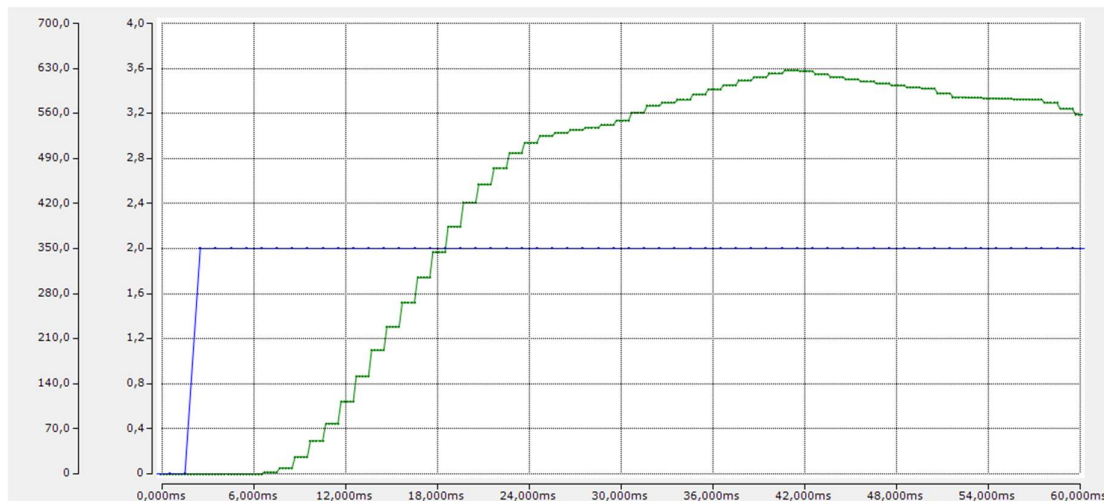


Abbildung 15 Sprungantwort: Fadengeschwindigkeit und Drehzahl des linken Antriebs

$$Ks = \frac{\Delta y(\text{Messbereich})}{\Delta u(\text{Stellbereich})} = \frac{555,60 - 0}{2 - 0} = 277,8 \text{ mm/U}$$

$$\text{Zeitkonstante: } T1 = 0,9 (T75\% - T25\%) = 0,9(0,18 - 0,11) = 0,063s$$

$$\text{Totzeit: } Tt = 0,004s \text{ (von Abbildung 15)}$$

$$Kp = \frac{T1}{Ks * 2Tt} = \frac{0,063}{277,8 * 2 * 0,004} = 0,028 \text{ U/mm}$$

$$Tn = \min\{T1: 8Tt\} = \min\{0,063: 0,032\} = 0,032 \text{ s}$$

### Automatisiertes Auf- und Abwickeln eines Fadens bei parametrierbarer Tänzerhöhe, Fadengeschwindigkeitsprofilen und Reglerparametern [Alexander Stark]

Für den Betrieb des Fadenwicklers ist ein automatisierter Ablauf vorgesehen. Eine vorgegebene Fadenlänge (Wickellänge) wird mit einer bestimmten Geschwindigkeit und Beschleunigung, bei parametrierbarer Tänzerhöhe, ab- oder aufgewickelt. Das Geschwindigkeitsprofil entspricht dabei einem Trapez oder einem Dreieck. Die aktuelle Fadenlänge auf den Spulen wird im Betrieb angezeigt.

Dabei wird mittels einer Referenzierung, die automatisiert oder händisch ablaufen kann, die Fadenlänge auf der Spule ermittelt. Vorgegeben werden kann ob, ob die linke Spule voll oder leer sein soll. Das Programm wickelt automatisch auf diese Spule auf oder ab und stoppt die Achse rechtzeitig. Möglich ist dies durch die Abfrage der Fadengeschwindigkeit am externen Drehgeber. Bei einer fest vorgegebenen Drehzahl des Motors ändert sich die erfasste Fadengeschwindigkeit mit zu- oder abnehmenden Wickeldurchmesser auf der Spule (vgl. rote Linie in Abb. 16 für eine abwickelnde Referenzierung). So kann ein Schwellwert für die abgewickelte Spule festgelegt werden, bei welcher der Referenzierungsprozess zu Ende ist. Durch den mit zunehmendem Durchmesser ungeordneter aufgewickelten Faden entstehen Schwankungen im erfassten Geschwindigkeitssignal. Erst bei einem weitgenug abgenommenen Durchmesser wird das Signal sauberer (vgl. Abb. 16), weil der Faden in einer sauberen Spirale auf der Kordel verläuft. Aus diesem Grund ist beim Abwickeln eine genauere Referenzierung möglich als bei Aufwickeln. Zusätzlich kann zu einem beliebigen Zeitpunkt ein manueller Stopp ausgelöst und die verbleibenden Längen auf den Spulen händisch eingetragen werden.

