



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Lukas Zebulka

Entwicklung einer Bahnkantenregelung für
die Pegelanzeige an den St. Pauli
Landungsbrücken

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Lukas Zebulka

**Entwicklung einer Bahnkantenregelung
für die Pegelanzeige an den St. Pauli
Landungsbrücken**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Mechatronik
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Hamburg Port Authority AöR
Abteilung: Maschinenbauservice
Veddeler Damm 14
20457 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jochen Maaß
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Mathias Lehmann

Abgabedatum: 02.02.2019

Zusammenfassung

Lukas Zebulka

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung einer Bahnkantenregelung für die Pegelanzeige an den St. Pauli Landungsbrücken

Stichworte

Regelung, Bahnkantenregelung, Steuerung, Pegelanzeige, Gabellichtschranke, Linearmotor

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Bahnkantenregelung, um die lateralen Bewegungen des Tuches, der nach historischem Vorbild neu entwickelten Pegelanzeige, auszugleichen.

Lukas Zebulka

Title of the paper

Designing a web edge guider for the level display at St. Pauli Landungsbrücken

Keywords

Feedback control, web edge guiding, control, level display, fork light barrier, linear motor

Abstract

This report describes the designing of a web edge guider, in order to eliminate lateral displacement of the web, contained in the level display, which is built alike the historical model.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Abkürzungen und Symbole.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Aufbau und Funktionsweise der Pegelanzeige.....	4
2.1 Mögliche Ursachen für schiefen Lauf einer Bahn.....	6
2.2 Maßnahmen gegen Schiefelauf.....	8
3 Bahnkantenregelungen.....	10
3.1 Aufbau gängiger Stellmechanismen für Bahnkantenregelungen.....	10
3.1.1 Auswahl des Systems.....	13
4 Theorie zu Reglern.....	14
4.1 Definition Regelung.....	14
4.2 Mathematische Grundlagen eines PID-Reglers.....	14
4.3 Regler dimensionieren.....	17
4.3.1 Empirische Methoden.....	17
4.3.2 Einstellregeln zum Dimensionieren.....	18
5 Auswahl von Sensor und Aktor.....	21
5.1 Sensoren.....	21
5.2 Aktoren.....	23
6 Montage der verwendeten Komponenten.....	25
6.1 Verwendete Komponenten.....	25
6.2 Montage.....	30
7 Programmablauf.....	31
8 Entwickeln der Reglerparameter.....	34
9 Ergebnisse, Bewertung und Ausblick.....	35
10 Literaturverzeichnis.....	V

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Geschlossener Regelkreis.....	1
Abb. 1-2 Pegelturm wasserseitig.....	2
Abb. 2-1 Prototyp Rückseite	4
Abb. 2-2 Prototyp Rückseite	4
Abb. 2-3 Torsionsfeder	5
Abb. 2-4 Bahn mit unterschiedlich langen Kanten; Schema.....	6
Abb. 2-5 Verwendetes Tuch.....	7
Abb. 2-6 Schiefe Bahn mit gleich langen Kanten; Schema	8
Abb. 2-7 Balligkeit auf Umlenkrolle	9
Abb. 3-1 Drehrahmensystem Seitenansicht.	10
Abb. 3-2 Drehrahmensystem Draufsicht.	10
Abb. 3-3 Schwenkschiebwalzensystem Draufsicht.	11
Abb. 3-4 Schwenkwalzensystem von der Mittellage in zwei Richtungen auslenkbar	12
Abb. 4-1 Sprungantwort.	19
Abb. 6-1 Aufbau Schaltung	25
Abb. 6-2 Arduino Nano	26
Abb. 6-3 Strom zu Spannungswandler.....	27
Abb. 6-4 Motortreiber	28
Abb. 6-5 Relais	29
Abb. 6-6 Verschiebliches Lager	30
Abb. 9-1 Wickelergebnis ohne Regelung	35
Abb. 9-2 Wickelergebnis mit Regelung	35

Abkürzungen und Symbole

DGL	Differenzialgleichung
$d(t)$	Störgröße
$e(t)$	Regelabweichung
K_d	Differenzialverstärkung
K_i	Integralverstärkung
K_p	Proportionalverstärkung
$K_{p_{krit}}$	Proportionalverstärkung bei Dauerschwingen
K_s	Steigung der Wendetangente

T_a	Abtastzeit
T_g	Ausgleichszeit
T_{krit}	Periodendauer bei Dauerschwingen
T_n	Nachstellzeit
T_u	Verzugszeit
T_v	Vorhaltezeit
$u(t)$	Stellgröße (allgemein)
$u_s(t)$	Stellgröße
$w(t)$	Führungsgröße
$y(t)$	Regelgröße

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1 Vergleich Stellsysteme	13
Tab. 4-1 Reglerparameter nach Ziegler/Nichols Schwingungsmethode	18
Tab. 4-2 Reglerparameter nach Ziegler/Nichols mit Sprungantwort	20
Tab. 4-3 Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick mit Sprungantwort	20
Tab. 5-1 Vergleich Sensoren Bahnkantenerkennung	22

1 Einleitung

Technische Regelungen sind aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie präzisieren und beschleunigen eine fast unbegrenzte Anzahl an Prozessen und Anwendungen oder machen diese erst möglich. Sie sind im Alltag allgegenwärtig wie zum Beispiel für die Heizung zuhause zum Regulieren der Wohnraumtemperatur, im Auto in Form einer Geschwindigkeitsregelanlage, in Spielzeugen wie Drohnen zum stabilen Fliegen aber natürlich auch in hochtechnischen Bereichen wie dem Raketenbau oder Kraftwerken.

Erste rein mechanisch geregelte Anwendungen zur Füllstandsregelung eines Behälters wurden bereits 300 v. C. verzeichnet [8]. Ihren Siegeszug traten Regelungen allerdings Mitte des 20. Jahrhunderts an, als analoge sowie digitale Schaltungen immer günstiger, schneller und kleiner wurden.

Grundlage einer jeden Regelung ist ein Vergleich eines gewünschten Zustands eines Systems mit dessen tatsächlichem Zustand. Aus der Abweichung des Ist- vom Soll-Zustand lässt sich ein, die Abweichung ausgleichender, Einfluss auf das System erzeugen. Um die Zusammenhänge beschreiben zu können, werden Differenzialgleichungen eingesetzt. Prinzipiell wird eine direkte Beziehung zwischen Ein- und Ausgang des Systems beschrieben, wobei der Ausgang, rückgekoppelt auf den Eingang, einen direkten Einfluss auf das Verhalten des Systems hat. Hierbei spricht man von Closed-Loop oder auch dem geschlossenen Regelkreis. Dies ist schematisch in Abb. 1-1 dargestellt.

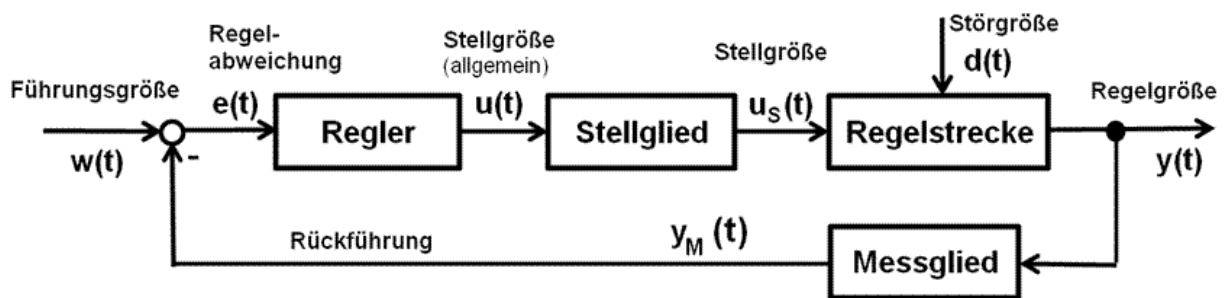


Abb. 1-1 Geschlossener Regelkreis [12]

Die Führungsgröße $w(t)$ beschreibt den gewünschten Zustand, die Regelgröße $y(t)$ den tatsächlichen Zustand und die Differenz daraus ist die Regelabweichung $e(t)$. Die Regelabweichung wird durch Rückkoppeln des Ausgangs auf den Eingang des Systems erzielt.

1 Einleitung

Im Regler werden die mathematischen Operationen durchgeführt, aus denen die Stellgröße $u(t)$ generiert wird. Da Systeme bzw. Regelstrecken sehr unterschiedlich sein können, müssen die Parameter im Regler auf die spezielle Regelstrecke angepasst werden [11, S.7ff]. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit einer Regelung, bei der Nichtlinearitäten durch das Stellglied, das Messglied, den Regler und die Regelstrecke keinen Einfluss auf die Regelung haben oder nicht auftreten. Dementsprechend wird eine Lösung entwickelt, die ein hauptsächlich geometrisches Problem behandelt. Dieses wird in Kapitel 3.1.1 weiter erläutert.

Inhalt der Arbeit:

Aufgrund von nichtvorhandener CE-Konformität und daraus resultierendem hohen Sanierungsaufwand der aktuellen Pegelanzeige an den St. Pauli Landungsbrücken wurde durch die Hamburg Port Authority entschieden, dass die Anlage durch eine neue, nach historischem Vorbild gefertigte Anlage, ersetzt werden soll. Bei der Anlage handelt es sich um ein mit Zahlen bedrucktes Tuch, das je nach vorhandenem Pegelstand der Elbe von einer Trommel auf eine andere Trommel gewickelt wird. Die Zahlen auf dem Tuch stellen den Pegelstand in Dezimetern dar und sind eine unverzichtbare Angabe für die auf der Elbe betriebene Schifffahrt. Abb. 1-2 zeigt den Pegelturm samt Pegelanzeige aus Blickrichtung des Elbverkehrs.

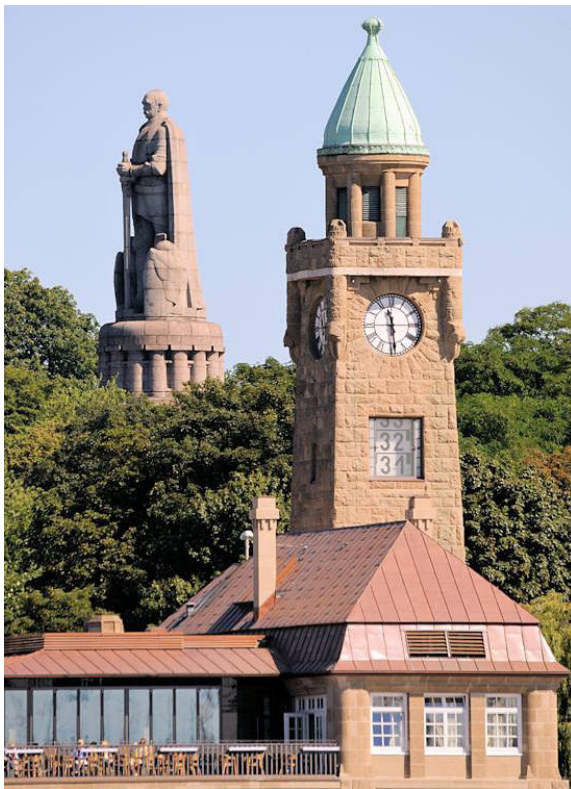


Abb. 1-2 Pegelturm wasserseitig [6]

1 Einleitung

Die neue Anlage ist als Prototyp zu Testzwecken unabhängig vom Standort St. Pauli aufgebaut worden und wird im Folgenden modifiziert. Um gewährleisten zu können, dass das Tuch immer gerade auf die jeweilige Trommel auf- beziehungsweise abgewickelt wird, sprich nicht an den Seiten der Trommeln herunterlaufen kann, wird eine Regelung erarbeitet und umgesetzt.

Der Inhalt dieser Arbeit lässt sich demnach in die folgenden Bereiche unterteilen:

- Zunächst wird die Funktionsweise der Pegelanzeige und deren Aufbau erläutert. Hierbei werden außerdem mögliche Ursachen für einen schiefen Lauf des Tuchs dargestellt und Optionen zum Ausgleich des Schiefenlaufs angeführt.
- Im nächsten Schritt werden gängige Stellmechanismen für Bahnkantenregelungen in ihrem Aufbau verglichen und deren Vor- und Nachteile im Hinblick auf Umsetzbarkeit an der Pegelanzeige sowie deren Komplexität und die daraus entstehenden Kosten gegenübergestellt.
- Die notwendige Theorie für Regler wird erarbeitet. Dabei wird auch auf die üblichen Methoden zur Entwicklung von Reglerparametern eingegangen.
- Für die ausgewählte Art der Bahnkantenregelung bzw. deren Anpassung werden Sensoren und Aktoren anhand von Vergleichen bezüglich Kosten, Nutzen und Anwendbarkeit ausgewählt.
- Der Prototyp wird mit den zuvor ausgewählten Komponenten für die Umsetzung einer Bahnkantenregelung in Betrieb genommen.
- Es erfolgt eine empirische Anpassung der eingestellten Parameter innerhalb des selbst entwickelten Programmablaufs im Probetrieb am Prototyp.
- Nach dem Probetrieb wird eine Auswertung der gesammelten Daten am Prototyp vorgenommen und ein Fazit über die Tauglichkeit der Lösung gezogen.
- Eine Zusammenfassung und ein Ausblick für die Umsetzung der entwickelten Bahnkantenregelung an der realen Anlage bilden den Abschluss dieser Bachelorthesis.

2 Aufbau und Funktionsweise der Pegelanzeige

Mit Hilfe des BLOCAN® Aluprofilsystems der Fa. Rose & Krieger ist ein vier Meter hohes, zwei Meter breites und ein Meter tiefes Ständerwerk zusammengesetzt. Dieses beinhaltet zwei Trommeln sowie zwei Umlenkrollen, welche achsparallel zueinander ausgerichtet sind. Die beiden Trommeln sind lotrecht übereinander angeordnet, ebenso wie die Umlenkrollen ihrerseits, siehe Abb. 2-1 und Abb. 2-2.

