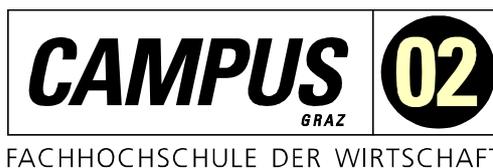


Masterarbeit

AUTOMATISIERTES VORMESSEN VON TRANSFORMATOREN

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Benedikt Muschett, BSc

1810322004

betreut und begutachtet von
FH-Prof. Dipl. Ing. Dieter Lutzmayr

Graz, im Dezember 2019

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Meiner Freundin und Familie möchte ich für die moralische Unterstützung, Motivation und vor allem für das viele Verständnis in dieser arbeitsintensiven Zeit danken. Weiters gilt mein Dank meinem Arbeitgeber, der Siemens Weiz, die dieses Projekt ermöglicht und die finanziellen Mittel für die praktische Umsetzung bereitgestellt hat. Besonders hervorheben möchte ich hierbei meine Kollegen, meinen Vorgesetzten Herrn Dipl. Ing. (FH) Johann Raminger und die DT-Leitung. Es macht wirklich Spaß, in so einem fortschrittlich denkenden Unternehmen zu arbeiten.

Ein besonderer Dank geht auch an meinen Betreuer Herrn FH-Prof. Dipl. Ing. Dieter Lutzmayr, der mit viel Engagement und wertvollen Ratschlägen meine Masterarbeit betreut hat.

KURZFASSUNG

Automatisierung in der Transformatorenproduktion ist aufgrund der individuellen Fertigung eine große Herausforderung, jedoch für den nachhaltigen Unternehmenserfolg unumgänglich. Deshalb wird punktuell in jenen Bereichen automatisiert, die sich als geeignet erweisen. Die Systemanforderungen sind hierbei vor allem der Umgang mit einer großen Bandbreite an verschiedenen Bauformen.

Diese wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit der Automatisierung der Aktivteil-Vormessung von Transformatoren. Besonders wird auf die Realisierung einer autonomen Umschaltvorrichtung für den Stufenschalter während des Prüfprozesses eingegangen. Dafür wird zuerst die Funktionsweise und der Aufbau der verschiedenen Stufenschalter-Bauformen behandelt und mittels Versuche deren benötigter Kraft- und Momentaufwand für eine Schalthandlung erfasst. Daraus folgend wird die geeignete Antriebstechnik und Sensorik eruiert und verschiedene Konstruktionskonzepte der Umschaltvorrichtung evaluiert. Das geeignetste Konzept wird umgesetzt, über eine Simatic S7 SPS gesteuert und in einem Versuchsaufbau getestet. Mit dem dadurch entwickelten und optimierten GRAPH-Programm ist der Prototyp in der Lage, verschiedenste Bauformen von Stufenschalter zu bedienen. Ebenfalls Teil dieser Arbeit ist die Konzeptionierung einer automatisierungs- und normgerechten Prüfzelle, um Messungen ohne Anwesenheit von Personal durchführen zu können.

Die Ergebnisse dieser Versuche helfen bei der Verbesserung von Hard- und Software und zeigen Herausforderungen und Lösungswege für die Implementierung in die Fertigungslinie auf.

ABSTRACT

Automation in transformer production is a major challenge due to rising individualisation in production. It is essential for the sustainable success of the company. Therefore, automation is carried out selectively in those areas that prove to be suitable. The system requirements here are above all the handling of a wide range of different designs.

This thesis deals with the automation of the active part pre-measurement of transformers. Particular attention is given to the realization of an autonomous switching device for the no-load-tap-changer during the test process. First, the mode of operation and the structure of the various tap-changer designs are dealt with. This includes the testing and recording of their attempts at force and torque required for a switching operation. Based on this step subsequently the appropriate drive technology and sensors are determined and various design concepts of the changeover device are evaluated. The most suitable concept is implemented, controlled by a Simatic S7 PLC and tested in an experimental set-up. As a result, a GRAPH-program is developed that will enable the prototype to operate a wide variety of no-load tap-changers. A further part of this thesis is the conceptual design of an automation and standard-compliant test cell to perform measurements without the presence of personnel.

The results of these experiments help to improve hardware and software and show challenges and solutions for implementation in the production line.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Notwendigkeit	1
1.2	Ausgangssituation	1
1.3	Aufgabenstellung	1
1.4	Zielsetzung.....	2
1.5	Umfeld.....	3
2	Transformator-Vormessung	4
2.1	Messergebnisse in Abhängigkeit der Stufe	4
2.2	Messung des Widerstandes	4
2.2.1	Strom-Spannungs-Methode.....	4
2.2.2	Kelvin-Thomson-Brücke-Methode	5
2.2.3	Digital-Mikro-Ohmmeter	5
2.3	Übersetzung.....	6
2.3.1	Kontrolle der Schaltgruppe	6
2.3.2	Messung des Übersetzungsverhältnisses mit Voltmetern.....	7
2.3.3	Übersetzungsmessung mit der Übersetzungsmessbrücke	8
2.4	Fazit	9
2.5	Messbrücke.....	9
2.5.1	Kommunikation mit Umschaltvorrichtung	9
2.5.2	Messaufbau	10
2.5.3	Derzeitiger Prüfablauf	11
3	Stufenschalter bei Verteiltransformatoren.....	12
3.1	Arten und Anwendung	12
3.2	Funktionsweise	12
3.3	Bauformen	14
3.3.1	Stufenschalter mit Griff	14
3.3.2	Stufenschalter mit Handrad	15
3.3.3	Andere Bauformen.....	15
3.4	Versuch: Kraft- und Momentbedarf für eine Schalthandlung	16
3.4.1	Vertikal-Zug-Messung.....	16
3.4.1.1	Messgerät	16
3.4.1.2	Versuchsaufbau.....	16
3.4.2	Drehmoment-Messung	17
3.4.2.1	Messgerät	17
3.4.2.2	Versuchsaufbau.....	17
3.4.3	Ergebnisse	18
3.5	Einbauposition	20
4	Antriebstechnik.....	21
4.1	Drehbewegung.....	21
4.1.1	Gleichstrommaschine	21

4.1.1.1	Drehrichtungsänderung	22
4.1.1.2	Drehzahlsteuerung	23
4.1.1.3	Positioniergenauigkeit	24
4.1.2	Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC)	25
4.1.2.1	Drehzahlregelung	26
4.1.2.2	Drehrichtungsänderung	27
4.1.2.3	Positioniergenauigkeit	27
4.1.3	Schrittmotor	27
4.1.3.1	Positioniergenauigkeit	27
4.1.3.2	Drehzahlsteuerung	28
4.1.3.3	Drehrichtungsänderung	29
4.1.4	Drehgeber	30
4.1.4.1	Inkrementalkode	30
4.1.4.2	Absolut-Kode	31
4.1.4.3	Fazit	31
4.1.5	Entscheidung	32
4.2	Vertikal-Hub	33
4.2.1	Gewindespindel-Lineartisch	34
4.2.2	Auswahl	34
4.2.3	Auslegung	35
4.3	Gesamtantrieb	36
5	Belastungsmessung	37
5.1	Sensorik	37
5.1.1	Kraftmessung	37
5.1.1.1	Dehnungsmessstreifen	38
5.1.1.2	Messschaltung	39
5.1.2	Momentmessung	40
5.1.2.1	Dehnungsmessstreifen	40
5.1.2.2	Messschaltung	41
5.1.3	Kraftmessdose	41
5.1.4	Messverstärker	41
5.1.5	Einbauposition	43
5.2	Alternative Messmethode: Motorstrommessung	43
5.2.1	Gleichstrommotor	44
5.2.2	Schrittmotor	44
6	Mechanische Umsetzung	46
6.1	Aufnahmeeinrichtung Stufenschaltergriff	46
6.1.1	Anbindung und Maße	46
6.1.2	Spiel-Festlegung	46
6.1.3	Wegmesssystem	48
6.1.4	Adapter-System	49
6.1.5	Gesamtkonstruktion	50