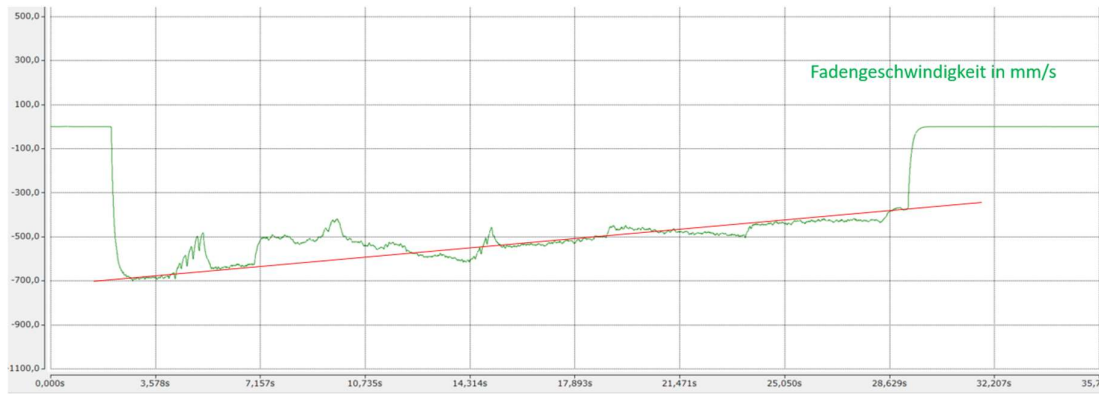


Abbildung 16: Automatische Referenzierung "Abwickeln"

Erst wenn eine Referenzierung für die Fadenlänge abgeschlossen ist, kann im Betrieb die Länge des Fadens auf den Spulen ermittelt und aktuell gehalten werden. Die Berechnung der Fadenlänge auf der Spule erfolgt beispielhaft mit der Formel für den linken Antrieb:

$$Länge_{links} = Länge_{links} + V_{Faden} * T_a, \text{ mit } V_{Faden} \text{ in } \frac{mm}{s} \text{ und } T_a = \text{Zykluszeit in } s$$

Für den Automatikablauf wurde wieder ein Funktionsbaustein mit einer Case-Anweisung erstellt.

Zustand 0 (Stillstand):

Der linke Antrieb wird auf die Drehzahl  $\omega = 0$  gestellt, der rechte Motor befindet sich in Tänzerregelung.

Zustand 1 (Verfahren in Trapez oder Dreieckprofil):

Zunächst wird die, für die vorgegebene Fadenlänge und Anstiegszeit des Profils benötigte, Beschleunigung ermittelt mit

$$a = \frac{v_{ziel}}{T_{Anstieg}}$$

Im Anschluss wird das Verhältnis von Beschleunigung zu ab- oder aufzuwickelnder Fadenlänge ermittelt. Reicht die ermittelte Beschleunigung aus, um innerhalb der vorgegebenen Wickellänge  $v_{ziel}$  zu erreichen, wird ein Trapezprofil abgefahren. Reicht die Beschleunigung nicht aus, wird ein Dreieckprofil vorgegeben. Abbildung 17 zeigt exemplarisch die Berechnung für ein Trapezprofil. Die Zeit  $t$  fängt bei 0s an zu zählen und wird gestartet, sobald der Baustein aktiv wird. Für die fallende Rampe wird das Delta zwischen der aktuellen Zeit und dem Umschaltzeitpunkt zwischen konstanter Fahrt und fallender Geschwindigkeit ermittelt. Die Berechnung der Umschaltzeitpunkte erfolgt durch:

$t_{\text{zyklus}} = \text{Taskcycle des Programms}$

$t_0 = \text{Startzeitpunkt wenn FB aktiv wird}$

$t_a = \text{eingegebene Anstiegszeit}$

$$t_{\text{ganz}} = \frac{\text{Wickellänge}}{|v_{\text{soll}}|} + t_a$$

$$t_{\text{const}} = t_{\text{ganz}} - 2 * T_a$$

Anhand der errechneten Zeitpunkte erfolgt der Übergang zwischen den Rampen. Der Verlauf ist ebenfalls in Abbildung 17 abgebildet. Geht aus dem Verhältnis von Beschleunigung zu Wickellänge ein Dreieckprofil hervor, erfolgt die Berechnung äquivalent ohne die konstante Fahrt.