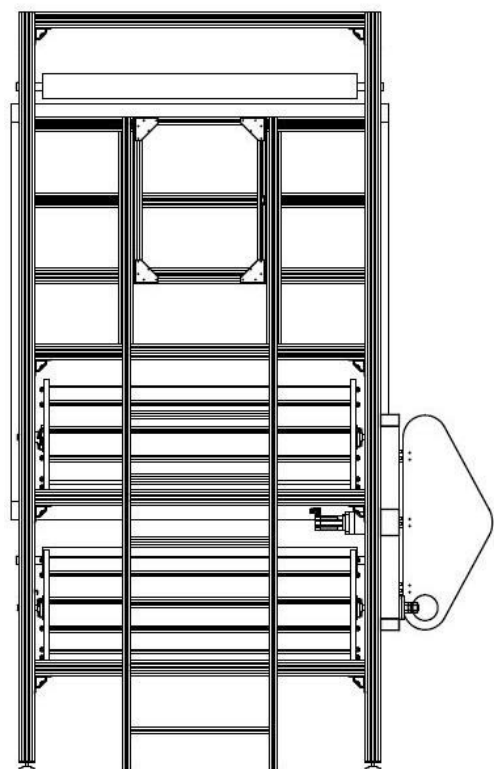


Abb. 2-1 Prototyp Rückseite

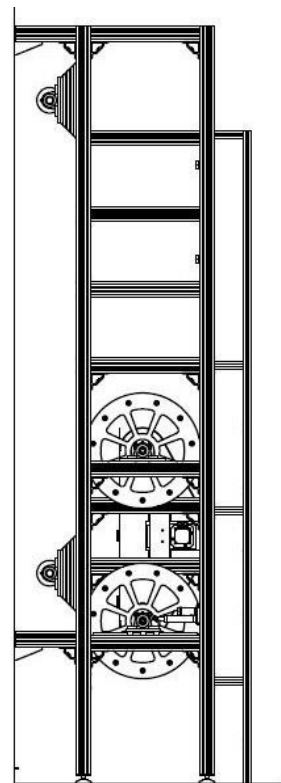


Abb. 2-2 Prototyp Rückseite

Auf die Trommeln ist ein Tuch von 1,55 Metern Breite und ca. 120 Metern Länge aufgewickelt. Die Umlenkrollen sind so angeordnet, dass das Tuch, während es von einer auf die andere Trommel wickelt, in einem Bereich von zwei Metern das Ständerwerk vertikal auf- bzw. abläuft. Dieser Bereich ist durch ein Fenster im Pegelturm St. Pauli von außen für die Schifffahrt sichtbar und gibt den aktuellen Pegelstand der Elbe wieder.

Die beiden Trommeln sind durch einen Zahnriemen miteinander verbunden, welcher über eine Servomotor-Getriebe-Kombination angetrieben wird. Die Riemenscheiben an den Trommeln haben beide denselben Durchmesser, somit drehen die Trommeln mit gleicher Geschwindigkeit und in gleicher Richtung. Die untere Trommel ist zusätzlich mit einer

Lastmomentsperre versehen, welche benötigt wird, um diese Trommel mit einer Torsionsfeder in deren Inneren vorzuspannen. Die besagte Feder im Inneren der Trommel ist eine Anleihe aus einem Garagentor und funktioniert nach demselben Prinzip, siehe Abb. 2-3.



Abb. 2-3 Torsionsfeder

Die Vorspannung wird benötigt, um das Tuch in dem für die Schifffahrt sichtbaren Bereich zu spannen und die Unterschiede im Umfang auf den Trommeln durch verschiedene Status der Aufwicklung auszugleichen. Denn, je mehr Lagen Tuch auf eine Trommel aufgewickelt sind, desto größer ist deren Durchmesser im Bezug zu der anderen Trommel.

Das Tuch ist mit ca. 55 cm hohen aufeinander folgenden Zahlen mit einem jeweiligen Abstand von 80 cm bedruckt. Diese geben den Pegelstand in Dezimeterschritten wieder. An der Seite des Tuchs ist zudem ein Barcode aufgedruckt, welcher die longitudinale Stellung des Tuchs für ein Lesegerät erfassbar macht. Ein gesonderter Pegelsensor an den St. Pauli Landungsbrücken gibt ein Signal an die SPS (**s**peicher**p**rogrammierbare **S**teuerung) der Anlage. Die SPS verarbeitet somit die Informationen vom Pegelsensor und vom Barcodelesegerät und steuert entsprechend der Differenz zwischen Ist-Wert des Pegels und Position des Tuchs den Motor an, die Differenz zu Null zu fahren. Dadurch wird der gemessene Pegelstand im Fenster des Pegelturms durch das Tuch angezeigt.

Bei Testläufen des Prototyps wurde ein Schiefelauf des verwendeten Tuchs festgestellt. Während das Tuch verfährt, läuft dessen Kante zur Seite weg. Mehrmaliges Verfahren verschlechtert die auflaufende Kante zusätzlich.

2.1 Mögliche Ursachen für schiefen Lauf einer Bahn

Für einen störungsfreien Geradeauslauf einer Bahn ist es essenziell, dass alle mit der Bahn in Berührung stehenden Umlenkrollen, Trommeln, Walzen oder ähnliches achsparallel zueinander ausgerichtet sind. Eine Schiefstellung einer Umlenkung hätte zur Folge, dass die Bahn während des Betriebs aufgrund von Reibung lateral versetzt. Diese Reibung entsteht, weil der Einlaufvektor der Bahn nicht orthogonal auf die Umlenkrolle trifft.

Eine weitere Ursache für einen schiefen Lauf stellt die Bahn selbst dar. Diese muss eine isotrope Struktur aufweisen, andernfalls sind unterschiedliche Spannungszustände in der Bahn vorhanden. Diese erzeugen selbst einen von der Laufrichtung abweichenden Einlaufvektor auf die Umlenkrollen, wodurch wiederum Reibung mit Folge von lateralem Versatz entsteht. Auf einer ebenen Fläche ausgerollt, ist in einem solchen Fall eine Bogenform der Bahn zu erkennen, weil eine Kante der Bahn länger ist, als die andere, siehe Abb. 2-4. Dieses gilt auch im betrachteten Fall der St. Pauli Pegelanzeige, in dem die Bahn als Tuch ausgeführt ist, siehe Abb. 2-5.

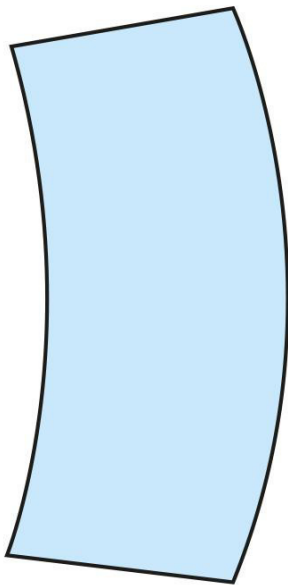


Abb. 2-4 Bahn mit unterschiedlich
langen Kanten; Schema



Abb. 2-5 Verwendetes Tuch

Ein Schiefelauf kann auch entstehen, wenn die Kanten einer Bahn nicht parallel zur idealen Laufrichtung stehen. Eine solche Bahn ist also in sich selbst schief und führt ebenfalls zu lateralem Versatz. Je nachdem wie stark diese Schiefstellung ausgeprägt ist, kann dieses im vorliegenden Fall auch zu Problemen führen. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um ein Problem, welches auf Reibung basiert, sondern abhängig vom Bauraum, in dem die Bahn verwendet wird. Die Kanten dieser Bahn sind zwar gleich lang und können auch parallel

zueinander liegen, sind aber mit einer Abweichung zur idealen Laufrichtung ausgerichtet. Ein Auf- und Abwickeln wäre reproduzierbar. Eine schematische Darstellung ist Abb. 2-6 zu entnehmen.

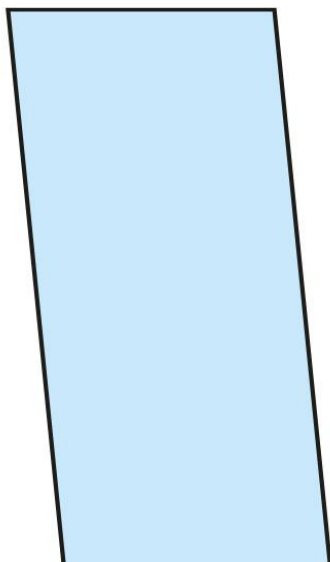


Abb. 2-6 Schiefe Bahn mit gleich langen Kanten; Schema

Alle erwähnten Ursachen können natürlich auch in Kombination miteinander auftreten und müssen demnach nicht nur einzeln, sondern auch in Kombination miteinander beachtet werden, um einen geraden Lauf des Tuches der St. Pauli Pegelanzeige gewährleisten zu können.

2.2 Maßnahmen gegen Schiefelauf

Um einen Geradeauslauf des schiefen Tuches der St. Pauli Pegelanzeige zu gewährleisten, muss die Ausrichtung sämtlicher Umlenkrollen, Trommeln und Walzen mit großer Sorgfalt und hochpräzisen Werkzeugen, wie Wellenwasserwagen kontrolliert und eingestellt werden. Eine ideale Ausrichtung der Komponenten ist praktisch nicht umsetzbar, sondern bestenfalls in eng gesteckten Toleranzbereichen möglich. Deshalb ist ein schiefer Lauf trotzdem möglich, wenn auch gegenüber anderen Faktoren, wie einem schiefen Tuch, vergleichsweise unwahrscheinlich.

Bei der betrachteten Anlage sind Abweichungen der Umlenkrollen und Trommeln zueinander maximal im unteren hundertstel Millimeterbereich messbar. Als Ursache für schiefen Lauf des Tuchs scheidet dies deshalb aus.

Werden eine oder mehrere Umlenkrollen ballig ausgelegt, führt dies auch zu einer Verbesserung des Geradeauslaufs des Tuches. Balligkeit bedeutet, dass der Durchmesser der Umlenkrolle in deren Mitte etwas größer ist als an den Seiten. Dadurch wird eine höhere Spannung in der Mitte des Tuches erzeugt, in Folge dessen es sich selbst zentriert. Bekannt ist dieses Wirkprinzip von Riementrieben bei etwa Dampfmaschinen.

Um dieses Prinzip zu testen, wurde mit Klebeband auf einer Umlenkrolle der Anlage eine Balligkeit aufgebracht. Dazu sind von der Mitte ausgehend und zu den Seiten der Umlenkrolle abnehmend Schichten von Klebeband aufgebracht worden. Die erzeugte Balligkeit von etwa vier Millimetern führte zu einer Verbesserung des Laufes, jedoch nicht endgültig zum gewünschten Ergebnis. Abb. 2-7 zeigt den Versuch.

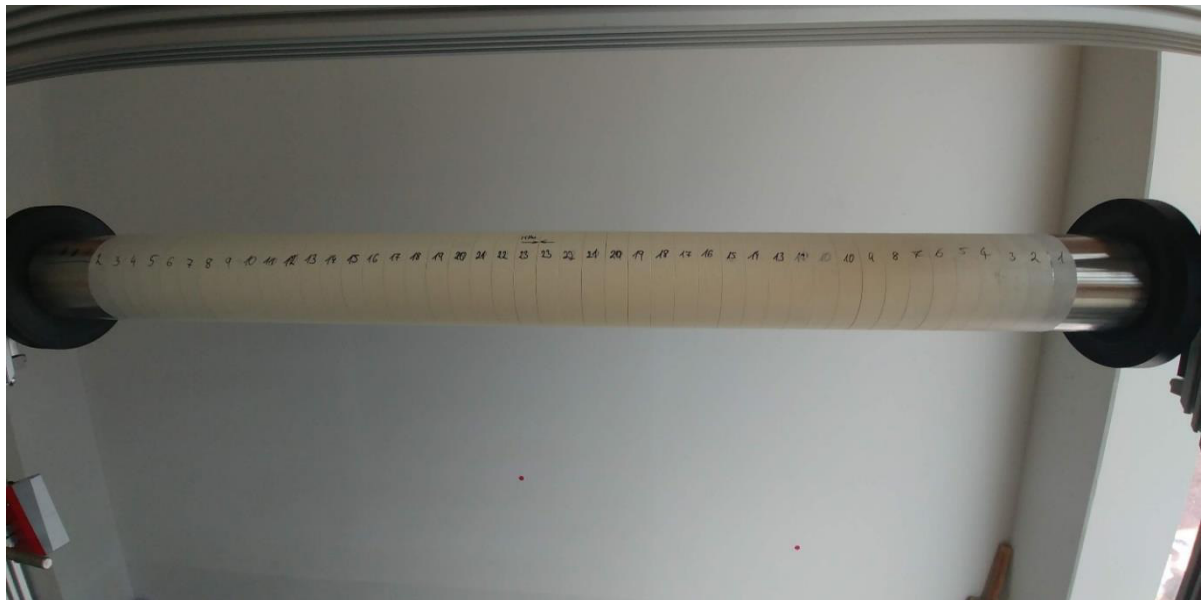


Abb. 2-7 Balligkeit auf Umlenkrolle

Um einen Geradeauslauf des Tuchs der St. Pauli Pegelanzeige zu gewährleisten ist als weitere, aktive Maßnahme eine Regelung geeignet, welche die Grundlage für diese Arbeit stellt.

3 Bahnkantenregelungen

Bahnkantenregelungen stellen mittels Sensoren die Lage einer Bahn fest, vergleichen diesen Wert mit einem Soll-Wert und nutzen die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert, um mit Aktoren einen korrigierenden Einfluss auf die Bahn auszuüben. Dabei kommen unterschiedliche Stellmechanismen zum Einsatz.

3.1 Aufbau gängiger Stellmechanismen für Bahnkantenregelungen

Drei gängige Stellmechanismen sind das Drehrahmensystem, das Schwenkschiebewalzensystem und das Schwenkwalzensystem. Alle Systeme arbeiten mit dem Prinzip des Kraftschlusses. Hierbei wird ausgenutzt, dass Umlenkrollen bzw. Walzen, die schräg zur Laufrichtung der Bahn stehen, zu einer lateralen Bewegung der Bahn führen. Als Aktoren kommen meistens Linearmotoren zum Einsatz. Es können allerdings auch Pneumatik- oder Hydraulikzylinder zur Anwendung kommen.

Drehrahmensystem:

Die zu regelnde Bahn wird in einer U-Form mit jeweils 90° Umschlingung über vier Umlenkrollen gelenkt. Die beiden von der üblichen Bahn abgehobenen Umlenkrollen sind über einem Drehrahmen achsparallel miteinander verbunden. Der Drehpunkt des Drehrahmens befindet sich in der Mitte der vorderen Umlenkrolle des Drehrahmens in der Einlaufebene (siehe Abb. 3-1 und Abb. 3-2).

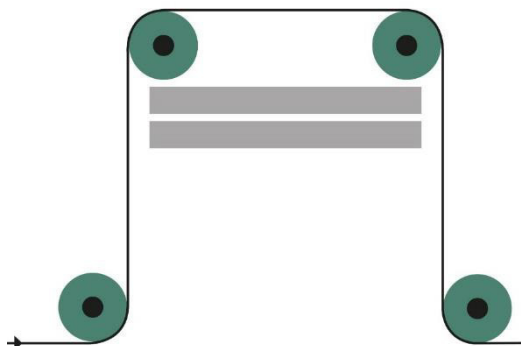


Abb. 3-1 Drehrahmensystem Seitenansicht. In Anlehnung an [3]

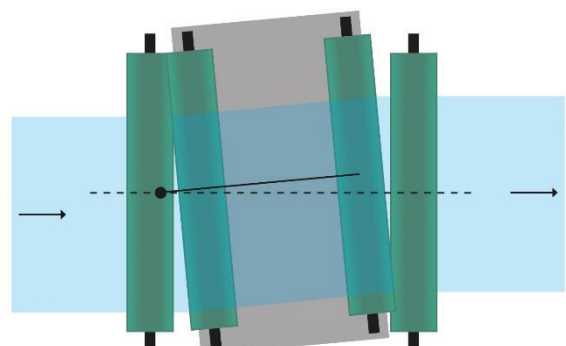


Abb. 3-2 Drehrahmensystem Draufsicht. In Anlehnung an [3]

Wird der Drehrahmen um den Drehpunkt geschwenkt, so entsteht eine Schrägstellung der vorderen Umlenkrolle des Drehrahmens zur Laufrichtung der Bahn. Über den Drehrahmen läuft die Bahn ohne Spannung und wird beim Auslaufen von der folgenden Umlenkrolle zurück in die Laufrichtung der Bahn gebracht.