6.2	Umschaltvorrichtung-Positionierung	51
6.3	Deckenanbindung	51
6.3.1	Realisierung der Deckenanbindung	51
6.3.2	Realisierung der verkürzten Deckenanbindung.....	52
6.4	Positionierung am Deckel	53
6.4.1	Fixierung der Deckelanbindung	54
6.4.1.1	Elektromagnete	55
6.4.1.2	Schaltbare Permanentmagneten.....	55
6.4.1.3	Elektrisch schaltbare Permanentmagneten.....	55
6.4.1.4	Entscheidung und Auslegung.....	56
6.4.2	Konstruktion der Vorrichtung	57
6.4.3	Prototyp.....	58
6.5	Prüfanlage.....	60
6.5.1	Prüfanlage ohne Anwesenheit von Prüfpersonal	60
6.5.2	Prüffeld.....	60
6.5.3	Prüfplatz mit zwangsläufigen Berührungsschutz.....	60
6.5.4	Realisierung	61
7	Steuerungstechnik.....	62
7.1	Speicherprogrammierbare Steuerung	62
7.2	Hardware-Auswahl	62
7.2.1	Analog-Eingänge	62
7.2.2	Analog-Ausgänge	62
7.2.3	Digital-Eingänge	63
7.2.4	Digital-Ausgänge	64
7.2.5	CPU Auswahl.....	65
7.3	Versuchsaufbau	66
7.4	Motion-Control-Bausteine	68
7.5	Handbetrieb	69
7.6	Automatik-Betrieb	70
7.6.1	Identifikation Stufenschalter-Bauform.....	71
7.6.1.1	Stufenschalter entsperren	73
7.6.1.2	Entspannen des Stufenschalters.....	74
7.6.1.3	Statusabfrage	74
7.6.1.4	Identifikation eines grünen Stufenschalters.....	75
7.6.1.5	Identifikation eines grauen Stufenschalters / Fehlstellung.....	76
7.6.2	Schaltprogramm.....	76
7.6.2.1	Aus Arretierungsposition drehen	78
7.6.2.2	Stufenschalter zwischen zwei Stufen ablegen	78
7.6.2.3	Drehen bis zur Arretierung	79
7.6.3	Programm-Test in Feldversuchen	80
7.7	Momentmessung über Motorstrom.....	82
7.7.1	Belastungsversuch Getriebemotor	83

Inhaltsverzeichnis

7.7.1.1	Open-Loop	83
7.7.1.2	Closed-Loop	83
7.7.2	Belastungsversuch Linearantrieb	84
7.7.2.1	Open-Loop	84
7.7.2.2	Closed-Loop	85
8	Ergebnisse und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	88
	Abbildungsverzeichnis	90
	Tabellenverzeichnis	93
	Abkürzungsverzeichnis	94

1 EINLEITUNG

Dieses Kapitel befasst sich zuerst mit der Notwendigkeit und den Schwierigkeiten der Automatisierung in der Transformatoren-Produktion und dient der Beschreibung der Ausgangssituation dieses Projektes. In weiteren Punkten wird auf die Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit eingegangen und das Umfeld beschrieben.

1.1 Notwendigkeit

Die aktuelle wirtschaftliche Situation verlangt nach einem permanenten Wachstum. Dieser gestaltet sich jedoch durch den Preisdruck aus Billiglohnländern immer aufwendiger. Besonders für produzierende Unternehmen wird es immer schwieriger am Markt zu bestehen. Um ein nachhaltiges Wachstum zu gewährleisten, bedarf es eines Wettbewerbsvorteils. In der Transformatorenmanufaktur von Siemens ist dies die Qualität und die effiziente Produktion. Der Schlüssel zu beiden ist die Automatisierung. Diese gestaltet sich jedoch durch die individuelle Fertigung und die dadurch geringen Losgrößen schwierig. Vollautomatisierte Produktionsprozesse, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie sind entweder technisch nicht umsetzbar oder wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen. Der Großteil der Produktion ist deshalb nach wie vor individuelle Handarbeit. Die Mitarbeiter sind auch deshalb die wichtigste Ressource im Unternehmen, was tief in der Unternehmenskultur verankert ist. Um aber auch weiterhin den wachsenden Anforderungen an Qualität und Effizienz gerecht zu werden, bedarf es trotzdem einem bestimmten Maß an Automatisierung in jenen Bereichen, in denen es wirtschaftlich gerechtfertigt ist, um die Ressourcen der Mitarbeiter für andere Bereiche frei zu machen. Einer dieser Fertigungsbereiche ist die Vormessung der Transformatoren.

1.2 Ausgangssituation

Die Vormessung bei Transformatoren findet direkt nach der Aktivteilmontage statt, noch bevor der Aktivteil in den Kessel eingebaut und mit Öl geflutet wird, um mögliche Fehler noch mit relativ geringem Aufwand beseitigen zu können. Bei der Vormessung wird der Widerstand der Ober- und Unterspannungswicklung sowie das Übersetzungsverhältnis des Transformators gemessen. Da diese Messungen in allen Stufen des Transformators durchgeführt werden, bedarf es eines ständigen Umschaltens und dadurch Anwesenheit von Personal. Momentan sind für diese Aufgabe, je nach Größe des Transformators, ein bis zwei Arbeitskräfte über eine Stunde lang beschäftigt. Bei der bestehenden Messbrücke müssen neben der Stufenumschaltung auch die Anschlüsse des Messgerätes immer wieder umgeklemmt werden. Dies ist bei der neuen Messbrücke nicht mehr nötig, da jedoch die Stufenumschaltung per Hand durchgeführt werden muss, kann momentan noch nicht das gesamte Potential des neuen Messgerätes ausgeschöpft werden.

1.3 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist die Entwicklung einer Umschaltvorrichtung und die Anbindung an die Vormessbrücke. Das Problem bei den Stufenschaltern ist jedoch, dass diese oft sehr schwergängig sind und sich im Schaltmechanismus unterscheiden. Dazu kommt, dass durch deren verschiedenen Bauformen

der benötigte Kraftaufwand für einen Schaltvorgang stark variiert. Deshalb liegt das Untersuchungsinteresse zuerst in den Unterschieden der im Transformatorenbau verwendeten Stufenschaltern und deren Schwankungsbreite im Kraft- und Momentbedarf während der Schaltvorgänge. Dafür werden in Versuchen, Messungen an unterschiedlichen Bauformen durchgeführt. Diese Erkenntnisse fließen später in die Systemauswahl und Auslegung ein und werden für die Erstkonfiguration der Steuerung verwendet.