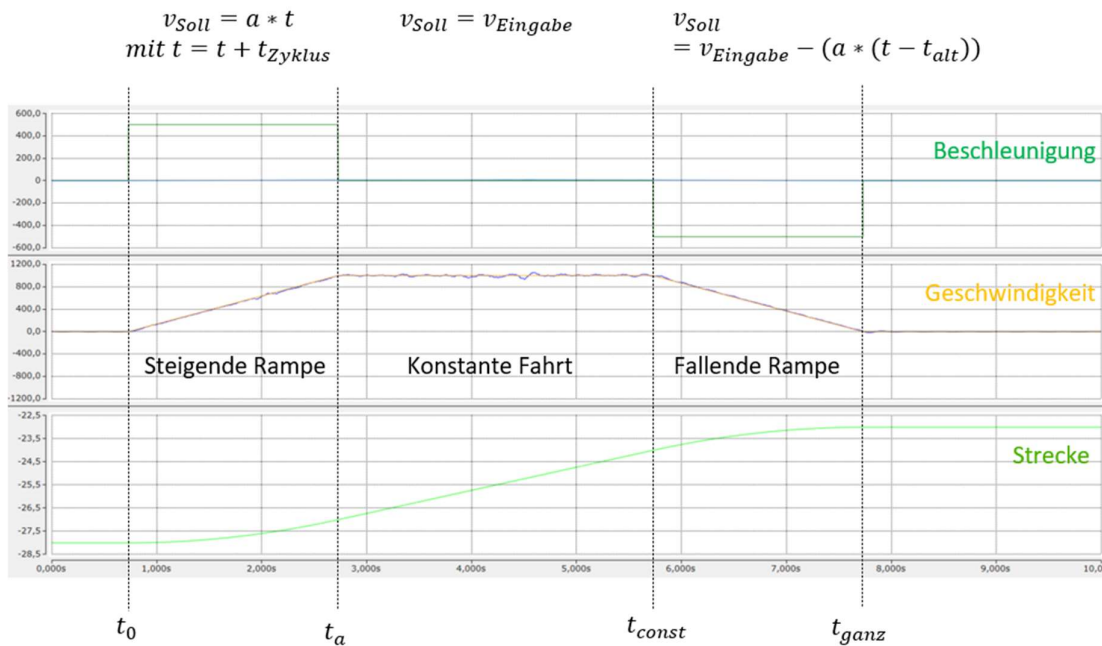


Abbildung 17: Darstellung und Berechnung des Trapezprofils.

Zustand 2 (konstante Fahrt, „Handmodus“):

Im Handmodus kann über die Eingabe durch das Weglassen einer Eingabe für die Wickellänge eine Fahrt mit der eingegebenen Fadengeschwindigkeit initiiert werden.

### Ermittlung des Schlupfes am Drehgeber bei unterschiedlichen Fadengeschwindigkeiten [Kiran Krishnakumar]

Für die Ermittlung des Schlupfes wird ein Punkt im Faden markiert und das System mit verschiedenen Einstellungen hin und her gefahren. Der Test wurde fünfmal für jedes Szenario durchgeführt und der Durchschnitt berechnet. Alle Versuche sind in Tabelle 3 festgehalten. Einige der Annahmen aus dem Test sind unten aufgeführt. Wenn sich die Fadengeschwindigkeit verdoppelt, verdoppelt sich auch der Schlupf ungefähr. Dieser Trend ist zu erkennen, wenn die Fadengeschwindigkeit von 300 mm/s auf 600 mm/s mit einem Anstieg von 1 und 2 Sekunden steigt. Beide Male wurde der Schlupf verdoppelt. Bei einer geringeren Anstiegszeit ist ein etwas höherer Schlupf zu beobachten (Tabelle 3). Dieser höhere Schlupfwert ist möglicherweise auf ein kleines Versagen des PI-Reglers bei abrupten Änderungen des Sollwerts zurückzuführen. Ein weiterer Punkt, den wir aus Tabelle 3 entnehmen können, ist die Zunahme des Schlupfes bei zunehmender Fadenlänge. Dieser Schlupf ist darauf zurückzuführen, dass das unkontrollierte Aufwickeln des Fadens eine ungleichmäßige Wicklung verursacht. Aus diesem Grund ergibt jede Umdrehung des Antriebs keine gleichmäßige Fadenlänge.