Dieses System ist durch seine vielen Komponenten vergleichsweise aufwendig, wenngleich es bei schmalen Bahnen sehr kompakt aufgebaut werden kann. Es zeichnet sich durch geringe benötigte Ein- und Auslauflängen aus.

Schwenkschiebewalzensystem:

Hierbei wird eine Umlenkrolle um einen Punkt in der Einlaufebene gedreht, der einen Abstand von mehrfacher Bahnbreite benötigt, um die Bahn nicht zu großer Spannung auszusetzen (siehe Abb. 3-3).

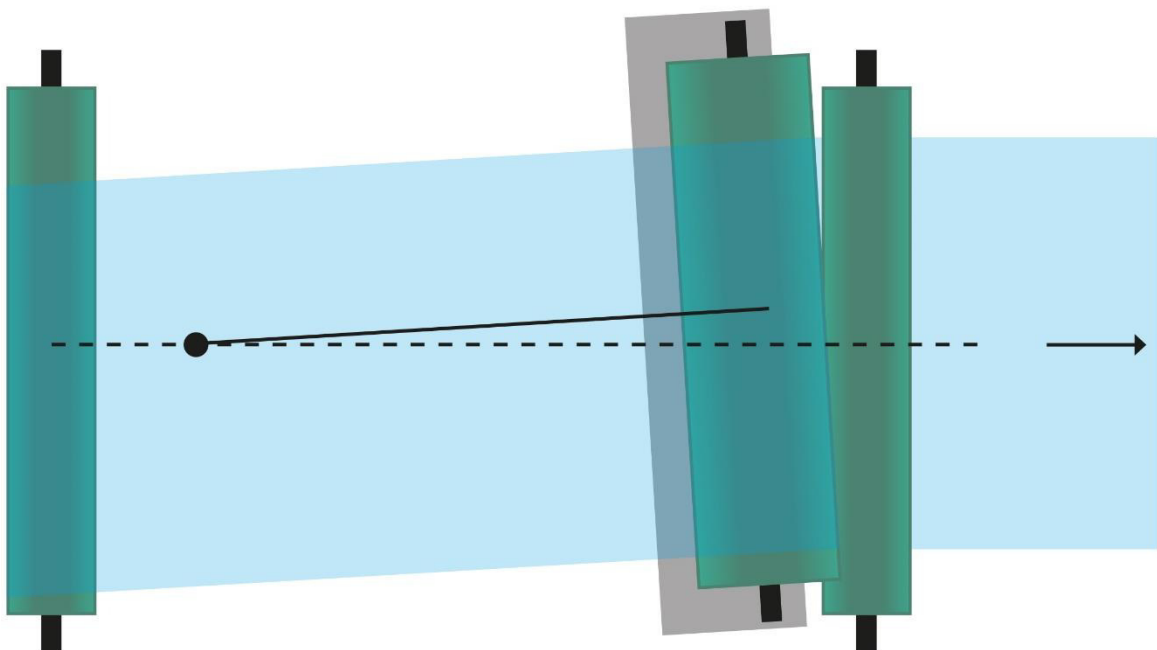


Abb. 3-3 Schwenkschiebewalzensystem Draufsicht. In Anlehnung an [3]

Der Drehpunkt ist dabei ein gedachter Punkt. Tatsächlich werden die Lager der Umlenkrolle mit Aktoren entlang einer Führung radial um den Drehpunkt verschoben. Es können einfache Rillenkugellager zum Einsatz kommen, da beide Lager keiner Schrägstellung unterworfen werden. Es werden in der Regel zwei Aktoren zum Stellen benötigt.

Es ist zwar gegenüber einem Drehrahmensystem nur eine Umlenkrolle nötig, allerdings werden mehr Aktoren benötigt und die Lagerung ist aufwendiger. Außerdem ist dieses System nur bei großen Einlauflängen ein geeignetes Mittel.

Schwenkwalzensystem:

Dieses System dreht um einen Punkt in einem der Lager einer Umlenkrolle. Das Lager der Seite, um die gedreht wird, steht fest. Das Lager der anderen Seite wird dabei entlang der Laufrichtung der Bahn verschoben (siehe Abb. 3-4).

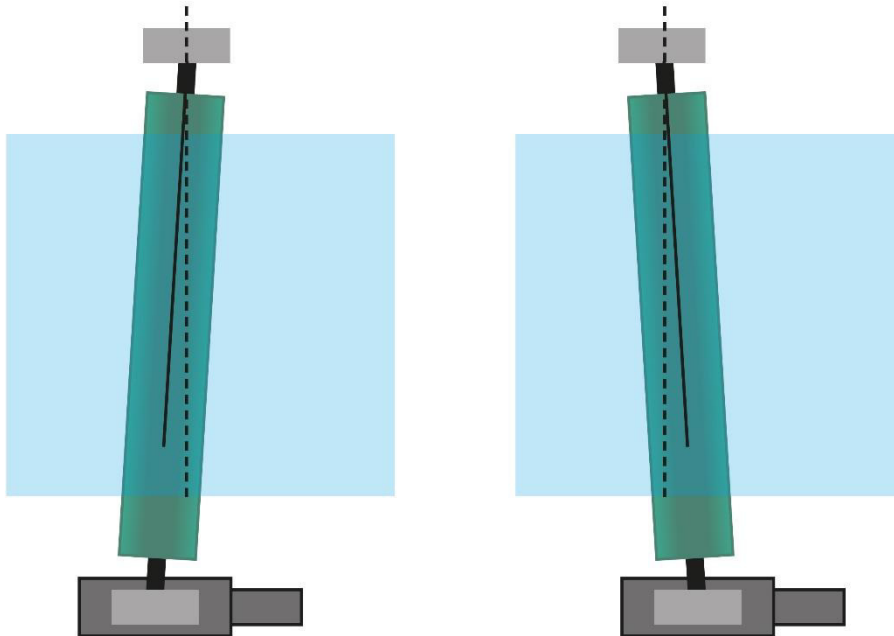


Abb. 3-4 Schwenkwalzensystem von der Mittellage in zwei Richtungen auslenkbar. In Anlehnung an [3]

Es wird nur eine Umlenkrolle und ein Aktor benötigt. Als Lagerung der Umlenkrolle sind Pendellager zu verwenden, da die Lager eine parallele Ausrichtung zueinander behalten, auch wenn das eine verschoben wird. Für die Verschiebung des einen Lagerungspunktes wird je nach Anwendung nur ein Linearführungsgleitlager benötigt.

Die simple Struktur dieses Systems ist dessen Trumpf. Außerdem lässt es sich noch immer bei relativ kurzen Einlaufängen sinnvoll verwenden.

3.1.1 Auswahl des Systems

Tab. 3-1 stellt die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme noch einmal anschaulich gegenüber.

Vergleich Sensoren		
Stellsystem	Vorteile	Nachteile
Drehrahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit++ - Einlauflänge + 	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexität - - Bahnbreite -
Schwenkschiebewalze	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit + - Bahnbreite + 	<ul style="list-style-type: none"> - Einlauflänge -- - Komplexität -
Schwenkwalze	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit + - Bahnbreite + - Komplexität + - Einlauflänge + 	

Tab. 3-1 Vergleich Stellsysteme

Das Schwenkwalzensystem ist hiernach das vorteilhafteste, jedoch bedarf es für den Einsatz an der St. Pauli Pegelanzeige einiger Modifikationen.

Anpassungen:

Anstatt eine Umlenkrolle zu verschieben, wird an dem Prototyp zur St. Pauli Pegelanzeige die untere Trommel gestellt. Dies erscheint am geeignetsten, da der Lagerträger nur in horizontaler Richtung verschoben werden muss. Dazu kann ein einfaches Gleitlager eingesetzt werden und es wird lediglich ein Linearmotor mit geringem Drehmoment benötigt, um die Trommel zu bewegen. Die Lager der Trommel sind bereits als Pendellager ausgelegt. Bei einer Umlenkrolle als Stellelement hingegen, müsste im Fall des Prototyps neben der Reibung im Gleitlager auch die Gewichtskraft der Umlenkrolle überwunden werden, da die Umlenkrollen stirnseitig am Aluminiumprofil montiert sind.

Vorausgesetzt, der Stellweg ist ausreichend groß und die Regelung reagiert auf Fehler ausreichend schnell, reduziert man das Problem auf reine Geometrie. Der Winkel, bis zu dem die Trommel verdreht werden kann, muss dabei nur größer sein, als die maximale Schiefstellung des Tuchs zur gewünschten Laufrichtung.

Durch die Schrägstellung der Trommel verändert man den Berührungspunkt des Tuchs mit der Trommel in lateraler Richtung.

4 Theorie zu Reglern

Damit der problematische Lauf des verwendeten Tuchs an der Pegelanzeige egalisiert werden kann, wird eine Regelung entwickelt. Der Regler wird als digitaler Regler erarbeitet. Betrachtet wird im Speziellen ein PID-Regler, dessen einzelne Elemente je nach Aufgabe bereits als Regler eingesetzt werden können. Um ein akzeptables Ergebnis beim Aufwickeln zu erzielen, genügt ein einfacherer Regler, wie zum Beispiel der P-Regler. Um ein sehr präzises Ergebnis zu erzielen und zu demonstrationszwecken wird jedoch ein PID-Regler verwendet. Der PID-Regler ist eine parallel geschaltete Kombination aus drei Reglern, dem **P**roportionalregler, dem **I**ntegralregler und dem **D**ifferenzialregler. Die dazu nötigen theoretischen Grundlagen werden im Folgenden erarbeitet. Dieses Kapitel orientiert sich an [7].

4.1 Definition Regelung

Die Regelung bzw. das Regeln ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst [2].

4.2 Mathematische Grundlagen eines PID-Reglers

Als Grundlage für einen PID-Regler sind mathematisch Differenzialgleichungen (DGLn) verankert. Diese lassen sich in drei einzelne Wirkungen unterteilen.

– Proportionalteil:

Der Proportionalteil des Reglers multipliziert einen Faktor K_p mit dem gemessenen Fehler $e(t)$ und gibt das Produkt als Stellgröße $u(t)$ aus.

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (4.1)$$

Verglichen mit anderen Reglertypen, ist ein P-Regler mittelschnell und möglichst einfach, aufgrund der simplen Berechnung. Problematisch ist, dass eine bleibende Regelabweichung auftritt. Er ist nicht stationär genau [4, S.355].

In Software lässt sich der Proportionalteil sinngemäß wie folgt implementieren:

$$u = Kp * e \quad (4.2)$$

– **Integralanteil:**

Der Integralanteil des Reglers integriert den Fehler über die Zeit. Dieses Integral wird mit einem Faktor Ki multipliziert.

$$u(t) = Ki * \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

Da im Fall des digitalen Reglers nur diskrete Zeitpunkte betrachtet werden, reduziert sich das Integral auf eine Summe des Fehlers über die einzelnen Zeitpunkte.

$$u_k = Ki * \sum_{i=0}^k e_i \quad (4.4)$$

Dadurch lässt sich der Integralanteil folgendermaßen in Software implementieren:

$$eSumme = eSumme + e \quad (4.5)$$

$$u = Ki * eSumme \quad (4.6)$$

Genaugenommen muss die Formel (4.6) erweitert werden, denn die Abtastzeit Ta muss als zusätzlicher Faktor berücksichtigt werden. Der Einfachheit halber wird Ta hier allerdings in Ki integriert.

Der I-Regler ist verglichen mit anderen Reglertypen langsam. Er bietet jedoch den Vorteil, den Regelfehler vollständig ausregeln zu können. Stationäre Genauigkeit ist erreichbar. Problematisch ist allerdings, dass bei andauernder Abweichung vom Ist-Wert zum Soll-Wert ein sehr großer Wert der Fehlersumme zustande kommen kann. Dies wird durch eine Begrenzung, dem sogenannten Anti-Windup verhindert. Überschreitet ein Wert eine Grenze wird er auf den Wert der Grenze gesetzt.

– **Differenzialteil:**

Der Differenzialteil betrachtet die Veränderung der Regelabweichung, sprich er differenziert. Eine solche Berechnung lässt gewissermaßen eine Aussage über künftiges Verhalten erschließen. Für die Dimensionierung des Umfangs des Einflusses dieser Größe wird ein Faktor Kd multipliziert. Die dazugehörige DGL sieht wie folgt aus:

$$u(t) = Kd * \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Im Fall von diskreten Zeitwerten lässt sich die Differenziation durch den Differenzenquotienten annähern:

$$u_k = Kd * (e_k - e_{k-1}) \quad (4.8)$$

Hier müsste noch durch die Abtastzeit Ta geteilt werden, diese wird aber, wie schon beim Integralanteil, in Kd einbezogen.

Zu implementieren ist dieser Teil folgendermaßen:

$$u = Kd * (e - eAlt) \quad (4.9)$$

$$eAlt = e \quad (4.10)$$

D-Regler reagieren vergleichsweise schnell, sind aber nicht stationär genau.

– **PID-Regler:**

kombinieren diese drei Anteile. Die vollständige *DGL* lautet:

$$u(t) = Kp * e(t) + Ki * \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd * \frac{de(t)}{dt} \quad (4.11)$$

Bzw. angepasst für digitale Regler:

$$u_k = Kp * e_k + Kd * (e_k - e_{k-1}) + Ki * \sum_{i=0}^k e_i \quad (4.12)$$

Die Implementierung in Software setzt sich dadurch wie folgt zusammen:

$$eSumme = eSumme + e \quad (4.13)$$

$$u = Kp * e + Ki * eSumme + Kd * (e - eAlt) \quad (4.14)$$

$$eAlt = e \quad (4.15)$$

Die Faktoren K_p , K_i und K_d sind zu variieren und individuell an das jeweils betrachtete System anzupassen. Eine generelle Aussage über optimale Werte lässt sich nicht treffen. Es können außerdem verschiedene Kombinationen der Werte, die nicht zwingend in skalarer Abhängigkeit stehen müssen, zu einem brauchbaren Ergebnis führen. Methoden zur Bestimmung der Faktoren werden im nächsten Abschnitt behandelt.