Eine weitere Herausforderung dieser Arbeit ist die Adaption der bestehenden Messzelle, sodass die Messungen ohne Anwesenheit von Prüfpersonal ablaufen können. Dies ist für die Automatisierung eine unerlässliche Voraussetzung, um eine Arbeitszeiterparnis zu erreichen. Dafür ist es notwendig die Messzelle mit einem Sicherheitssystem nachzurüsten und dieses ebenfalls in die Steuerung einzubinden.

1.4 Zielsetzung

Die Zielsetzung der Arbeit ist die Konzeptionierung der Anlage und die anschließende Evaluierung in Feldtests, um deren Praxistauglichkeit zu überprüfen. Ein Schwerpunkt soll dabei auf den Umschaltmechanismus und dessen Steuerung gelegt werden. Der Automatisierungsgrad des gesamten Vormess-Prozesses ist auf seine technischen und wirtschaftlichen Grenzen zu erhöhen. Die Aufgaben des Personals sollen sich lediglich auf das Anbringen der Anschlussklemmen des Messgerätes und der Umschaltvorrichtung am Transformatordeckel beschränken. Danach hat das Personal die Messzelle bis zum Abschluss der Prüfungen zu verlassen.

Im theoretischen Teil der Arbeit wird hierzu die notwendige Forschung betrieben, um die optimalen Komponenten der Anlage zu eruieren. Dazu sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie ist die Umschaltvorrichtung aufgebaut?
- Wie erfolgt der Antrieb für den Umschaltvorgang?
- Wie sind die Überwachung und Steuerung des Umschalters zu realisieren?
- Was wird für eine Prüfanlage ohne ständige Anwesenheit von Prüfpersonal benötigt?
- Wie kann die Kommunikation zwischen Messbrücke, Umschaltvorrichtung und Sicherheitssystem erfolgen?

Im praktischen Teil sollen zuerst durch Feldtests das Verhalten der verschiedenen Stufenschalter untersucht werden, um erste Anhaltspunkte für die Systemauslegung zu erhalten. In weiterer Folge soll mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem theoretischen Teil ein Prototyp entwickelt werden, der weitere Feldversuche unter Realbedingungen ermöglicht. Durch die Evaluierung dieser Versuche soll schließlich auf die Praxistauglichkeit der Anlage geschlossen werden, um diese in die Fertigungslinie integrieren zu können.

1.5 Umfeld

Die Vormessung der Aktivteile findet am Ende der Produktionslinie am Band oder in einer Fertigungszelle statt. Da der Großteil der Transformatoren vom Band laufen und dieser Bereich schon teilweise durch Gitter und Türen abgeschottet ist, eignet sich dieser Bereich am besten für automatisierte Prozesse. Natürlich kann auch über eine Realisierung in den Fertigungszellen nachgedacht werden. Dies wird jedoch in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die Transformatorenproduktion am Band erfolgt in Linienform, deshalb wird auch von einer Fertigungslinie gesprochen. Am Anfang der Fertigungslinie wird der Transformatorenkern auf das Band gehoben und der obere Teil entfernt. Danach werden die Spulen auf den Kern gesteckt und der obere Kernteil wieder geschlossen. Mit Hilfe von Stützen wird der Deckel, auf dem sich unter anderem auch der Stufenschalter befindet, über dem Kern positioniert. Im nächsten Schritt werden die Wicklungsanfänge und -enden mit den Durchführungen am Deckel verbunden. An den Oberspannungswicklungen gibt es noch zusätzliche Abgänge sogenannte Anzapfungen. Diese werden mit dem Stufenschalter verbunden, über dem sich das Übersetzungsverhältnis dann leicht verändern lässt. Dies wird benötigt, um den Spannungsabfall auf langen Leitungslängen auszugleichen, weshalb der Stufenschalter bei fast allen Verteiltransformatoren zu finden ist. Mit der Fertigstellung der Anschlussarbeiten ist der Aktivteil komplett und wird über das Band in die letzte Station zur Vormessung befördert.

Da bei diesem Prüfvorgang hohe Spannungen auftreten, muss der Prüfling wie in Abb.1 ersichtlich abgeschottet werden. Über eine Hebebühne können die Anschlüsse des Messgerätes angebracht und der Stufenschalter bedient werden.



Abb. 1: Bestehende Prüfszelle in der Fertigungslinie, Quelle: Eigene Darstellung.

2 TRANSFORMATOR-VORMESSUNG

Dieses Kapitel soll einen Überblick über dem Umfang, die Umsetzung und die Notwendigkeit der Vormessung der Transformatoren-Aktivteile verschaffen. Damit soll der Ablauf der Prüfung verstanden und das Automatisierungspotenzial eruiert werden.

2.1 Messergebnisse in Abhängigkeit der Stufe

Die Vormessstation überprüft den Aktivteil auf Wicklungs-, Schalt- und Materialfehler über eine hochgenaue Widerstand- und Übersetzungsmessung. Außerdem wird die Schaltgruppe des Transformators kontrolliert. Es wird also der Widerstand der Ober- und Unterspannungswicklung sowie deren Übersetzungsverhältnis gemessen. Die Stellung des Stufenschalters, der sich am Deckel des Transformators befindet und über dem sich das Übersetzungsverhältnis zwischen Ober- und Unterspannungsseite stufenweise verändern lässt, beeinflusst natürlich diese Messergebnisse.

Deshalb muss beinahe jede Messung in allen Stufen durchgeführt werden. Da die meisten Transformatoren über fünf Stufen verfügen und pro Stufe jeweils Widerstand und Übersetzung gemessen werden, bedarf es bis zu zehn Schaltvorgängen während einer Prüfung. Nach jeder Messung müssen die Spulen spannungslos geschaltet und entladen werden, um das Personal nicht zu gefährden. Dies führt zu langen Stillstandzeiten.

2.2 Messung des Widerstandes

Bei dieser Messung wird der ohmsche Wicklungswiderstand der Primär- und Sekundärwicklung gemessen. Im Gegensatz zu der Übersetzung oder auch den Verlustleistungen eines Transformators gibt es bei den Wicklungswiderständen keine festgelegten Garantiewerte. Ihre genaue Kenntnis wird jedoch zur Hochrechnung der gemessenen Lastverluste auf die festgelegte Bezugstemperatur und zur Ermittlung der Wicklungserwärmung bei späteren Erwärmungsversuchen benötigt.¹

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind sehr hoch, da die Wicklungswiderstände nur sehr gering sind. Besonders bei der Sekundärwicklung, also der Niederspannungsseite, sind durch den großen Leitungsquerschnitt und die geringe Windungsanzahl nur Widerstandswerte im Milliohm-Bereich zu erwarten. Eine weitere Herausforderung ist die starke Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Kupfer und Aluminium, aus denen die Wicklung besteht. Deshalb ist die Angabe eines Widerstandes nur zusammen mit einer Bezugstemperatur sinnvoll.¹

Zur Messung des Wicklungswiderstandes gibt es mehrere Methoden, von denen jedoch die meisten schon von modernen digitalen Messgeräten ersetzt werden.