*Tabelle 3 Vergleich des Schlupfs bei verschiedenen Einstellungen*

Versuchs-Nr.	Länge in m	v_faden_soll mm/s	T_anstieg in s	Schlupf in cm	Durschnittlicher Schlupf
1	2	300	2	0,8	1,46
2	2	300	2	-1	
3	2	300	2	0,5	
4	2	300	2	0	
5	2	300	2	5	
6	2	300	1	1,5	1,56
7	2	300	1	2	
8	2	300	1	1	
9	2	300	1	-2,5	
10	2	300	1	-0,8	
11	2	600	2	-1,8	2,82
12	2	600	2	0,8	
13	2	600	2	8,5	

## Umsetzung

14	2	600	2	1,6	3,36
15	2	600	2	-1,4	
16	2	600	1	-5,5	
17	2	600	1	1,1	
18	2	600	1	-2,8	
19	2	600	1	5,4	
20	2	600	1	2	5,34
21	5	900	2	1,8	
22	5	900	2	-14	
23	5	900	2	0,8	
24	5	900	2	-3,8	
25	5	900	2	-6,3	
26	5	900	1	-8,5	5,04
27	5	900	1	11,8	
28	5	900	1	0,6	
29	5	900	1	1,8	
30	5	900	1	2,5	
31	15	1000	2	8	7,2
32	15	1000	2	-3,5	
33	15	1000	2	15	
34	15	1000	2	-1,5	
35	15	1000	2	-8	
36	15	1000	1	10	14
37	15	1000	1	-23	
38	15	1000	1	15	
39	15	1000	1	0	
40	15	1000	1	22	

### Schaffung einer geeigneten Bedienoberfläche [Kiran Krishnakumar]

Mit der TwinCat3-Visualisierung wird eine Schnittstelle für die Bedienung der Anlage geschaffen. Abbildung 18 zeigt die erstellte Visualisierung. Die Visualisierung ist in drei Teile gegliedert. Im oberen Teil der Visualisierung kann der Nutzer die linken und rechten Antriebe freigeben, den aktuellen Status der Antriebe ablesen und die Fehler zurücksetzen.



Im mittleren Teil der Visualisierung können auf der linken Seite die PI-Regler-Parameter für die Drehgeschwindigkeit des rechten Antriebs eingestellt und auf der rechten Seite die aktuelle Tänzerhöhe und Fadenlänge im rechten und linken Antrieb abgelesen werden. Unterhalb der Einstellung zur Drehgeschwindigkeit kann durch Betätigung eines Schalters der Faden wieder referenziert werden. Zusätzlich kann der Nutzer auf der linken Seite die gewünschte Tänzerhöhe einstellen. Im unteren Teil der Abbildung kann der Benutzer auf der linken Seite die Parameter für den PI- und den Fadengeschwindigkeitsfilter für die Fadengeschwindigkeitsregelung eintragen. Auf der rechten Seite können Daten für Fadengeschwindigkeiten, Fadenlängen und Anstiegszeiten des Fadens eingegeben werden.