4.3 Regler dimensionieren

Zum Einstellen der Parameter eines PID-Reglers sind verschiedene Methoden üblich. Sie lassen sich in empirische Methoden und Methoden basierend auf Systemantworten unterscheiden. Die hier beschriebenen Verfahren stellen nur eine Auswahl der Vielzahl an möglichen Verfahren dar.

4.3.1 Empirische Methoden

Ausgangspunkt ist eine Parametrierung von $K_p = \textit{klein}$, $K_i = 0$ und $K_d = 0$. Dadurch wirkt nur der Proportionalteil, die beiden anderen hingegen nicht. Anschließend wird K_p so lange erhöht, bis ein Schwingen zu erkennen ist, die Dämpfung also gering ist. Sobald es zum Schwingen kommt, wird K_p wieder reduziert. Daraufhin kann langsam K_i hinzugenommen werden. Man passt die beiden Werte an, bis ein akzeptables Ergebnis erzielt ist. Danach kann K_d in kleinen Schritten hinzugefügt werden. Wenn das System dadurch stabiler wird, können K_p und K_i noch etwas erhöht werden. Dadurch wird das System noch etwas schneller.

Eine weitere, ähnliche Methode, die allerdings ein Schwingen erfordert, wird folgendermaßen durchgeführt:

Ebenfalls wird bei Verstärkungen von $K_p = \textit{klein}$, $K_i = 0$ und $K_d = 0$ begonnen. K_p wird dann so lange erhöht, bis ein Dauerschwingen zu erkennen ist. Daraufhin wird K_d hinzugenommen und erhöht, bis keine Schwingungen mehr vorhanden sind. Abschließend wird noch K_i einbezogen, um stationäre Genauigkeit zu erzielen. Dies muss aber in kleinen Schritten geschehen, um die Stabilität des Systems zu erhalten.

Es ist offensichtlich, dass dies keine idealen Werte generiert, jedoch für einfache Systeme bereits ausreichend sein kann und bei komplexeren einen ersten, guten Ansatz liefert.

4.3.2 Einstellregeln zum Dimensionieren

Die am weitesten verbreiteten Einstellregeln sind die von Ziegler/Nichols und die von Chien/Hrones/Reswick. Diese ermitteln charakteristische Werte des Systems, auf dessen Basis mittels einer Tabelle die Werte der Verstärkungen bestimmt werden. Im Fall von Ziegler/Nichols unterscheidet man zwischen der Schwingungsmethode und der aufgrund der Sprungantwort des Systems. Chien/Hrones/Reswick wird ebenfalls mithilfe der Sprungantwort durchgeführt.

Schwingungsmethode:

Die Schwingungsmethode kann nur angewendet werden, wenn das System keinen Schaden bei Schwingungen nimmt. Der Ablauf sieht folgendermaßen aus:

1. $K_p = \text{klein}$, $K_i = 0$ und $K_d = 0$.
2. K_p sukzessive erhöhen, bis Dauerschwingung auftritt.
3. K_p bei Dauerschwingung wird $K_{p_{krit}}$ genannt.
4. Die Periodendauer T_{krit} der Dauerschwingung wird gemessen.
5. Die Verstärkungen des Reglers werden mithilfe der Tabelle 4-1 bestimmt.

Regler dimensionieren nach Ziegler/Nichols Schwingungsmethode			
Regler	K_p	T_n	T_v
P	$0,5 * K_{p_{krit}}$		
PI	$0,45 * K_{p_{krit}}$	$0,85 * T_{krit}$	
PID	$0,6 * K_{p_{krit}}$	$0,5 * T_{krit}$	$0,12 * T_{krit}$

Tab. 4-1 Reglerparameter nach Ziegler/Nichols Schwingungsmethode [5, S. 436]

$$K_i = \frac{K_p}{T_n} \quad (4.16)$$

$$K_d = K_p * T_v \quad (4.17)$$

Die beiden Parameter Nachstellzeit T_n und Vorhaltezeit T_v sind Zeitkonstanten des Systems und stammen aus der analogen Regelungstechnik. In diesem Fall werden sie zum einfachen Dimensionieren von Reglern benutzt.

Regelparameter aufgrund von Sprungantwort:

Die Sprungantwort der Regelstrecke muss zum Bestimmen der Verstärkungen der einzelnen Regelanteile aufgenommen werden. Die Sprungantwort ergibt sich, indem man eine Sprungfunktion an den Eingang der Regelstrecke übergibt. Die Sprungfunktion ist eine

Funktion, bei der von einem Wert auf einen anderen mit einer ideal unendlichen Steigung gesprungen wird. Die Regelstrecke benötigt nun einen Moment Zeit, um der veränderten Eingangslage zu folgen. Der Ausgang der Regelstrecke wird gegen die Zeit in einem Koordinatensystem aufgetragen. In den Verlauf wird eine Wendetangente eingezeichnet. Dies ist die Tangente durch den Punkt, an dem die Steigung der Kurve wieder abnimmt, sprich maximal ist. Diese Wendetangente schneidet die Zeitachse in einem Punkt, der diese unterteilt. In anderer Richtung schneidet die Wendetangente die Konstante der Sprungantwort. Dieser Punkt wird auf die Zeitachse projiziert. Vom Moment des Sprungs bis zum Schnitt der Wendetangente mit der Zeitachse spricht man von der Verzugszeit T_u und von dort bis zum projizierten Schnittpunkt der Wendetangente mit der Konstanten des Sprungs von der Ausgleichszeit T_g . Die Steigung der Wendetangente wird als K_s bezeichnet. Grafisch dargestellt ist diese Grundlage in Abb. 4-1.

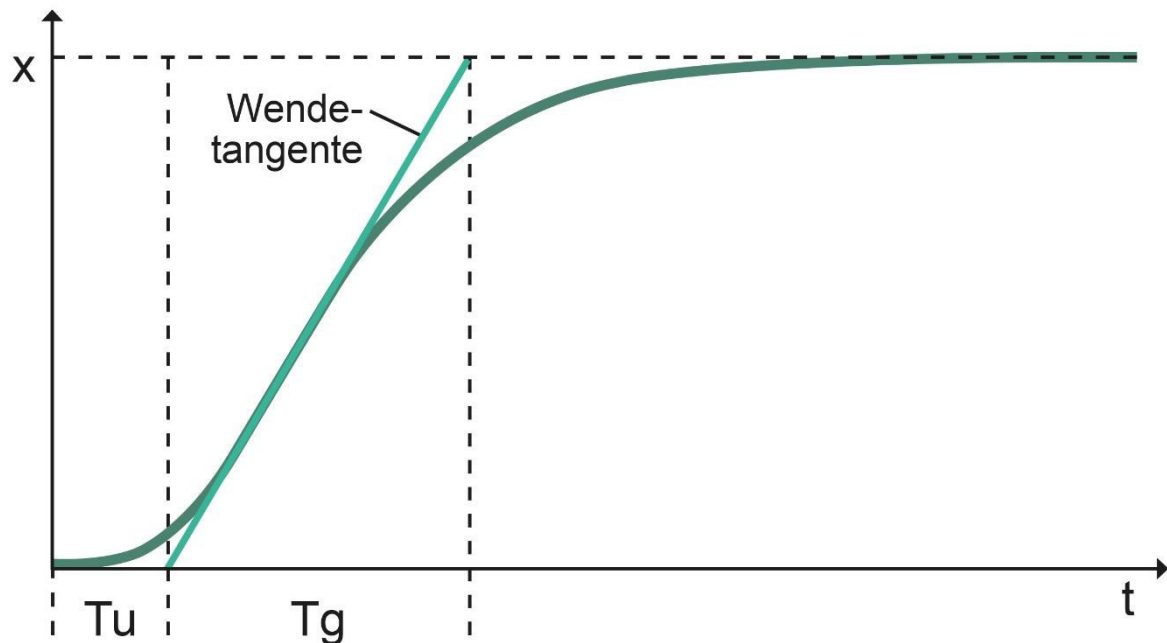


Abb. 4-1 Sprungantwort. In Anlehnung an [11, S. 207]

Mithilfe der ermittelten Werte lassen sich nun die Zeitkonstanten des Systems anhand der Tab. 4-2 für Ziegler/Nichols und Tab. 4-3 für Chien/Hrones/Reswick, sowie die Proportionalverstärkung K_p bestimmen. Die Tabellen sind exemplarisch für ein spezielles Systemverhalten dargestellt. Die Verhältnisse in den Tabellen sind verschieden für Betrachtung von Stör- oder Führungsverhalten und ob Überschwingen zugelassen werden darf bzw. nicht. Es soll hier lediglich die Idee vermittelt werden.

Regler dimensionieren nach Ziegler/Nichols mit Sprungantwort			
Regler	Kp	Tn	Tv
P	$1 / K_s * T_g / T_u$		
PI	$0,9 / K_s * T_g / T_u$	$3,3 * T_u$	
PID	$1,2 / K_s * T_g / T_u$	$2 * T_u$	$0,5 * T_u$

Tab. 4-2 Reglerparameter nach Ziegler/Nichols mit Sprungantwort [5, S. 436]

Regler dimensionieren nach Chien/Hrones/Reswick mit Sprungantwort			
Regler	Kp	Tn	Tv
P	$0,3 / K_s * T_g / T_u$		
PI	$0,35 / K_s * T_g / T_u$	$1,2 * T_g$	
PID	$0,6 / K_s * T_g / T_u$	T_g	$0,5 * T_u$

Tab. 4-3 Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick mit Sprungantwort [5, S. 437]

Daraus lassen sich die Verstärkungen K_i und K_d mit den Formeln 4.16 bzw. 4.17 berechnen.

5 Auswahl von Sensor und Aktor

Das in Kapitel 3.1.1 gewählte, auf die Pegelanzeige angepasste Schwenkwalzensystem benötigt einen Sensor zum Detektieren der Bahnkante und einen Aktor zum Stellen der Trommel. Im Folgenden werden Sensortypen vorgestellt und deren Eigenschaften miteinander verglichen. Gleiche Vorgehensweise gilt für die Aktoren.

5.1 Sensoren

Gabellichtschranke:

Die am häufigsten verwendete Art Sensor zum Erkennen von Abweichungen der Bahnkante zum Sollwert stellen Gabellichtschranken dar. Diese basieren in der Regel auf Infrarottechnik. Hierbei wird Licht, von meist LEDs, emittiert und von Fotodioden oder Fototransistoren in einem gewissen Abstand zur abstrahlenden Lichtquelle wieder registriert. Befindet sich im Weg zwischen Lichtquelle und Empfänger ein Hindernis, ändert dies zum Beispiel die messbare Spannung am Ausgang. Je nach Aufbau und Intelligenz können Gabellichtschranken messend, mit Genauigkeiten von wenigen Mikrometern, ausgelegt sein. Diese Variante ist schnell, genau, effizient und robust.

Ultraschall:

Ultraschallsensoren sind eine gängige Alternative zu Gabellichtschranken. Hierbei wird von einem kleinen Lautsprecher ein von einem Mikrophon aufzunehmender Ton im Ultraschallbereich abgegeben. Bewegt sich etwas in die Übertragungsstrecke ist dies messbar.

Sie sind deutlich weniger präzise, jedoch, in Bezug auf Verschmutzung, etwas robuster als Gabellichtschranken. Störgeräusche können problematisch sein.

Luftschranke:

Die Luftschranke arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip wie die Gabellichtschranke. Hier ist analog zum Lichtstrahl ein Strom aus Druckluft vorhanden. Je nach Hindernis im Volumenstrom verändert sich die aufnehmbare Menge Luft. Abhängig davon wird eine Ausgangsspannung erzeugt. Zur Funktionsfähigkeit ist eine separate Versorgung mit Druckluft erforderlich.

Diese Art Sensor ist gegenüber der Gabellichtschranke in allen Belangen unterlegen und daher weitestgehend von ihr abgelöst worden.

Taktiler Sensor:

Diese Sensoren funktionieren als Schalter. Wird der federbelastete Kontakt je nach Bauart geschlossen oder geöffnet, wird der Stromkreis ebenfalls geschlossen oder geöffnet. Dies lässt sich als diskrete Größe auffassen. Dadurch ergeben sich aber eben nur zwei Zustände, was diese Art Sensor für Positionierungsaufgaben ungenau macht. Taktile Sensoren werden meistens als End- oder Notschalter verwendet. In Tab. 5-1 wird verdeutlicht, weshalb die Wahl des Sensors zur Bahnkantenerkennung auf eine Gabellichtschranke fällt.

Vergleich Sensoren		
Sensor	Vorteile	Nachteile
Gabellichtschranke	<ul style="list-style-type: none"> - Genauigkeit++ - Robustheit + - Effizienz ++ 	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungskosten - - Störanfällig Schmutz -
Ultraschallsensor	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungskosten++ - Robustheit + - Effizienz ++ 	<ul style="list-style-type: none"> - Genauigkeit - - Störanfällig Geräusche -
Luftschranke	<ul style="list-style-type: none"> - Genauigkeit + - Robustheit + 	<ul style="list-style-type: none"> - Effizienz – - Anschaffungskosten -
Taktiler Sensor	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungskosten ++ - Robustheit + 	<ul style="list-style-type: none"> - Genauigkeit -

Tab. 5-1 Vergleich Sensoren Bahnkantenerkennung

Die gewählte Gabellichtschranke ist die *GS 754B* von *Leuze electronic*. Sie ist für industrielle Zwecke entwickelt und daher besonders genau, kompakt und robust. Die nötige Versorgungsspannung liegt zwischen 18 und 30 Volt bei Verwendung der analogen Ausgabe der Werte. Der Messbereich umfasst 25 Millimeter und wird als ausreichend angesehen. Das dazugehörige Datenblatt ist Anhang A1 zu entnehmen.

5.2 Aktoren

Linearmotor:

Linearmotoren sind Systeme, bei denen die Drehbewegung eines Elektromotors mit einem Getriebe auf eine Gewindespindel übertragen und dabei in eine lineare Bewegung übersetzt wird. Sie sind verfügbar von sehr kleinen, kompakten Versionen, die nur kurze Wege stellen und geringe Last bewegen können, bis hin zu sehr kräftigen Antrieben mit ggf. weiten Hüben. Je nach Konstellation können diese Antriebe besonders präzise Stellaufgaben verrichten. Dazu müssen die Gewindespindeln eine feine Steigung aufweisen.

Es gibt Systeme mit und ohne interne Positionserkennung. Linearmotoren ohne Positionserkennung werden eingesetzt, um maximale Hübe zu fahren, Hübe, die zum Beispiel durch taktile Sensoren begrenzt werden oder es wird ein externes System zum Erkennen der Lage benötigt.

Verfügt der Linearantrieb über ein System zur Positionserkennung so werden intern Potentiometer oder Inkrementalgeber verwendet, um die Hubstellung zu erkennen.

Potentiometer eignen sich für eine absolute Positionserkennung. Die Auflösung hängt dabei von der Verarbeitung der Spannungswerte des Potentiometers ab. Problematisch ist, dass Potentiometer mechanisch arbeiten und somit abnutzen. Sie arbeiten als Spannungsteiler mit Schleifkontakten.