2.2.1 Strom-Spannungs-Methode

Bei diesem Verfahren wird der unbekannte Widerstand von einem bekannten Gleichstrom durchflossen. Der dadurch auftretende Spannungsabfall am Widerstand z.B. einer Wicklung, kann nun ebenfalls

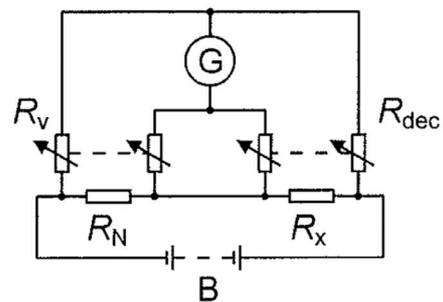
¹ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 12.

gemessen werden. Aus dem ohmschen Gesetz ergibt sich dann der Widerstandswert. Diese Methode ist einfach zu realisieren, aber für eine moderne Transformatoren-Messung zu ungenau.

2.2.2 Kelvin-Thomson-Brücke-Methode

Die Messung in Abb. 2 beruht auf dem Vergleich des Spannungsabfalles eines unbekanntes Widerstandes (R_X) mit dem an einen bekannten, sehr genauen Widerstand (R_N). Sobald ein Strom die beiden Widerstände R_X und R_N durchfließt, fällt an ihnen eine Spannung ab. Nun können die Widerstände R_V und R_{dec} so lange verändert werden bis durch das Galvanometer kein Strom mehr fließt.² Dann ist die Brücke abgeglichen und es gilt:

$$R_X = R_N \times \frac{R_{dek}}{R_V} \quad (2.1)$$



- R_X = unknown resistance
(transformer under test)
- R_N = standard resistor
- R_{dec} = decade resistor
- R_V = variable resistor
- G = galvanometer
- B = DC source

Abb. 2: Kelvin-Thomas-Brücke, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.34.

Die Messgenauigkeit einer modernen Kelvin-Thomson-Brücke ist um einiges höher als bei der Strom-Spannungs-Methode, jedoch gestaltet sich die Automatisierung dieser Messung durch den aufwendigen Versuchsaufbau sehr schwierig.

2.2.3 Digital-Mikro-Ohmmeter

Dieses Messverfahren ist ebenfalls eine Verhältnismessung, jedoch werden hierbei Strom und Spannung im gleichen Moment erfasst und der Widerstand nach dem ohmschen Gesetz direkt errechnet.³

Diese Methode ist hochgenau, besitzt einen einfachen Messaufbau und da der gemessene Wert digital ausgegeben wird, eignet sich diese Methode am besten für eine Automatisierung.

² Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 12.

³ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 13.

2.3 Übersetzung

Das Übersetzungsverhältnis eines Transformators lässt sich durch folgende Formel beschreiben:

$$\ddot{u} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}} = \frac{I_{sN}}{I_{pN}} \quad (2.1)$$

$\ddot{u}/1$	Übersetzungsverhältnis
$N/1$	Windungszahl
U_N/V	Nennspannung
I_N/A	Nennstrom
p	primär
s	sekundär

Die Spannung verhält sich also proportional zur Windungszahl und der Strom umgekehrt proportional. Das Übersetzungsverhältnis ist ein Messwert, der vom Hersteller garantiert werden muss. Die maximale Abweichung kann der Norm entnommen werden oder ist kundenspezifisch.

2.3.1 Kontrolle der Schaltgruppe

Abb. 3 zeigt die verschiedenen Schaltgruppen. Bei Dreiphasentransformatoren können die Primär- und Sekundärseite je nach Bedarf in Stern, Dreieck oder Zickzack geschaltet werden, wobei der Phasenwinkel zwischen den Wicklungen je nach Schaltung zwischen 0° und 360° liegt. Damit Transformatoren parallel betrieben werden können, muss unter anderen die Schaltgruppe übereinstimmen.⁴

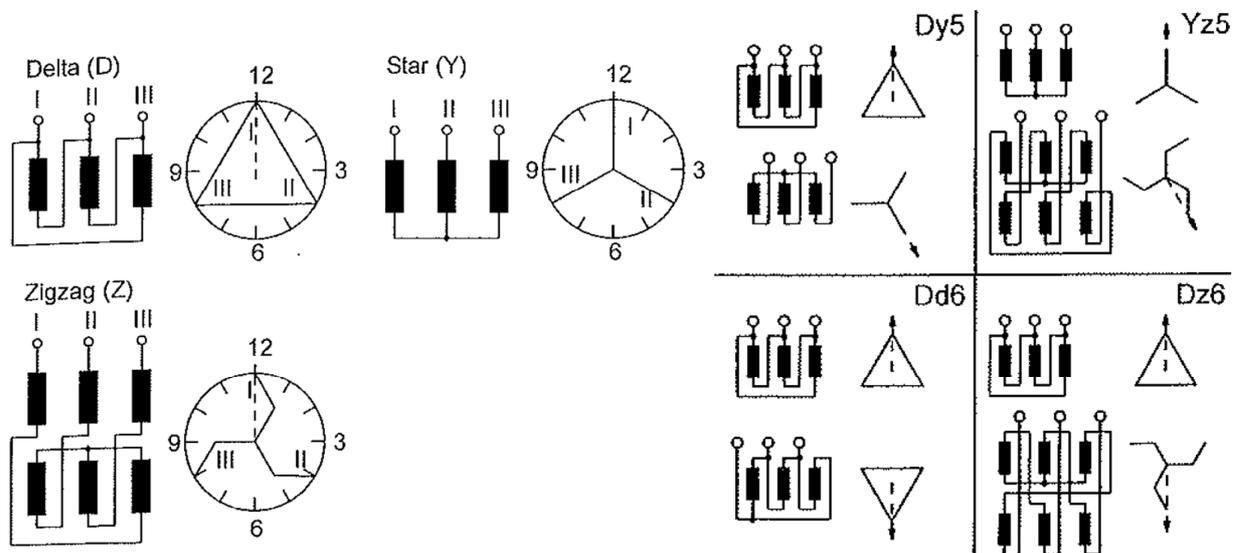


Abb. 3: Verschiedene Schaltgruppen bei Dreiphasentransformatoren, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.43.

Die bei Verteiltransformatoren häufig vorkommende Kennzahl Dyn5 setzt sich also aus einer in Dreieck (D) geschalteten Oberspannungswicklung und einer in Stern (y) geschalteten Unterspannungswicklung zusammen. Der Buchstabe n steht für den herausgeführten Sternpunkt, also den Neutralleiter. Die 5 gibt

⁴ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 15.

den Phasenwinkel zwischen HV zu NV bezogen auf die Außenleiter und als Vielfaches von 30° an. In diesem Fall ergibt dies eine Phasenverschiebung von 150° .