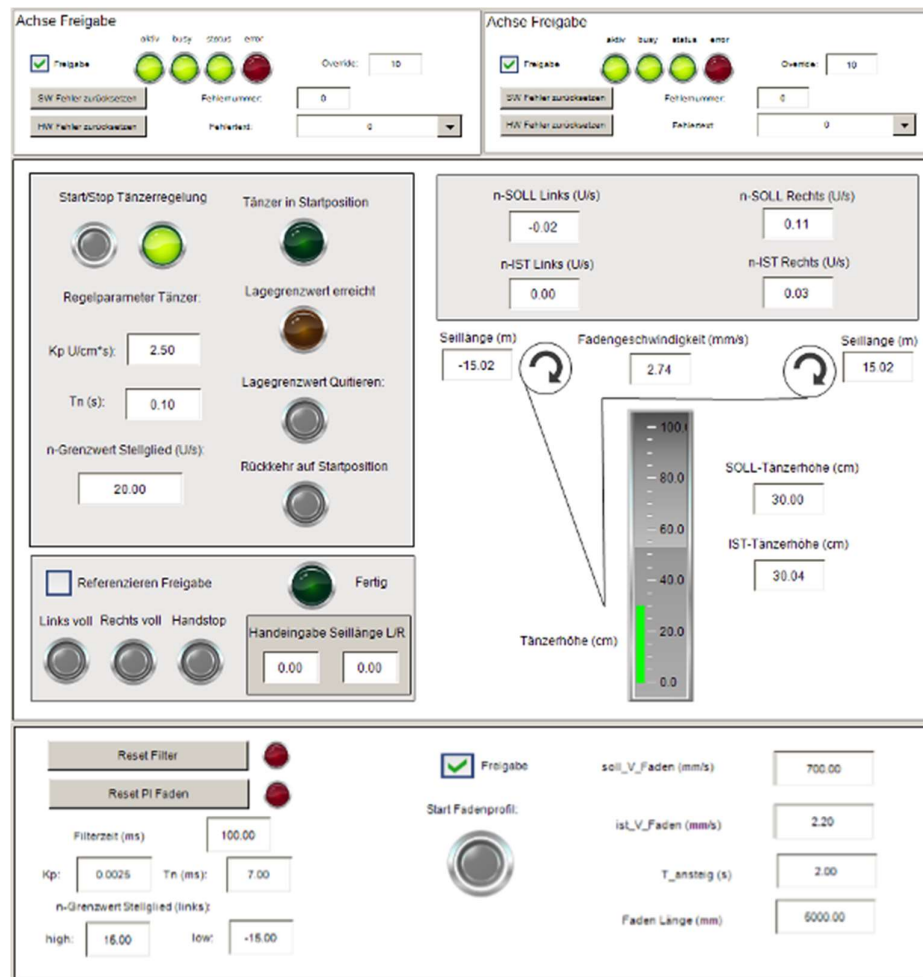


Abbildung 18 die Bedienoberfläche für die Steuerung des Wickelantriebs

## Zusammenfassung und Ausblick [Kiran Krishnakumar]

Die Tänzerhöhenregelung und die Fadengeschwindigkeitsregelung wurden im Projekt Wickelantrieb entwickelt. Für diese Regelung wird im rechten Antrieb ein PI-Regler für die Tänzerregelung und im linken Antrieb für die Fadengeschwindigkeitsregelung eingesetzt.

Ein PT1-Filter wird verwendet, um den Ist-Wert der Fadendrehzahl aus dem Encoder zu filtern, da die Daten stark schwanken. Der Sollwert der Fadendrehzahl wird in einem Trapez- oder Dreiecksprofil ausgegeben, um eine bessere Kontrolle der Fadendrehzahl zu erreichen. Zusätzlich wurde eine automatische Referenzierung zur Messung der Fadenlänge realisiert. Das Schlupfverhalten des Systems wurde überprüft, und es wurde ein akzeptabler Wertebereich erreicht. Aufgrund der begrenzten Zeit für das Projekt sollten zukünftige Arbeiten eine geführte Aufwicklung des Fadens haben, damit das System bei hohen Fadengeschwindigkeiten stabiler ist und auch den Schlupf reduzieren kann. Zweitens sollte für zukünftige Entwicklungen ein steigender Ist-Wert anstelle eines abrupten Wertes für die Tänzerhöhe angegeben werden, um eine bessere Kontrolle des Antriebs zu erreichen. Letztendlich deckt das Programm alle kleineren Sicherheitsbedingungen ab, um sicherzustellen, dass der Benutzer nicht versehentlich einen Systemfehler auslöst. Weiter kann das Programm so geändert werden, dass der Benutzer den Wert der Fadengeschwindigkeit im Trapez- und Dreiecksprofil ändern kann.

## Quellenverzeichnis

Weidenbach, B. (2022). Verkaufte Auflage der Süddeutschen Zeitung bis zum 3. Quartal 2022. Retrieved from [https://de.statista.com/statistik/daten/studie/382110/umfrage/auflage-der-sueddeutschen-zeitung/eutsche Zeitung - Auflage 2022 | Statista](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/382110/umfrage/auflage-der-sueddeutschen-zeitung/eutsche-Zeitung-Auflage-2022-Statista)

Kiel, E. (2007). Antrieblösungen: Mechatronik für Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

WayCon (2023). Retrieved from <https://www.waycon.de/fileadmin/seilzugsensoren/Seilzug-Sensor-SX50.pdf> (22.01.2023)

Rotronic (2023). Retrieved from <https://service.rotronic.com/forum/filedata/fetch?id=464&d=1560869844> (22.01.2023)