Alternativ wird ein Inkrementalsystem verwendet. Dessen Auflösung hängt vom Inkrementalgeber, meist einer metallischen Lochscheibe, ab [9, S.69 ff.]. Ein Linearmotor mit Inkrementalsystem muss kalibriert werden, etwa durch Verfahren der Gewindespindel in eine Endlage, um eine Aussage über die Position machen zu können. Eine solche Variante ist verschleißfrei.

Da bei einem Linearmotor immer ein Getriebe zum Einsatz kommt, muss man sich entscheiden, zwischen Kraft und Geschwindigkeit oder einer Mischung aus beiden. Die Entscheidung zu Gunsten des einen fällt dabei immer zu Lasten des anderen.

Die Spindel in einem Linearmotor ist in der Regel selbsthemmend ausgelegt. Somit wird bei einer Positionierung nur für den Weg aber nicht für das Halten einer Position Energie benötigt.

Hydraulik/Pneumatik:

Hydraulische und pneumatische Systeme sind prinzipiell sehr ähnlich aufgebaut. Ein Medium, bei Hydraulik eine Flüssigkeit und bei Pneumatik ein Gas, wird unter Druck in einen Zylinder geleitet. Je nach Druck wird dabei ein Kolben herausgefahren. Das Zu- und Abführen des Mediums kann zusätzlich über ein Ventil gesteuert werden, was auch der Regelfall ist. Es wird ein Reservoir für das Medium benötigt und ein Verdichter, um Druck aufbauen zu können.

Für Positionieraufgaben wird ein externes Wegmesssystem benötigt und damit eine Position gehalten werden kann, muss dem System kontinuierlich Energie zugeführt werden.

Hydraulische Systeme sind um ein Vielfaches kräftiger als pneumatische Systeme oder ein Linearantrieb. Außerdem sind hydraulische und pneumatische Systeme in der Lage sehr schnelle Bewegungen auszuführen.

Für das Stellen der Trommel an der Pegelanzeige ist die kompakte und deutlich weniger komplexe Bauweise des Linearmotors ausreichend. Es werden keine hohen Stellgeschwindigkeiten benötigt und die zu bewegende Last liegt im Bereich weniger Kilogramm.

Zur Positionsbestimmung eignet sich für die betrachtete Aufgabe das Potentiometer. Hierdurch ist keine Kalibrierung erforderlich.

Die Wahl fällt auf einen Linearmotor des Herstellers *Drive-Systems Europe*, genaugenommen den *DSZY1-24-40-100-POT-IP65*. Dabei handelt es sich um einen Elektrohubzylinder mit 24 Volt Versorgungsspannung, 1000 Newton Belastbarkeit und 100 Millimeter Hub. Diese Abmessungen sowie Kraft, Hub und auch Verfahrgeschwindigkeit lassen sich sehr gut in die Prototypenanlage integrieren. Das technische Datenblatt findet sich in Anhang A2.

6 Montage der verwendeten Komponenten

In diesem Abschnitt werden sämtliche Komponenten aufgelistet und deren Funktion sowie Interaktion beschrieben, die für die Bahnkantenregelung der Pegelanzeige benötigt und benutzt werden. Des Weiteren wird die Montage der Komponenten dargelegt. Abb. 6-1 ist eine Fotografie des physischen Aufbaus.

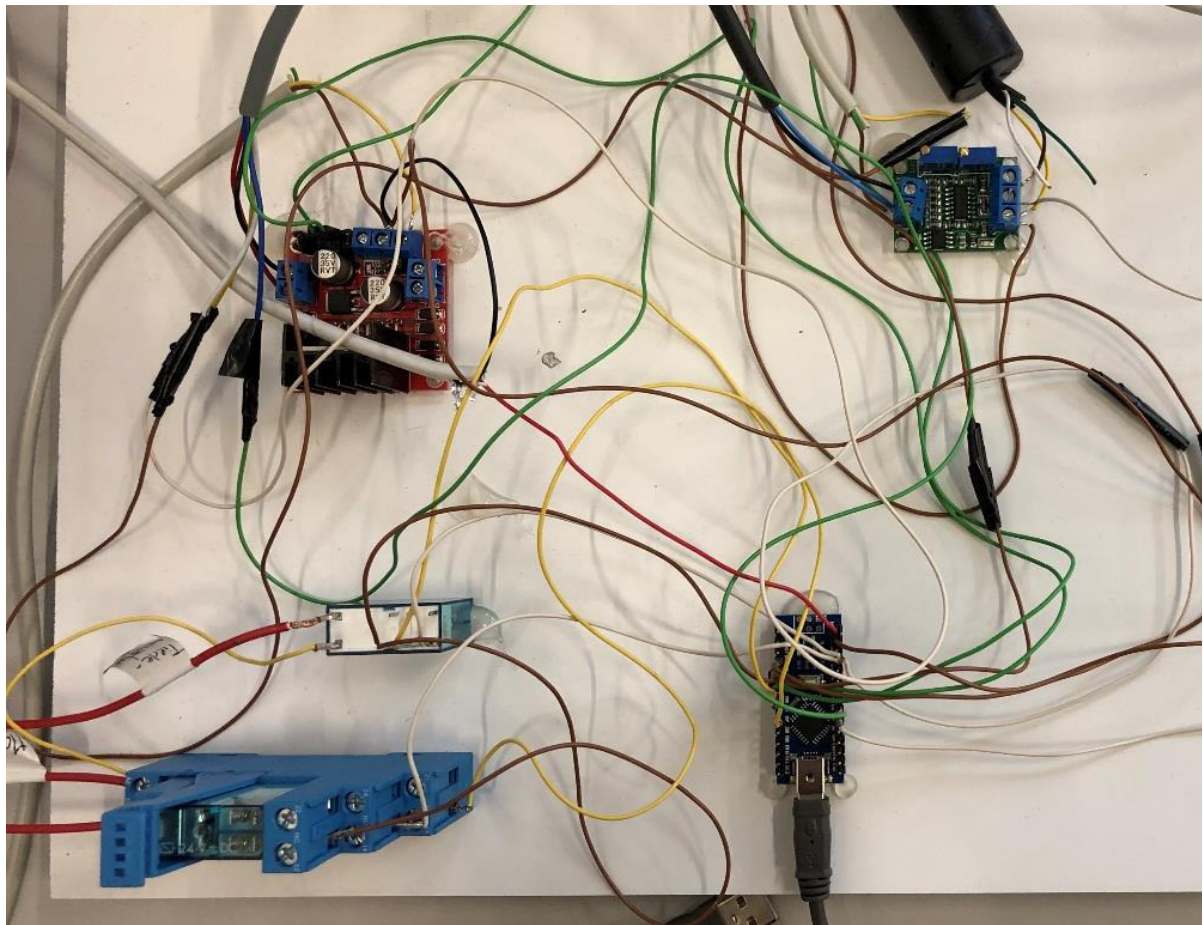


Abb. 6-1 Aufbau Schaltung

6.1 Verwendete Komponenten

Arduino Nano:

Beim Arduino handelt es sich um ein Entwicklungsboard mit Microcontroller. Dieses Board ist in der Lage Signalwerte von analogen und digitalen Quellen im Bereich von 0 bis 5 Volt einzulesen und im selben Spannungsbereich Werte auszugeben. Der Microcontroller lässt sich mit der kostenlosen Entwicklungsumgebung des Herstellers mit Programmen bespielen,

die ohne zusätzlichen Computer lauffähig sind. Die Programme können zum Beispiel in der Programmiersprache „C“ entwickelt werden [1].

Der Arduino ist das Gehirn der Regelung. Hier werden alle nötigen Signale eingelesen, verarbeitet und daraus Größen zum Regeln ausgegeben. In Abb. 6-2 ist der verwendete Arduino zu sehen.

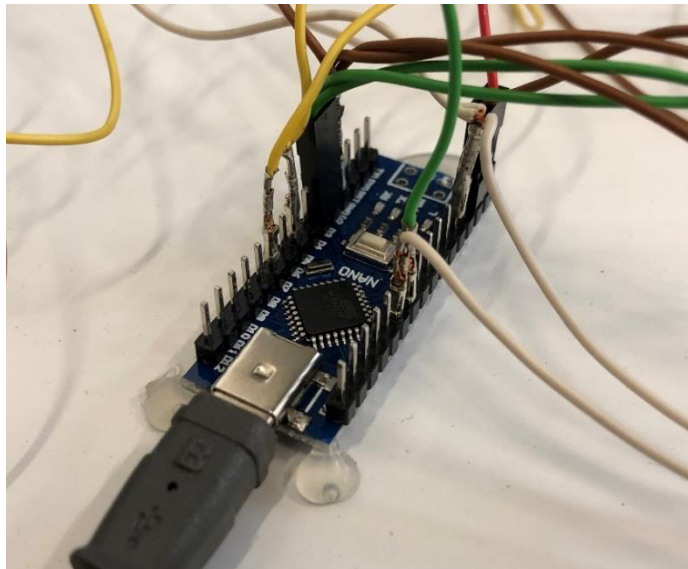


Abb. 6-2 Arduino Nano

Gabellichtschanke:

Die gewählte Gabellichtschanke *GS 754B* von *Leuze electronic* ist der Sensor der Regelung. Sie benötigt eine Versorgungsspannung von 18 bis 30 Volt. Je nach Eindringtiefe des Tuches in der Gabellichtschanke wird ein Signal von 4 bis 20 Milliampere ausgegeben. Die Beziehung zwischen Eindringtiefe des Tuches und des ausgegebenen Stromes ist linear. Hierdurch lässt sich die genaue Position des Tuches im Arduino errechnen.

Strom zu Spannungswandler:

Wie bereits erwähnt, kann der Arduino nur Signale von 0 bis 5 Volt verarbeiten. Da die Gabellichtschanke allerdings einen Strom linear zur Eindringtiefe des Tuchs ausgibt, muss das Signal für den Arduino umgewandelt werden. Hierfür wird ein IC (integrated circuit), zu Deutsch eine integrierte Schaltung, speziell für diese Aufgabe verwendet. Es handelt sich dabei um eine kleine Platine, auf der der IC sitzt und dessen Anschlüsse an Klemmen geführt sind.

Damit die Schaltung arbeiten kann, benötigt sie eine Versorgungsspannung von etwa 13 Volt. An zwei der Klemmen sind die Leitungen der Gabellichtschanke angeschlossen. Auf der

anderen Seite der Platine werden zwei Leitungen zum Arduino angeschlossen. Abb. 6-3 zeigt die Platine im Einsatz.

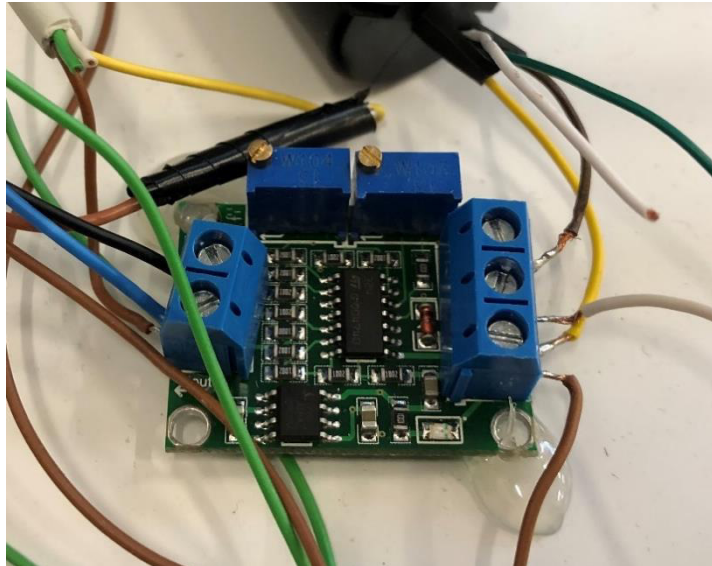


Abb. 6-3 Strom zu Spannungswandler

Linearmotor:

Als Aktor für die Regelung wird der *DSZY1-24-40-100-POT-IP65* vom Hersteller *Drive-Systems Europe* eingesetzt. Als Betriebsspannung benötigt der Antrieb 24 Volt. Diese werden ihm vom Motortreiber zugeführt. Ob die Betriebsspannung anliegt, wird vom Arduino bestimmt. Dieser belegt das Potentiometer des Antriebs mit 5 Volt. Das Potentiometer gibt je nachdem, wie weit die Gewindespindel ausgefahren ist, eine Spannung von 0 bis 5 Volt über eine weitere Leitung an den Arduino zurück. Die übrige Spannung zwischen der eingegebenen und der ausgegebenen Spannung, fällt über den Widerstand des Potentiometers ab. Hierbei ist die Beziehung zwischen der ausgegebenen Spannung und der Stellung der Gewindespindel, wie auch bei der Gabellichtschranke, linear.

Motortreiber:

Da der Arduino nur in der Lage ist bis zu 5 Volt auszugeben und ebenfalls keine ausreichend große Stromstärke zum Antreiben des Linearmotors bereitstellen kann, wird er lediglich als ansteuerndes Element verwendet. Der Arduino entscheidet wie lange der Linearmotor in welche Richtung verfahren soll und gibt die entsprechenden Signale über zwei digitale Pins aus. Als trennendes Element zwischen der Spannungsversorgung für den Motor und dem Arduino wird der Motortreiber *L298N* eingesetzt. Dieser IC ist auf einer Platine angeschlossen, deren Klemmen die Spannungsversorgung vom 24 Volt Netzteil aufnehmen und je nach

Beschaltung von zwei, durch den Arduino gesteuerten Pins, an den Linearmotor weiterleiten. Der angeschlossene Motortreiber ist in Abb. 6-4 dargestellt.

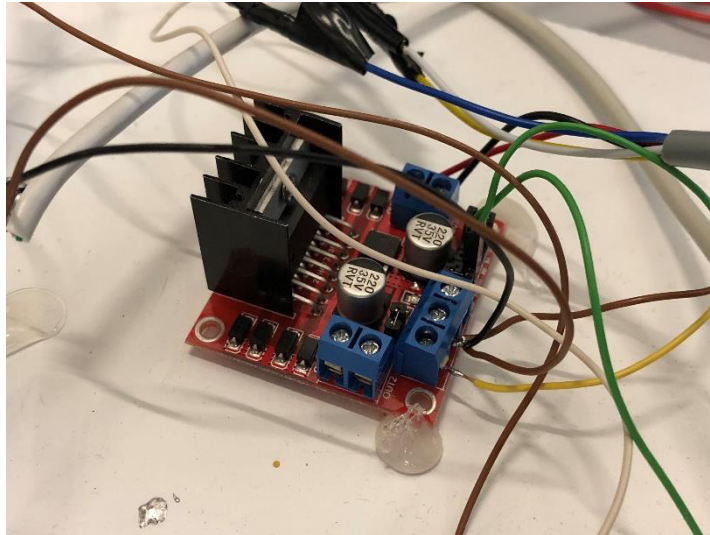


Abb. 6-4 Motortreiber

Spannungsversorgung:

Die eingesetzten Komponenten werden von insgesamt vier Netzteilen gespeist. Der Arduino wird von einem USB-Adapter versorgt. Der Motortreiber und damit auch der Linearmotor werden von einem einstellbaren Netzteil mit 24 Volt versorgt. Die Gabellichtschranke wird von einem 24 Volt Netzteil gespeist. Ein eigenes 13 Volt Netzteil betreibt den Strom zum Spannungswandler. Jedes Netzteil gibt Gleichspannung aus. Alle Komponenten sind über eine gemeinsame Masseleitung miteinander verbunden, um von einem gemeinsamen ausgehen zu können. Der Arduino benötigt ein gemeinsames Bezugspotential, damit Werte von beispielsweise der Gabellichtschranke korrekt gemessen werden können.