Die Abb. 4 zeigt den Messaufbau für die Polaritätskontrolle bzw. Schaltgruppenbestimmung. Dazu wird eine Phase der Unterspannungsseite mit einer der Oberspannungsseite verbunden. Sobald die Oberspannungsseite versorgt wird, entstehen zwischen den freien Phasen Potentialdifferenzen, aus welchen sich die Schaltgruppe bestimmen lässt.⁵

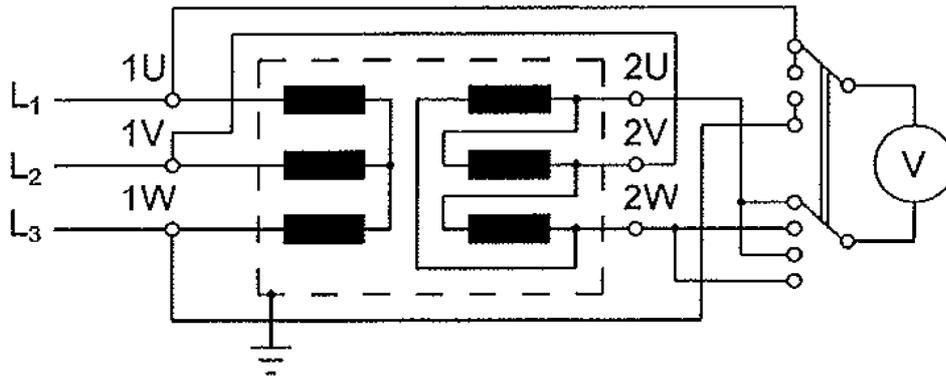


Abb. 4: Schaltgruppen Bestimmung mit einem Voltmeter, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.43.

Bei der Transformatoren-Vormessung ist es notwendig die Schaltgruppe vor der ersten Übersetzungsmessung zu kontrollieren. Ein geeignetes Messgerät sollte dies automatisch durchführen, um den automatisierten Ablauf nicht zu stören.

2.3.2 Messung des Übersetzungsverhältnisses mit Voltmetern

Das Übersetzungsverhältnis kann ermittelt werden, indem sowohl die Primär- wie auch die Sekundärspannung des Prüflings gemessen und daraus das Übersetzungsverhältnis errechnet wird. Diese Messungen müssen ebenfalls sehr genau sein, da nur eine sehr geringe Abweichung vom garantierten Übersetzungsverhältnis zulässig ist. Bei der Vormessung am Aktivteil ohne Öl muss der Fehler kleiner sein als die relative Abweichung einer Windung.⁶ Die Abb. 5 zeigt einen prinzipiellen Aufbau einer Übersetzungsmessung.

⁵ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 16.

⁶ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 15.

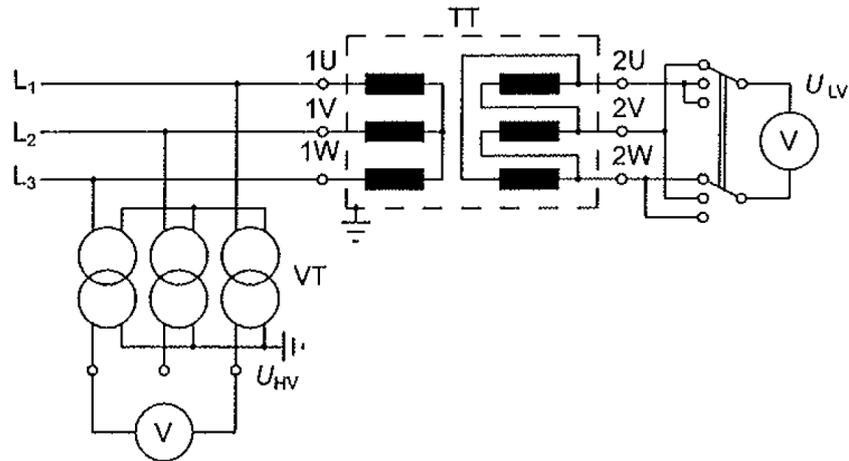


Abb. 5: Übersetzungsmessung mit zwei Voltmetern, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.44.

Durch die Einspeisung auf der Oberspannungsseite werden gefährlich hohe Spannungen vermieden. Falls die Spannung trotzdem zu hoch ist, müssen Spannungswandler dazwischengeschaltet werden. Der hohe Eingangswiderstand des Voltmeters auf der Unterspannungsseite schützt vor hoher Belastung des Transformators.⁷

2.3.3 Übersetzungsmessung mit der Übersetzungsmessbrücke

Bei dieser Methode muss das Übersetzungsverhältnis nicht erst errechnet, sondern kann direkt ausgegeben werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei dieser Messung gleichzeitig die Polarität der Wicklung kontrolliert wird, weshalb auch die Bestimmung der Schaltgruppe aus Abb. 4 entfällt. Der einzige Nachteil dieser Methode ist ihre Sensibilität gegen Fremdfelder.

Die Abb. 6 zeigt den schematischen Aufbau einer modernen digitalen Übersetzungsmessbrücke. Die Brücke versorgt den Prüfling mit Strom und misst ober- und unterspannungsseitig die Spannung. Die integrierte CPU errechnet daraus das Übersetzungsverhältnis und bestimmt die Schaltgruppe. Die Ergebnisse werden dann als digitales Signal ausgegeben und können ausgewertet werden. Die Messgenauigkeit einer solchen Messbrücke ist um ein Vielfaches höher als die davor behandelten Methoden der Übersetzungsmessung.

⁷ Vgl. Kraaij/Schemel/Wegscheider (1983), S. 16.

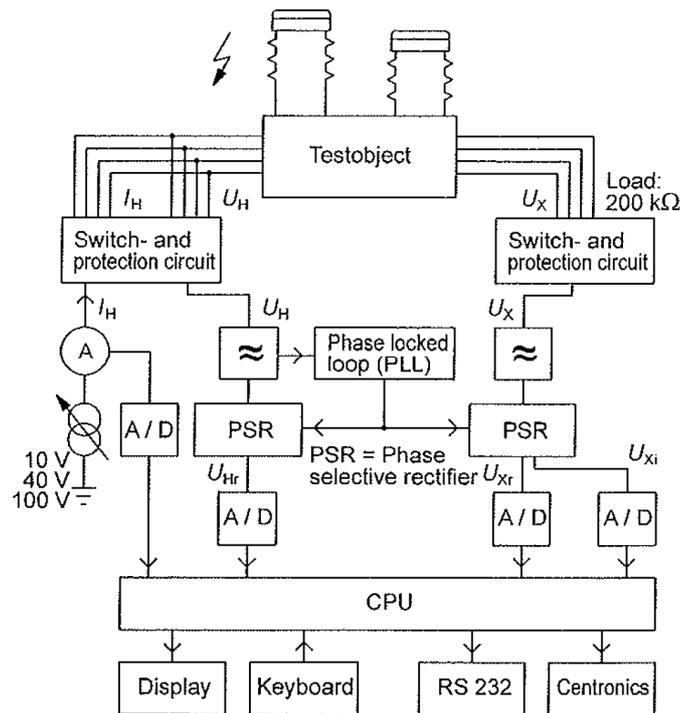


Abb. 6: Digitale Übersetzungsmessbrücke, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.46.