Relais:

Der Arduino benötigt Information darüber, ob das Tuch verfährt und wenn ja, in welche Richtung. Diese Signale werden von der bestehenden SPS ausgegeben. Zum Trennen der Signalspannung von 24 Volt zu den maximal verträglichen 5 Volt am Arduino, werden Relais verwendet (siehe Abb. 6-5).

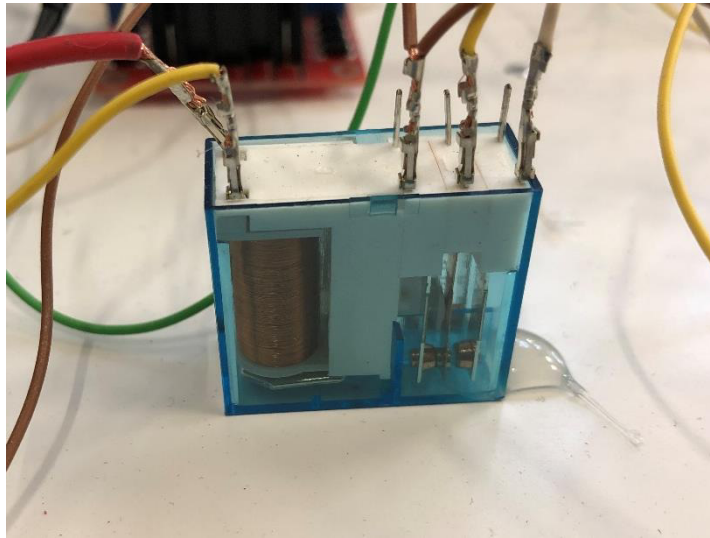


Abb. 6-5 Relais

Die Spannungsebene von 5 Volt gibt der Arduino selbst aus. Abhängig vom Signal der SPS schalten die Relais die 5 Volt des Arduinos durch. Dieses Signal wird zum Arduino zurückgeführt und wird an einem Digitalpin eingelesen.

Verschiebliches Lager:

Einer der Lagerböcke muss für die Regelung verschiebbar sein. Der Lagerbock wird demontiert und in der Schlosserwerkstatt am Veddeler Damm mit einem Anschlagpunkt für den Linearmotor versehen. Es werden hierzu zwei Dreiecke aus einer Edelstahlplatte herausgetrennt. Die Dreiecke haben etwa eine Kantenlänge von 4 cm. Sie werden mit einer Gripzange zusammengepresst und an einem Schleifband deckungsgleich geschliffen. Anschließend wird ein Loch für einen Bolzen an einer der Spitzen gebohrt. Daraufhin werden die Dreiecke mit dem Wolfram-Inertgas-Verfahren (WIG) mit einem Abstand von etwa 3 cm parallel zueinander an die Grundplatte des Lagerbocks angeschweißt.

An die Unterseite der Grundplatte des Lagerbocks werden Gleitschuhe geschraubt. Die Gleitschuhe sind Teil eines Lineargleitlagersystems des Herstellers *IGUS*. Sie werden auf die passende Gleitschiene gefädelt (siehe Abb. 6-6).



Abb. 6-6 Verschiebliches Lager

6.2 Montage

Die Gleitschiene wird auf das Aluminiumprofil des Prototyps geschraubt. Wichtig zu beachten ist, dass dieses Aluminiumprofil um die vom ursprünglichen System abweichende Höhe von Gleitschiene plus Gleitschuh abgesenkt wird, um keine Schiefstellung der Trommel in vertikaler Richtung zu erzeugen. Dies würde zu einer ungewollten Bewegung des Tuchs in Richtung dessen höchster Spannung führen.

Dem Linearmotor liegt ein Winkel zum Befestigen bei, dessen Form die an den Lagerbock geschweißten Dreiecke nachempfunden sind. Dieser Winkel wird an dem vertikalen Aluminiumprofil, welches an das horizontale anschließt, auf dem die Gleitschiene montiert ist, festgeschraubt.

Der Linearmotor wird zwischen beiden vorgesehenen Anschlagpunkten positioniert und mit Bolzen gesichert.

Damit die Gabellichtschränke zwischen unterer Umlenkrolle und Trommel positioniert werden kann, wird ein Streifen Edelstahlblech in eine L- Form gebogen und mit Löchern zur Montage der Gabellichtschränke am Blech und des Blechs am Aluminiumprofil versehen.

Ein weiterer L-förmiger Edelstahlblechstreifen wird als Führung des Tuchs direkt vor der Gabellichtschränke angebracht. Dieser sorgt dafür, dass bei starken Auslenkungen des Tuchs aus der Gabellichtschränke heraus, ein Herausfallen des Tuchs aus der Gabellichtschränke verhindert wird.

Der Arduino sowie der Motortreiber, der Strom zu Spannungswandler und die Relais sind mit Heißkleber auf einer Holzplatte befestigt.

7 Programmablauf

In diesem Abschnitt wird der Programmablauf, der auf dem Arduino läuft, beschrieben. Der erstellte Quellcode befindet sich im Anhang A3. Die Variablen werden hierbei hinsichtlich ihrer Funktion erklärt, Berechnungen werden erläutert und die Wahl des Aufbaus wird reflektiert. Die Variablen werden bei Verwendung im Code beleuchtet. Beim Programmieren eignen sich gesprochene Bezeichnungen für Variablen der Übersicht halber besser als abstrakte. Deshalb weichen die Bezeichnungen in der Beschreibung bzw. dem Code vom Modell des geschlossenen Regelkreises ab.

Der erste Bereich des Programms, nach der Variablendeklaration, ist der Setup-Teil. Wenn der Arduino gestartet wird, wird dieser Bereich genau ein Mal durchgeführt. Dem Arduino wird hier mitgeteilt welche seiner digitalen Pins verwendet werden und wie. Die Pins 2 und 3 werden als Fahrrichtungspins verwendet. Der Arduino soll also ein Signal ausgeben. Folglich sind die Pins als *output* definiert. An Pin 5 soll das Signal der Fahrrichtung des Tuchs zur unteren Trommel von der SPS eingelesen werden, an Pin 9 in entgegengesetzter Richtung und an Pin 7 der diskretisierte Trommelumfang. Die Pins werden hierfür als *input* definiert.

Hieran schließt sich der schrittweise abzuarbeitende Hauptteil des Programms an, welcher in einer Schleife unendlich oft ausgeführt wird.

Als Erstes werden die Stellung des Tuchs und des Linearmotors eingelesen. Hierzu werden die Spannungen an den Pins 16 und 17 vom Arduino gemessen und in einen Zahlenwert zwischen 0 und 1024 umgerechnet, der Spannungswert wird diskretisiert. Die Ergebnisse dieser Rechnung werden für die Lichtschranke in der Variablen *LichtschrankeSpannung* und für den Linearmotor in *MotorPoti* gespeichert.

Am Pin 7 wird die Stellung der Trommel eingelesen. Das Signal von der SPS wird ähnlich einem Inkrementalgeber übergeben. Es ist entweder vorhanden oder nicht. Man spricht von den Status *high* und *low*. Das eingelesene Signal wird als vorhanden oder nicht vorhanden im zweiten Element des Variablenarrays *TrommelgeberArray* gespeichert. Dies ist als Array ausgelegt, um einen Wechsel zwischen den Pegeln erkennen zu können. Durchgeführt wird dies mit der anschließenden bedingten Anweisung. Sind Bedingungen nicht erfüllt, werden enthaltene Anweisungen übersprungen.

Falls das gemessene Signal für die Trommelstellung *low* entspricht, wird dies ebenfalls an das erste Element von *TrommelgeberArray* übergeben.

Es soll nur ein Stellvorgang durchgeführt werden, wenn die Trommel um einen diskreten Schritt gedreht hat. Dadurch wird eine Überlastung des Linearmotors verhindert, während noch ausreichend genau geregelt werden kann. Gelöst wird dies, indem die anstehende

7 Programmablauf

Bedingung erfüllt werden muss. Es wird ein Wechsel der Pegel am Pin für die Trommelstellung erkannt. Das erste Element des Arrays *TrommelgeberArray* muss dabei *low* und das zweite *high* enthalten.

Ist die zuvor beschriebene Bedingung erfüllt, wird die Berechnung des Stellwegs durchgeführt. Darin wird als erstes vom Wert der Gabellichtschranke deren Wert für die ideale Mittelstellung subtrahiert. Die Mittelstellung liegt logischerweise in der Mitte des verfügbaren Wertebereichs der Gabellichtschranke und ist fix mit *LichtschrankeIdeal = 512* definiert. Das Ergebnis daraus wird in der Variablen *LichtschrankeDifferenz* gespeichert. Dieser Wert lässt sich in Analogie zum geschlossenen Regelkreis aus Abbildung 1-1 als Regelabweichung *e* verstehen. In der nachfolgenden Zeile wird die Regelabweichung in jedem Berechnungsschritt in der Variablen *LichtschrankeDifferenzSumme* aufsummiert. Da schon die Berechnung der Regelabweichung positive als auch negative Werte annehmen kann, gilt dies auch für die Aufsummierung. Für den Fall, dass dabei ein Wert größer 100 oder kleiner -100 entsteht, wird er auf eben diesen begrenzt. Dies geschieht in den darauffolgenden Zeilen. Es handelt sich dabei um das Anti-Windup.

Der Kern der Regelung folgt in der nächsten Berechnung, der Bestimmung der Stellgröße. Da dem Linearmotor nicht einfach eine Position vorgegeben werden kann, an die er fahren soll, sondern nur ein Befehl zum Ansteuern der Fahrtrichtung, muss die Position über einen Vergleich von gewünschter und momentaner Stellung durchgeführt werden. Idealerweise läuft das Tuch an einer geraden Kante auf. Diese Kante wird nun mit der Mitte der Gabellichtschranke bestimmt. Ebenfalls ideal betrachtet, befindet sich auch der Linearmotor in der Mittelstellung. In diesem idealen Modell überträgt sich die Abweichung des Tuchs von der Mittellage direkt in den zu stellenden Weg für den Linearmotor. Es ist also wichtig die Mitten als Referenz zu wählen. Die Variable *MotorPotiMerk* entspricht der Stellgröße. Beachtet wird hierbei, dass der Linearmotor in zwei Richtungen stellen kann, ausgehend von seiner Ruhestellung in der Mitte. Verglichen mit der Gleichung 4-5, wird die Stellgröße von der Mittelstellung subtrahiert. Die Analogien lauten: $MotorPotiMerk := u_S$, $LichtschrankeDifferenz := e$, $LichtschrankeDifferenzSumme := eSumme$ und $LichtschrankeDifferenzAlt := eAlt$. *LichtschrankeMitte* ist die Mittelstellung.

Darauf folgt im Code die Umsetzung der Gleichung 4-6. Initial wird der Wert für die vorangegangene Regelabweichung mit 0 belegt.

Es folgen zwei bedingte Anweisungen, wodurch die Stellgröße begrenzt wird. Dies soll den Fahrweg des Linearmotors einschränken, um Schäden an den Lagern zu verhindern.

Abschließend zu den Berechnungen wird der *high* Pegel aus dem zweiten Element des Arrays in das erste geschrieben. Dadurch wird verhindert, dass beim nächsten Durchlauf des Programms die Berechnung sofort wieder durchgeführt wird, sondern erst, wenn ein Pegelwechsel stattgefunden hat, die Trommel sich also um eins der Teilstücke bewegt hat.

7 Programmablauf

In die Variablen *FahrtAbwaerts* und *FahrtAufwaerts* wird als nächstes der Pegel des Wertes von der SPS eingelesen, in welche Richtung das Tuch verfährt. Es muss dabei scharf unterschieden werden, da nur beim Aufwickeln auf die untere Trommel geregelt werden soll und nur dann in die Mittelstellung gefahren werden soll, wenn auf die obere Trommel aufgewickelt wird. Man könnte auf die Idee kommen, dass ein Signal mit zwei Pegeln dafür genügt. Im Testverfahren hält die SPS den letzten Pegel jedoch nicht aufrecht. Dadurch wird jedes Stehenbleiben als Fahrt in Richtung der oberen Trommel interpretiert. Sobald ein Regelbetrieb stattfindet, wird dieses Problem behoben und innerhalb der SPS verarbeitet, da die Regelung bzw. der Regler in der SPS umgesetzt wird.

Wenn nun durch die SPS an PIN 9 signalisiert wird, dass das Tuch auf der oberen Trommel aufgewickelt wird, wird die Bedingung der anstehenden Anweisung erfüllt. Die Anweisung dient zum Verfahren des Linearmotors in die Mittelstellung. Dazu wird verglichen, ob der Linearmotor in eine der beiden Richtungen von der Mittelstellung abweicht. Ist dies der Fall, wird er in die entgegengesetzte Richtung verfahren. Dies wird solange aufrechterhalten, bis er die Mittelstellung erreicht hat. Dafür wird ein Vergleich für linksseitig, einer für rechtsseitig und einer für die Mittelstellung durchgeführt. Ist die Mittelstellung erreicht, wird der Befehl zum Verfahren gestoppt. Diese Vorgehensweise entspricht dem Prinzip des Dreipunktreglers [10, S. 350]. Dafür wird der gesamte Code vielfach durchlaufen, da die aktuelle Position des Motors am Anfang des Programms immer wieder neu eingelesen werden muss. Die Zykluszeit des Arduino von wenigen Millisekunden ist dafür ausreichend. Wäre sie zu lang, würde der Linearmotor über das Ziel hinwegfahren.

Dasselbe Prinzip wird am Ende des Programms verwendet. Es behandelt das Stellen des Linearmotors bei Aufwickeln auf die untere Trommel. In die Anweisungen gelangt das Programm, wenn die Signale für Abwärtsfahrt und Trommelbewegung anliegen, sprich *high* gemessen werden. Dann wird geprüft, ob und wenn ja in welcher Richtung die Linearmotorstellung von der Stellgröße abweicht. Wie schon beim Verfahren in die Mittelstellung, wird der Linearmotor in ausgleichender Richtung verfahren. Sobald die gewünschte Position erreicht oder die Bedingung zum Verfahren nicht erfüllt ist, wird der Linearmotor abgeschaltet.