2.4 Fazit

Die Vormessung bei Transformatoren besteht aus drei verschiedenen Einzelmessungen, wovon mindestens zwei verschiedene Messaufbauten bedürfen. Dies bedeutet jedoch die zwingende Anwesenheit von Arbeitskräften während der Prüfung, was die Automatisierung erheblich einschränkt. Um einen hohen Automatisierungsgrad zu erreichen, ist es absolut notwendig, dass die verwendete Messbrücke ohne Veränderung des Versuch-Aufbaus alle diese Messungen durchführen kann. Ebenfalls bedarf es einer Schnittstelle, über die mit der Messbrücke kommuniziert werden kann, um die richtigen Schaltzeitpunkte für den Umschalter zu ermitteln.

2.5 Messbrücke

Der Tettex Winding Analyser 2293 ist ein digitales Messgerät, das diesen Anforderungen gerecht wird. Damit ist es möglich unabhängig von der Schaltgruppe den Wicklungswiderstand, die Polarität und das Übersetzungsverhältnis ohne Änderungen im Versuchsaufbau zu prüfen. Dies wird mit sogenannte Kelvin-Klemmen realisiert, über die alle Prüfungen durchgeführt werden können, ohne umklemmen zu müssen. Diese Klemmen funktionieren nach dem 4-Leiter-Prinzip, was bedeutet, dass Stromversorgung und Messung über separate Leitungen durchgeführt werden. Dies ist nötig damit die Zuleitungswiderstände nicht als Fehler in die Messung eingehen und das Ergebnis verfälschen.

2.5.1 Kommunikation mit Umschaltvorrichtung

Diese Messbrücke kann auch eine Umschaltvorrichtung für den Stufenschalter steuern. Dies geschieht, wie in Abb. 7 veranschaulicht, über zwei potenzialfreie Kontakte. Einen zum Erhöhen der Stufenschalterposition und einen zur Verringerung der Stufe.

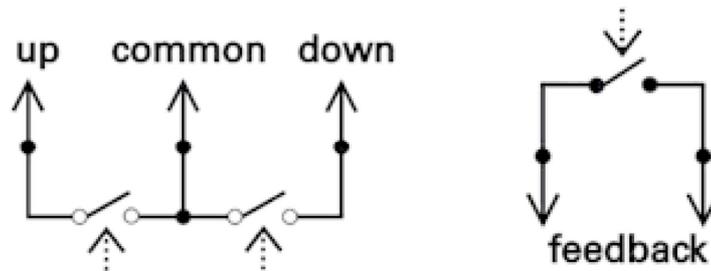


Abb. 7: Steuerung der Umschaltvorrichtung, Quelle: HAEFELY TEST AG (2014), S. 170.

Ebenfalls gibt es die Möglichkeit für ein Feedback der Umschaltvorrichtung, damit die Messbrücke erkennt, wann der Schaltvorgang abgeschlossen ist und die nächste Messung starten kann. Hierbei liefert das 2293 ein 3,3 V Signal und wartet auf das zurückkommende Signal, um zu bestätigen, dass der Vorgang abgeschlossen ist. Für die Realisierung dieser Steuerung müssen also von der Umschaltvorrichtung nur die entsprechenden digitalen Eingänge für die Schalthandlung und ein potentialfreier Schalter für das Feedback-Signal bereitgestellt werden.

2.5.2 Messaufbau

Der Messaufbau der Vormessung mit dem 2293 erfolgt gemäß Abb. 8. Dabei werden die im Bild roten Klemmen an der Oberspannungsseite und die Schwarzen an der Unterspannungsseite angebracht. Die Veränderung dieses Messaufbaus ist während der Prüfung nicht mehr erforderlich.

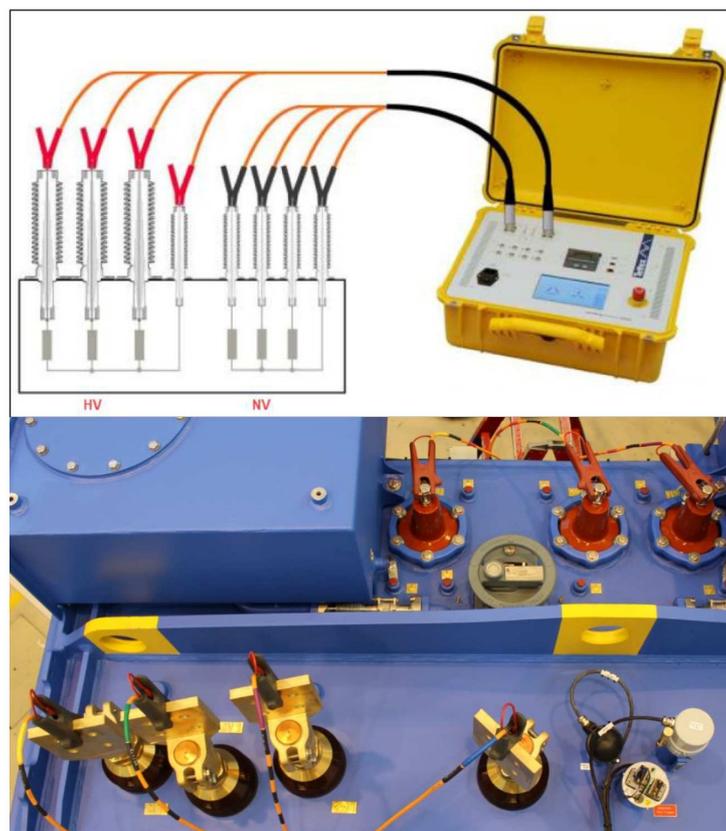


Abb. 8: Versuchsaufbau Vormessung, Quelle: HAEFELY TEST AG (2014), S. 170 (leicht modifiziert).

Die Automatisierung dieser Tätigkeit ist nicht geplant, da dies im Verhältnis zum Zeitaufwand zu umständlich wäre. Ebenfalls dient das Anbringen der Klemmen gleichzeitig als visuelle Qualitätskontrolle der Durchführungen und der anderen Aufbauteile.

2.5.3 Derzeitiger Prüfablauf

Die Tabelle 1 zeigt eine Auflistung der notwendigen Tätigkeiten für eine Aktivteil-Prüfung und ihr Automatisierungspotenzial. Nicht alle Schritte können ohne menschliche Arbeitskraft durchgeführt werden, wogegen manche schon autonom ablaufen. Ziel ist es, dass das Personal nur am Anfang und am Ende eingesetzt wird und während der restlichen Zeit andere Tätigkeiten ausführen kann, denn nur so kann Arbeitszeit und damit Geld eingespart werden. Momentan wird der automatisierte Prüfungsablauf immer wieder von der Stufenumschaltung gestört. Da dies alle paar Minuten durchgeführt werden muss, kann das Personal während der Standzeiten keiner anderen Tätigkeit nachgehen. In dieser Tabelle ist ersichtlich, dass allein eine automatisierte Umschaltvorrichtung und die dafür geeignete Umgebung, die Notwendigkeit einer Arbeitskraft um die Hälfte reduziert. Deshalb wird sich diese Arbeit in erster Linie darauf konzentrieren.

Schritt	Tätigkeit	Automatisierbar	Zeit [min]
1	Einbringung des Prüflings	Nein	0,70
2	Daten Eingabe inkl. Temperaturmessung	Nein	2,21
3	Messkabel an- und abhängen	Nein	1,96
4	Übersetzung messen (in jeder Stufe)	Ja	6,30
5	Widerstand HV messen (in jeder Stufe)	Ja	13,25
6	Widerstand NV messen (1)	Ja	2,60
7	Messprotokoll ausfüllen	u.U.	5,55
8	Aktivteil reinigen	Nein	1,45
9	Aktivteil mit Folie einwickeln	Nein	1,86
10	Trafo und Palette wegheben	Nein	8,07
Gesamtzeitbedarf Vormessung			43,95
Mitarbeiterzeitersparnis durch Automatisierung des Umschaltprozesses			22,15
Nicht automatisierbare Prozesse			16,25

Tab. 1: Prozessschritte der Aktivteil-Vormessung, Quelle: Eigene Darstellung.

In weiterer Folge kann auch über ein automatisches Erkennungssystem für Aktivteile nachgedacht werden, um das Ausfüllen des Messprotokolls ebenfalls überflüssig zu machen. Dies ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

3 STUFENSCHALTER BEI VERTEILTRANSFORMATOREN

Um eine automatisierte Umschaltvorrichtung für Stufenschalter zu entwickeln, müssen diese zuerst selbst behandelt werden, um deren Funktionsweise zu verstehen.

3.1 Arten und Anwendung

Über den Stufenschalter kann das Übersetzungsverhältnis des Transformators verändert werden. Es wird prinzipiell zwischen zwei Arten unterschieden:

- Under-Load Tap-Changer
- No-Load Tap-Changer

Der Unterschied dieser zwei Bauformen ist, dass bei dem Under-Load Tap-Changer der Transformator unter Belastung umgeschaltet werden kann. Solche Transformatoren werden viel seltener gebaut und bedürfen einer separaten Prüfung. Deshalb werden in dieser Arbeit nur No-Load Tap-Changer behandelt, welche ausschließlich im spannungslosen Zustand geschaltet werden dürfen. Diese Stufenschalter sind auf fast allen Verteiltransformatoren zu finden. Sie werden benötigt, wenn die Nennspannung eines Transformators nicht mit der Systemspannung übereinstimmt. Über den Stufenschalter kann dann die Ausgangsspannung erhöht oder gesenkt werden. Dies kommt unter anderem zum Einsatz, um den Spannungsabfall auf langen Leitungslängen auszugleichen. Im weiteren Verlauf der Arbeit ist mit Stufenschalter stets ein No-Load Tap-Changer gemeint.

3.2 Funktionsweise

Durch das Umschalten des Stufenschalters wird ein Teil der Primärwicklung entfernt oder hinzugefügt, wodurch sich das Verhältnis der Windungszahlen von Primär- zu Sekundärwicklung verändert und dadurch auch die Nennspannung. Der Zugang in die Primärwicklung erfolgt über so genannte Anzapfungen, die aus dem inneren der Wicklung nach außen zum Stufenschalter führen.

Die meisten No-Load Tap-Changer haben insgesamt fünf Stufen. Es gibt normalerweise zwei Stufen über der Nennspannung und zwei Stufen unterhalb, sowie eine Stufe für die Nennspannung. Die Spannungsinkremente zwischen den Abgriffen betragen generell 2,5% der Nennspannung, sodass der gesamte Abgriffbereich $\pm 5\%$ beträgt.⁸

Die Abb. 9 zeigt den typischen Aufbau eines Stufenschalters, der bei Drehstromtransformatoren Anwendung findet.

⁸ Vgl. Winders (2002), S. 213.

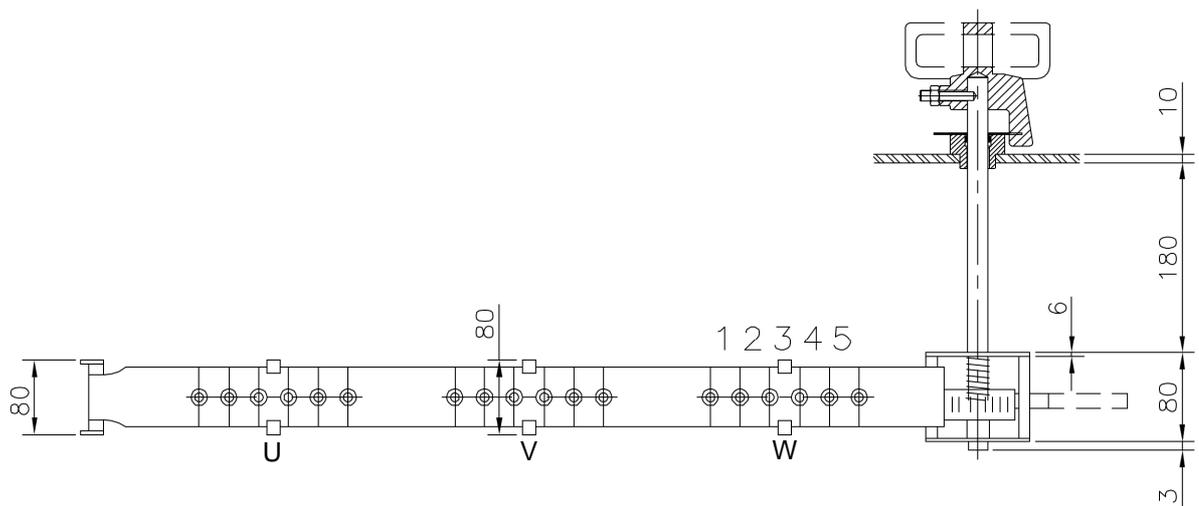


Abb. 9: Einbau Stufenschalter bei Drehstromtransformatoren, Quelle: ELMEK A.S. (2011) (leicht modifiziert).

Der Stufenschalter befindet sich am Deckel des Transformators. Die drehende Schaltbewegung wird in den Kessel zur Schalteinrichtung übertragen. Diese befindet sich über der Spulenbaugruppe und operiert unter Öl. Bei Drehstromtransformatoren sind für jede der drei Phasen eine Schalteinrichtung nötig, diese sind jedoch mechanisch so miteinander verbunden, dass alle drei Phasen immer in derselben Stufe sind.

In der Abb. 10 ist die Funktionsweise eines Stufenschalters ersichtlich. In der ersten Stufe ist die gesamte Wicklung in Betrieb.