8 Entwickeln der Reglerparameter

Für den Testbetrieb ist eine Handsteuerung des Prototyps der Pegelanzeige in die SPS integriert worden. Hierbei dienen zwei Taster zum Verfahren des Tuchs in jeweils eine Richtung. Die Geschwindigkeit des Tuchs beträgt beim Aufwickeln auf die untere Trommel, also dem Fall bei dem geregelt wird, ca. 4,5 Meter pro Minute. Bei dieser Geschwindigkeit ist sichergestellt, dass der Linearmotor ausreichend schnell verfahren kann, ehe ein neues Signal zum Stellen ansteht. Idealerweise ist die Verfahrgeschwindigkeit des Linearmotor gegenüber der Bahngeschwindigkeit unendlich groß. Im realen Betrieb der Anlage bewegt sich das Tuch noch wesentlich langsamer als im Testbetrieb. Daraus lässt sich schließen, dass eine funktionierende Regelung im Testbetrieb eine funktionierende Regelung im realen Betrieb garantiert.

Wenn das Tuch auf die obere Trommel aufgewickelt wird, stellt der Linearmotor den Lagerbock in die Mittelstellung. Die beiden Trommeln sind hierbei achsparallel zueinander ausgerichtet, so wie es vor der Modifizierung mit einer Bahnkantenregelung, aufgebaut war. In dieser Fahrtrichtung wird nicht geregelt und daher liegt die Bahngeschwindigkeit bei ca. 17 Metern pro Minute. Dadurch werden die Wartezeiten zwischen zwei Testläufen deutlich verkürzt.

Die Parameter des Reglers werden in Anlehnung an die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen empirischen Methode entwickelt. Zunächst werden die Werte für $K_i = 0$ und $K_d = 0$ gesetzt. K_p wird zunächst mit kleinen Werten belegt. Nach jeder Veränderung wird das Tuch für einige Meter verfahren. Dabei wird die auflaufende Kante kontrolliert. Anfangs ist zu erkennen, dass der gestellte Weg nicht ausreicht, um das Tuch gerade aufwickeln zu lassen. Die Werte für K_p werden anschließend verdoppelt, bis ein Übersteuern des Stellwegs zu erkennen ist. Daraufhin wird die letzte Verdoppelung wieder halbiert, bis der Stellweg erneut nicht ausreichend ist. Dies wird iterativ bis zu einer akzeptablen Regelung durchgeführt. Dafür bedarf es etwa zehn Durchläufe. Das Verfahren erinnert an das Bisektionsverfahren aus der Mathematik zum iterativen Annähern an Nullstellen und ist bewusst daran angelehnt.

Zu Demonstrationszwecken und um ein noch präziseres Ergebnis zu erzielen, werden folgend K_i und K_d mit Werten größer null belegt. Der integrative Anteil soll für stationäre Genauigkeit sorgen und der differenzielle Schwingen verhindern. Diese Faktoren wirken sich allerdings nur in geringem Maß aus, da der proportionale Anteil des Reglers überwiegt.

9 Ergebnisse, Bewertung und Ausblick

Zahlreiche Testläufe haben zu einem ständig besser werdenden und schließlich sehr guten Ergebnis geführt. Während das Tuch auf die untere Trommel aufwickelt, reagiert der Linearmotor schnell und präzise auf Abweichungen vom Sollwert, gemessen mit der Gabellichtschranke. Dabei findet das Stellen so schnell statt, dass der gemessene Versatz auf der nur sehr kurzen Strecke zwischen Gabellichtschranke und Berührungspunkt des Tuchs mit der Trommel ausgeglichen wird. Der Regler ist so gut eingestellt, dass der durch den Linearmotor angefahrne Punkt genau dem gewünschten entspricht. Die auflaufende Kante des Tuchs auf der Trommel variiert um höchstens einen Millimeter. Die folgenden Abb. 9-1 und Abb. 9-2 zeigen den Vergleich zwischen den Wickelergebnissen, ohne und mit Bahnkantenregelung.



Abb. 9-1 Wickelergebnis ohne Regelung



Abb. 9-2 Wickelergebnis mit Regelung

Das Ergebnis lässt sich beliebig oft reproduzieren, auch wenn das Tuch von der oberen Trommel ablaufend deutliche Abweichungen von der idealen Lage aufweist. Um dies prüfen zu können, wurde beim Aufwickeln auf die obere Trommel bewusst eine Schiefstellung der unteren Trommel erzeugt. Dadurch wickelte das Tuch auf der oberen Trommel mit mehreren Zentimetern Versatz auf.

9 Ergebnisse, Bewertung und Ausblick

Beim Testen wurde festgestellt, dass je besser das Tuch auf der unteren Trommel aufgewickelt wird, in entgegengesetzter Richtung ebenfalls ein besserer Lauf entsteht.

Eine wichtige Erkenntnis lag in der Notwendigkeit von ausreichend großer Spannung des Tuchs, erzielt durch die Vorspannung der unteren Trommel. Die aufgebrachte Markierung auf der Feder im Inneren der Trommel verrät, um wie viele Umdrehungen diese vorgespannt ist. Bei zunächst nur fünf Umdrehungen kommt es zu Problemen. Das Tuch wickelt bei dieser Vorspannung zu weich auf. Es ist zu wenig Reibung zwischen den Lagen vorhanden. Somit führt es dazu, dass das Tuch aus den Mittellagen zur Seite herausgequetscht wird. Man spricht dabei auch von „Teleskopieren“. Das Tuch wird unter lateral unterschiedlicher Spannung aufgewickelt. Ist das Streben diese Spannung auszugleichen größer als die vorhandene Reibung zwischen den Lagen des Tuchs tritt dieses Phänomen auf.

Wenn die Vorspannung der Trommel auf etwa acht Umdrehungen erhöht wird, tritt in der vorhandenen Konstellation kein Teleskopieren mehr auf. Für ein anderes Tuch muss dieser Wert nicht ausreichend sein, respektiv genügt auch ein geringerer Wert. Das hängt von den unterschiedlichen Spannungen im Tuch und somit auch vom nötigen Stellweg ab.

Diese Arbeit hat die Vermutung, dass eine Regelung das bis dahin als unbrauchbar geltende Tuch verwendbar zu machen, bestätigt. Die verwendeten Mittel haben nur geringe Kosten erzeugt und werden sich in kurzer Zeit amortisieren. Da jedes reale Tuch keine idealen Eigenschaften haben kann (siehe Kapitel 2.1) und auch im Lauf der Zeit durch Verunreinigung oder Abnutzung Änderungen auftreten können, wird es bei einer unregelmäßigen Anlage auch immer zu einem lateralen Versatz kommen. Die minimalen Veränderungen und nötigen Maßnahmen an der Anlage verdeutlichen, dass eine Investition in eine Regelung lohnenswert ist. Aufwand für Überwachung und Korrigieren von Fehlstellungen von Hand entfallen.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, wird der Regler und die Ansteuerung bzw. Verarbeitung von Signalen in die vorhandene SPS integriert. Außerdem wird ein hochwertigerer Linearmotor, voraussichtlich mit einem verschleißfreien Wegmesssystem, beschafft. Durch die Maßnahmen wird eine deutlich verringerte Ausfallwahrscheinlichkeit erzielt und der Wartungsaufwand auf ein Minimum reduziert. Des Weiteren wird die Verdrahtung normgerecht ausgeführt und notwendige Anpassungen für eine CE-Zertifizierung integriert.

10 Literaturverzeichnis

[1]	ARDUINO: https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs (Zugriff am 29.01.2019).
[2]	DIN IEC 60050-351 (2014): Leittechnik. Beuth Verlag.
[3]	ERHARDT UND LEIMER: https://www.erhardt-leimer.de/produkte/bahnlauftechnik/bahnlaufregelsysteme/ (Zugriff am 29.01.2019).
[4]	LUNZE J. (2016): Regelungstechnik 1; Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 11. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag.
[5]	LUTZ H.; WENDT W. (2007): Taschenbuch der Regelungstechnik; 7., ergänzte Auflage. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag.
[6]	PEGELTURM WASSERSEITIG: https://bildarchiv-hamburg.com/photo/pegelturm-uhrturm-pauli-landungsbruecken-hintergrund-hamburger-bismarckdenkmal-JH8TRQdwoc (Zugriff am 29.01.2019).
[7]	REGELUNGSTECHNIK: https://www.rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik (Zugriff am 29.01.2019).
[8]	REGLER GESCHICHTE: http://www.techkyb.de/diplom/wasistkybernetik/geschichte/wasseruhr/ (Zugriff am 29.01.2019).
[9]	SCHMID D. (2014): Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik, 14., überarbeitete Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel.
[10]	SCHNEIDER W. (2008): Praktische Regelungstechnik, 3. Auflage. Weisbaden: Vieweg Teubner.

Literaturverzeichnis

[11]	UNBEHAUEN H. (2007): Regelungstechnik I; 14. verbesserte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag.
[12]	WIKIPEDIA: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Blockschaltbild_erweiterter_regelkreis.gif/ . (Zugriff am 03. 01. 2019).

Anhang

A1 Gabellichtschränke Datenblatt.....	VIII
A2 Linearmotor Datenblatt.....	X
A3 Entwickeltes Programm.....	XII

A1 Gabellichtschranke Datenblatt



GS 754B

CCD-Gabel-Lichtschranken



de 04-2014/02 50120624-01



98mm



- CCD-Zeilensensor mit 25mm Messbereich
- Analoge, digitale oder serielle Schnittstellen
- Messbereich und Messmodus parametrierbar
- Teach-In Funktion
- Mehrfachobjekterkennung
- Schaltausgang parametrierbar
- Erkennung transparenter Medien
- Metall-Drehstecker



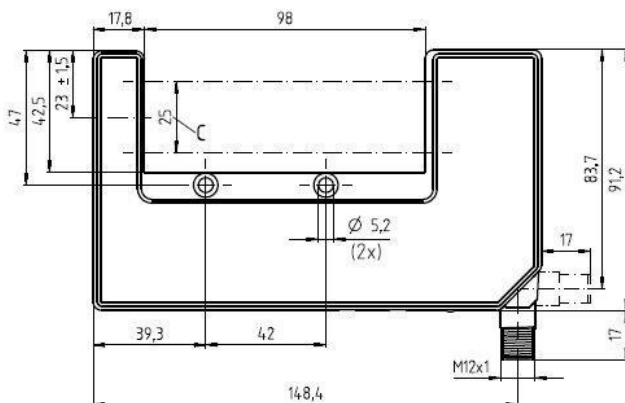
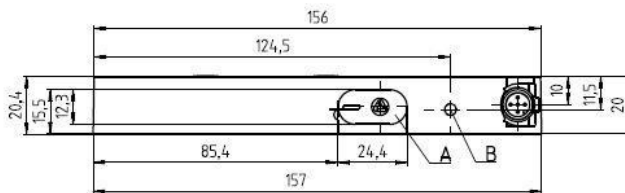
Änderungen vorbehalten • DS_GS754B08_de_50120624_01.fm

Zubehör:

(separat erhältlich)

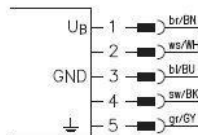
- M12 Leitungsdosen (KD ...)
- Leitungen mit M12-Rundsteckverbindung (K-D...)
- Parametrier-Leitung für PC (KB-ODS 96-1500, Art.-Nr. 50082007)

Maßzeichnung



- A Schnittstelle
- B Anzeigediode
- C optischer Erkennungsbereich

Elektrischer Anschluss



Gerätevariante	PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4	PIN 5
RS 232	10...30VDC	I/O	GND	TxD	FE - Funktionserde
RS 422	10...30VDC	Tx-	GND	Tx+	FE - Funktionserde
Analog Spannung	18...30VDC	I/O	GND	Analog	FE - Funktionserde
Analog Strom	18...30VDC	I/O	GND	Analog	FE - Funktionserde

Technische Daten

Optische Daten	
Maulweite	98mm
Maultiefe	42mm
Messbereich	25mm
Auflösung ¹⁾	a: 0,1 mm (Mode 1 ... 5) b: 0,014 mm (Mode 7)
Reproduzierbarkeit ²⁾	± 0,03mm
Linearität ²⁾	± 0,36mm
Minimaler Objektdurchmesser	0,5mm
Objektposition	beliebig (siehe Hinweise)
Lichtquelle	LED (Wechsellicht)
Wellenlänge	850nm
Zeitverhalten	
Ansprechzeit	min. 12ms
Ausgabezyklus	0,012 ... 3,00s
Bereitschaftsverzögerung	≤ 300ms
Elektrische Daten	
Betriebsspannung U _B ³⁾	mit RS 232/RS 422: 10 ... 30VDC (inkl. Restwelligkeit) mit Analogausgang: 18 ... 30VDC (inkl. Restwelligkeit)
Restwelligkeit	≤ 15% von U _B
Leerlaufstrom	≤ 60mA
Ausgangsvarianten	
aktiv/inaktiv	≥ 8V/≤ 2V oder unbeschaltet
Aktivierung-/Sperrverzögerung	≤ 1ms
Eingangswiderstand	ca. 6kΩ
Schaltausgangsstrom	Pin 2: max. 100mA
Analogausgang Strom	(0)4 ... 20mA (abhängig vom Ausgabemodus), R _L ≤ 500Ω
Analogausgang Spannung	(0)2 ... 10V (abhängig vom Ausgabemodus), R _L ≥ 2kΩ
Serielle Schnittstelle	RS 232/RS 422
Teacheingang	Pin 2 umschaltbar
Schaltausgang	Pin 2 umschaltbar
Anzeigen	
LED grün Dauerlicht	betriebsbereit
LED grün blinkend	Störung
Mechanische Daten	
Gehäuse	Zink Druckguss
Gewicht	290g
Optikabdeckung	Kunststoff (siehe Hinweise)
Anschlussart	M12-Rundsteckverbindung, Metall, 5-polig
Umgebungsdaten	
Umgebungstemperatur (Betrieb/Lager)	-20°C ... +50°C/-30°C ... +60°C
Schutzbeschaltung ⁴⁾	1, 2, 3
VDE-Schutzklasse	III
Schutzart	IP 67
Lichtquelle	Freie Gruppe (nach EN 62471)
Gültiges Normenwerk	IEC 60947-5-2
Zulassungen	UL 508, C22.2 No.14-13 ^{3) 5)}

1) Systemauflösung, d. h. kleinster praktischer Wert für die letzte Stelle der Anzeige
 2) Gültig für ein Objekt mit einer Entfernung von max. 2mm über dem Empfänger
 3) Funktionskleinspannung mit sicherer Trennung oder Schutzkleinspannung (VDE 0100/T 410), Bei UL-Applikationen: nur für die Benutzung in "Class 2"-Stromkreisen nach NEC
 4) 1=Transientenschutz, 2=Verpolschutz, 3=Kurzschluss-Schutz für alle Ausgänge
 5) These proximity switches shall be used with UL Listed Cable assemblies rated 30V, 0.2A min. in the field installation, or equivalent (categories: CYJV/CYJV7 or PVVA/PVVA7)

Bestellhinweise

Auswahltabelle		GS 754B/D24-98-S12 Art.-Nr. 50119710	GS 754B/D3-98-S12 Art.-Nr. 50119711	GS 754B/O4-98-S12 Art.-Nr. 50117818	GS 754B/C4-98-S12 Art.-Nr. 50119712
Bestellbezeichnung →					
Ausstattung ↓					
Ausgangsvariante	RS 232	●			
	RS 422		●		
	Analog Spannung			●	
	Analog Strom				●
Pin 2 Konfigurierbar	I/O	●		●	●

Tabellen

Diagramme

Hinweise

- **Bestimmungsgemäßer Gebrauch:** Dieses Produkt ist nur von Fachpersonal in Betrieb zu nehmen und seinem bestimmungsgemäßen Gebrauch entsprechend einzusetzen. Dieser Sensor ist kein Sicherheitssensor und dient nicht dem Personenschutz.
- Funktionserde muss verdrahtet werden.
- Fremdlichtquellen dürfen nicht von vorne in den Empfänger strahlen.
- Objekte ≤ 1 mm sollten vor dem Empfänger abgetastet werden.
- Zur Reinigung der Optikabdeckungen nur faserfreien Lappen verwenden. Spitze und harte Gegenstände zerstören die Optik.

A2 Linearmotor Datenblatt

Drive-System Europe Ltd.

Linear-Elektrozylinder DSZY1-Potentiometer

Linear-Elektrozylinder werden in den unterschiedlichsten Anwendungen benötigt. Den Elektrozylinder DSZY1 gibt es in 3 Ausführung:

1. DSZY1-Standard
(für alle Anwendungen ohne Positionsrückführung)
2. DSZY1-POT
(mit Potentiometer für absolute Positionsrückführung)
3. DSZY1-Hall
(mit Hallensensor für inkrementelle Positionsrückführung)

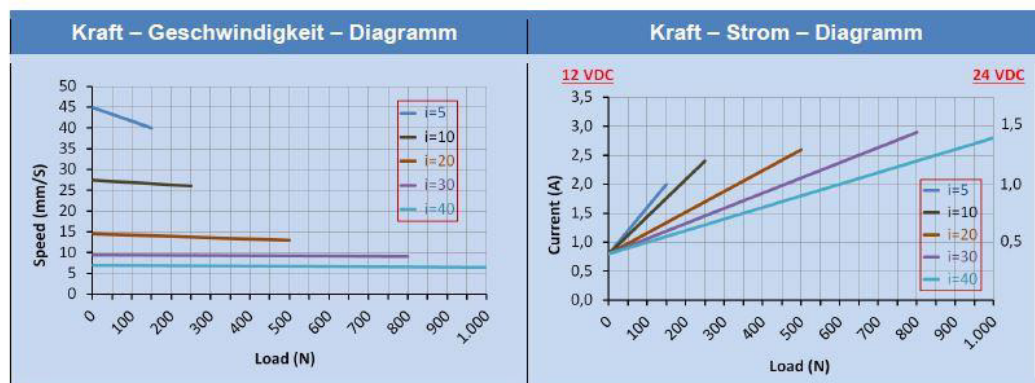
Ausgestattet mit einer Trapezgewindespindel (ACME screw), handelt es sich um kleine, kompakte und leichte DC-Linearantriebe. Durch eine integrierte Diodenschaltung, erfolgt eine schnelle Richtungsumkehrung durch einfache Spannungsumpolung des DC-Motors. Standardmäßig verfügen alle DSZY1 Typen über zwei integrierte, direkt mit dem DC-Motor verbundene, nicht einstellbare Endschrter. Eine Überlastung des Antriebes kann durch eine separate Überwachung und Begrenzung des Stromes verhindert werden.



Typenschlüssel (alle Größen kombinierbar)

DSZY1	-	12	-	10	-	200	-	POT - IP65
Typ		Spannung		Untersetzung		Hub		Potentiometer und Schutzart
		12V		5		25mm		
		24V		10		50mm		
				20		100mm		
				30		150mm		
				40		200mm		
						250mm		
						300mm		

Diagramme

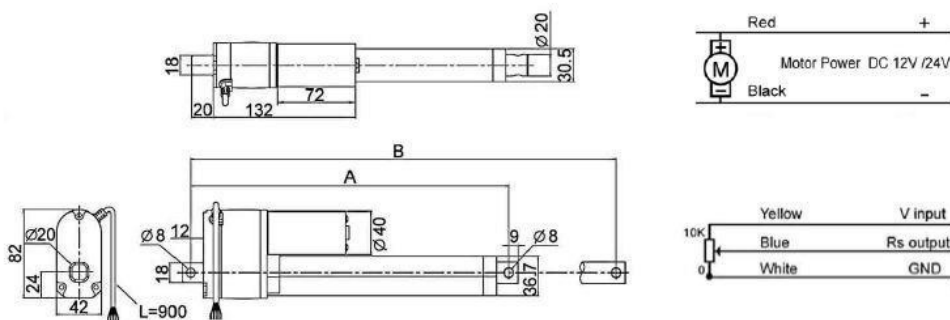


Weitere technische Daten

- Schub- und Zugkraft bis 1.000N
- Statische Kraft bis 2.000N (bei i=40)
- Arbeitstemperatur -26°C- 65°C
- Einschaltdauer 25% (1min kontinuierlicher Betrieb - 3min Pause)
- Gehäuse aus Zinklegierung
- Außenrohr und Schubstange aus Aluminium
- Betriebsspannung 12V und 24V
- Schutzart IP65 für alle Ausführungen
- Geräuschpegel: ≤ 74dB

Bemaßung

Elektrozylinder	Länge	Maße in mm						
	Hub ± 3mm	25	50	100	150	200	250	300
DSZY1 – Version Potentiometer	A eingefahren	165	195	246	297	348	399	450
	B ausgefahren	190	245	346	447	548	649	750
	Poti-Werte in KOhm		0,3-9,3	0,3-9,7	0,3-8,6	0,3-9,6	0,3-9,3	0,3-9,3



Zubehör

C1x Hole $\varnothing 8$ C2x Plastic Connector $\varnothing 8$ C3x Universal Joint $\varnothing 8$	<p>Für die Kolbenstange stehen mehrere End-Connectoren zur Verfügung. C1x - ist die Standard-Auslieferung</p> <p>Wünschen Sie eine andere Variante, hängen Sie bitte C2x oder C3x an den Typenschlüssel an.</p> <p>Achtung: bei C3x vergrößert sich das Maß A bzw. B um 41mm</p>	Clamp Mounting Bracket
<p>Befestigung für den Zylinder</p> <p>Clamp: DSZY1-H01 Mounting Bracket: DSZY1-H02 Bitte separat bestellen.</p>		

Installationshinweis

Es ist sicher zu stellen, dass die Last nicht größer ist als im Diagramm gezeigt. Zum Schutz gegen Überlastung muss beim Erreichen des max. Stromes abgeschaltet werden. Dieser ist in den Diagrammen in Abhängigkeit der gewählten Untersetzung abzulesen. Bitte die richtige Anschlussspannung, wie auf dem Elektrozyylinder angegeben, beachten. Die Kolbenstange fährt aus, wenn die rote Leitung mit Plus und schwarze Leitung mit Minus verbunden wird. Für das Einziehen der Kolbenstange ist Plus mit Minus zu vertauschen. Die Bewegung stoppt immer automatisch beim Erreichen der eingebauten Endscharter. Danach ist die Spannung umzupolen, um zurück fahren zu können. Die Endscharter sind kundenseitig nicht veränderbar. Die Last sollte immer in der Bewegungsrichtung zentriert sein. Querkräfte sollten vermieden werden. Sie verkürzen immer die Lebensdauer und können im Extremfall die Funktion behindern oder sogar das Gerät zerstören.

ACHTUNG: Die Endscharter sind keine Ein- und Ausschalter für den Zylinder. Deshalb muss die Spannung nach Auslösen der Endscharter zeitnah getrennt werden oder der Kolben muss zeitnah wieder aus der Endlage gefahren werden.

	<p>Drive-System Europe Ltd.</p>	<p>www.drive-system.com engineering@drive-system.com</p>
--	---------------------------------	---

A3 Entwickeltes Programm

```

/* Titel: Bahnkantenregelung
*
* Author: Lukas Zebulka
*
* Datum: 18.01.2019
*
* Version: 0.3.3
*
* Beschreibung: Das Programm dient zur Verarbeitung von Sensorwerten zu Regelgrößen auf einem Arduino-Board. Damit wird die Pegelanzeige der St. Pauli Landungsbrücken bahnkantengeregt.
* Zum Version 0.3.3 liegt ein PID-Regler vor. Es werden Werte einer Gabellichtschranke(GLS), die Position eines Linear motors, eine Laufrichtung des Pegeltuchs und ein davon abhängiger Takt
* verarbeitet. Die GLS misst die lateralen Ausrichtung des Tuchs. Dieser Wert wird mit einem gewünschten Wert verglichen und daraus wird eine Stellgröße für den Motor generiert.
* Ziel ist es die Abweichung des Tuchs vom Sollwert in lateraler Richtung zu Null zu regeln, damit das Tuch auf der Anlage gerade aufwickelt. Dies geschieht, solange das Tuch auf die
* untere Trommel aufwickelt. Wird in die entgegengesetzte Richtung verfahren, wird der Linear motor in eine Mittelstellung gefahren.
*
*/

bool FahrtAbwaerts = LOW; //Fahrtrichtungskontrolle abwärts, abhängig von Tide
bool FahrtAufwaerts = LOW; //Fahrtrichtungskontrolle aufwärts, abhängig von Tide
float LichtschrankeSpannung = 0; //Istwert; Variable zum Zischenspeichern der Sensorwerte der GLS
float MotorPoti = 0; //Variable zum Zischenspeichern der Potentiometerwerte des Linear motors
float MotorPotiMerk = 0; //Hilfsvariable, die zum Stellen des Motors benötigt wird
const float LichtschrankeMitte = 512; //Sollwert der Lichtschranke
float LichtschrankeDifferenz = 0; //Variable für Differenz zwischen Soll- und Istwert des Tuchs in der GLS
float LichtschrankeDifferenzSumme = 0; //Variable für den I-Anteil der Regelgröße
float LichtschrankeDifferenzAlt = 0; //Variable für den D-Anteil der Regelgröße
const int Wartezeit = 20; //Größe für Verzögerung im Programmablauf; in ms
const int Schwelle = 7; //Schwelle gegen Zittern
const float Kp = 1.6; //Verstärkung des P-Anteils
const float Ki = 0.5; //Verstärkung des I-Anteils
const float Kd = 5; //Verstärkung des D-Anteils
bool TrommelgeberArray[2] = {LOW,LOW}; //Inkrementalgeber wird in zweites Element eingelesen; realisiert durch SPS; Array für ein Flip Flop

void setup() {
    pinMode(2, OUTPUT); //Pin als Ausgang für Motorrichtung einfahren definiert
    pinMode(3, OUTPUT); //Pin als Ausgang für Motorrichtung ausfahren definiert
    pinMode(5, INPUT); //Pin als Eingang für Fahrtrichtung abwärts definiert
    pinMode(7, INPUT); //Pin als Eingang für inkrementellen Fahrtweg definiert
    pinMode(9, INPUT); //Pin als Eingang für Fahrtrichtung aufwärts definiert
}

void loop() {
    //Einlesen der Sensorwerte
    LichtschrankeSpannung = analogRead(16); //Einlesen des Istwerts des Tuchs in der GLS
    MotorPoti = analogRead(17); //Einlesen der Motorstellung
    TrommelgeberArray[1] = digitalRead(7); //Einlesen der Inkrementalwerte der Trommeldrehung

```

```
//Flip Flop
if(TrommelgeberArray[1] == LOW){
  TrommelgeberArray[0] = TrommelgeberArray[1];
}

if(TrommelgeberArray[0] == LOW && TrommelgeberArray[1] == HIGH){
  //Bedingung, um nur nach bestimmtem Verfahrenweg weietern Regelschritt zu machen

  LichtschankeDifferenz = LichtschankeSpannung - LichtschankeMitte;
  LichtschankeDifferenzSumme = LichtschankeDifferenzSumme + LichtschankeDifferenz;
  //Berechnung der Differenz zwischen Soll- und Istwert
  //Aufsummieren der Differenzen für I-Anteil

  //Anti-Wind-Up
  if(LichtschankeDifferenzSumme > 100){
    LichtschankeDifferenzSumme = 100;
  }

  if(LichtschankeDifferenzSumme < -100){
    LichtschankeDifferenzSumme = -100;
  }

  //Berechnen des nötigen Verfahrenwegs für den Motor in Abhängigkeit seiner aktuellen Position

  MotorPotiMerk = LichtschankeMitte - (Kp * LichtschankeDifferenz + Ki * LichtschankeDifferenzSumme + Kd * (LichtschankeDifferenz - LichtschankeDifferenzAlt));
  LichtschankeDifferenzAlt = LichtschankeDifferenz;

  //Stellgrößenbegrenzung
  if(MotorPotiMerk > 850){
    MotorPotiMerk = 850;
  }

  if(MotorPotiMerk < 150){
    MotorPotiMerk = 150;
  }

  TrommelgeberArray[0] = TrommelgeberArray[1];
  //Flip Flop zurücksetzen
}

FahrAbwaerts = digitalRead(5);
FahrAufwaerts = digitalRead(9);
//Checkt die Fahrtrichtung

if(FahrtAufwaerts == HIGH){
  if(MotorPoti < 475){
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    delay(Wartezeit);
  }

  //Ist der Schwellwert überschritten, wird der Motor entgegenwirkend angesteuert.
```

```
else if(MotorPoti > 525){
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    delay(Wartezeit);
}

else{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
}
}

if(FahrtAbwaerts == HIGH && TrommelgeberArray[1] == HIGH){ //Bedingungen zum Verfahren des Motors (Schwellwert, Laufrichtung, Regelschritt)

    //Der Motor wird ausgefahren, wenn er seinen Sollwert noch nicht erreicht hat
    if(MotorPoti < MotorPotiMerk){
        MotorPotiMerkFahr = MotorPotiMerk - Schwelle; //Schwelle gegen Zittern
    }
    if(MotorPoti < MotorPotiMerkFahr){
        digitalWrite(2, LOW);
        digitalWrite(3, HIGH);
        delay(Wartezeit);
    }
}

//Der Motor wird eingefahren, wenn er seinen Sollwert noch nicht erreicht hat
if(MotorPoti > MotorPotiMerk){
    MotorPotiMerkFahr = MotorPotiMerk + Schwelle; //Schwelle gegen Zittern
}
if(MotorPoti > MotorPotiMerkFahr){
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    delay(Wartezeit);
}
}

//Ansonsten wird der Motor gestoppt
else{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    delay(Wartezeit);
}
}
```