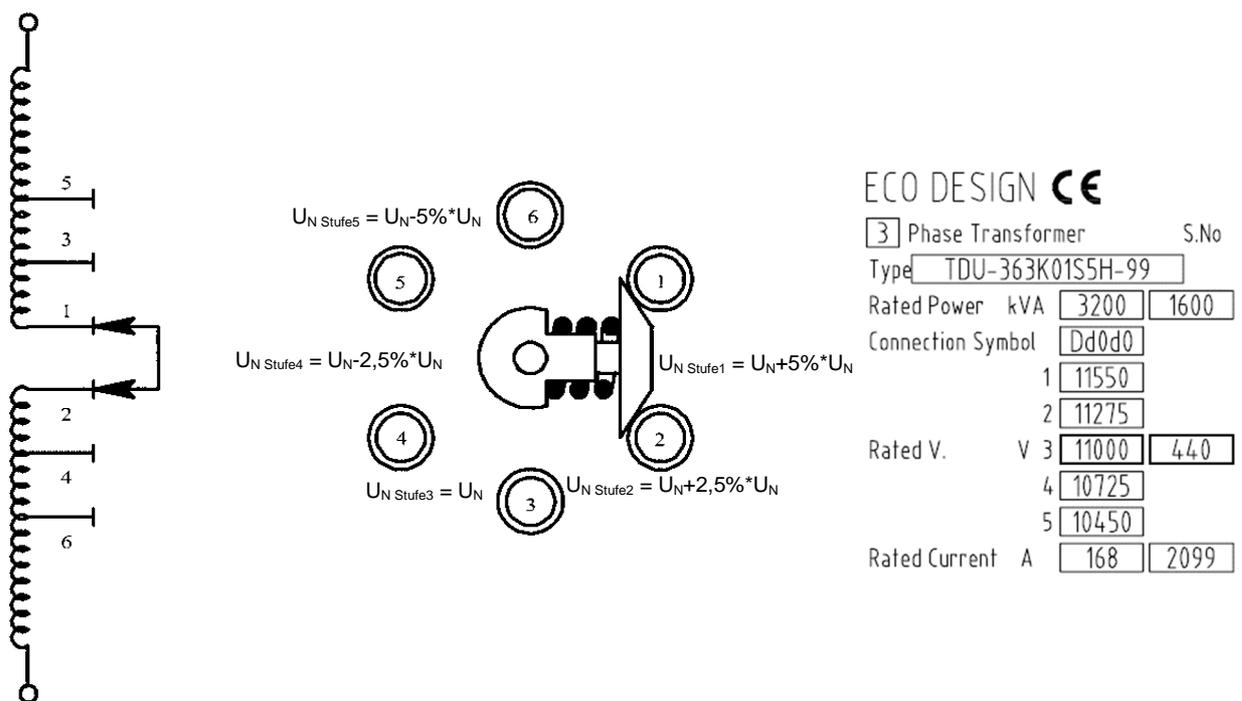


Abb. 10: Schematische Funktionsweise eines No-Load Tap-Changers mit 5 Stufen, Quelle: Winders (2002), S. 214 (leicht modifiziert).

Mit steigender Stufe wird immer mehr von der Primärwicklung überbrückt, wodurch sich das Verhältnis der Windungszahlen zu Gunsten der Sekundärwicklung verändert. Dadurch steigt die Nennspannung sekundärseitig an bzw. ist weniger Primärspannung nötig, um dieselbe Sekundärspannung zu erreichen.

Wenn die Stufe 3 als Nennspannung definiert wird, dann gibt es jeweils zwei Stufen über und unter der Nennspannung.

Nun ist auch klar warum Übersetzung und Widerstand jeweils in allen Stufen gemessen werden müssen, denn nur so kann die Fehlerlosigkeit der gesamten Wicklung gewährleistet werden. Anderenfalls würde ein Fehler in einem weggeschalteten Wicklungsteil, wie z.B. eine falsch positionierte Anzapfung, möglicherweise nicht erkannt werden.

3.3 Bauformen

Es werden viele verschiedene Stufenschalter-Arten an den Transformatoren verbaut. Die Umschaltvorrichtung soll so viele Bauarten wie möglich bedienen können. Um das optimale Design der Aufnahmeeinrichtung festzulegen, wird zwischen drei verschiedenen Typen unterschieden:

- Griff-Typ
- Handrad-Typ
- Andere Bauformen

3.3.1 Stufenschalter mit Griff

Das Design der Stufenschalter in Abb. 11 ist ähnlich. Die Maße unterscheiden sich nur durch wenige Millimeter, weshalb deren Aufnahme über denselben Adapter realisiert werden kann.



Abb. 11: Verschiedene Bauformen des Griff-Typs, Quelle: Eigene Darstellung.

Auch die Bedienung dieser Stufenschalter ist sehr ähnlich. Um in eine andere Stufe zu schalten, wird der Griff zuerst vertikal nach oben gezogen, um den Schalter zu entsperren. Danach führt man eine Drehbewegung aus, bis die Nock der gewünschten Stufe erreicht ist. An dieser Stelle erfolgt die Arretierung dann selbstständig durch die Kraft der verbauten Feder. Dieser Bewegungsablauf ist für das Automatisierungs-Vorhaben später noch sehr wichtig. Jedoch muss beachtet werden, dass der benötigte Kraftbedarf sowie der Vertikal-Hub für das Entsperrern zwischen den Bauformen stark variieren. Des Weiteren gibt es auch große Unterscheidungen im Winkel zwischen den Stufenpositionen. Es fällt außerdem noch auf, dass die zwei grauen Stufenschalter quasi das Negativ des grünen Schalters sind. Dies hat eine Umkehr der Schaltrichtung zur Folge. Während bei den grauen Schaltern gegen den Uhrzeigersinn aufwärts geschaltet wird, ist es bei dem grünen Schalter genau umgekehrt.

Die Griff-Typ-Bauart kommt bei ca. 80 % der Verteiltransformatoren vor, die von Siemens Weiz gefertigt werden.

3.3.2 Stufenschalter mit Handrad

Die Stufenschalter in Abb. 12 funktionieren nach demselben Prinzip wie die Griff-Type aus Kapitel 3.3.1. Da es jedoch große Unterschiede in der Bauform gibt, gestaltet sich die Aufnahme über dieselbe Einrichtung schwierig. Die Umschaltvorrichtung sollte sich aber in weiterer Folge auch auf diese Bauarten adaptieren lassen.



Abb. 12: Verschiedene Bauformen der Handrad-Typ-Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Bauart kommt bei ca. 10 % der Verteiltransformatoren vor, die von Siemens Weiz gefertigt werden.

3.3.3 Andere Bauformen

Es gibt aber auch Stufenschalter mit einer komplett anderen Bauform, wie in Abb. 13 veranschaulicht. Dadurch unterscheidet sich auch der Bewegungsablauf während der Bedienung, sodass deren automatisierte Umschaltung mit derselben Vorrichtung nicht möglich ist.



Abb. 13: Stufenschalter anderer Bauart, Quelle: Eigene Darstellung.

Da diese speziellen Stufenschalter jedoch nur bei ca. 10 % der Verteiltransformatoren von Siemens Weiz verbaut sind, werden diese nicht berücksichtigt.

3.4 Versuch: Kraft- und Momentbedarf für eine Schalthandlung

Wie schon erwähnt, sind die Griff-Typ-Stufenschalter in ihrer Bauform und Bedienung sehr ähnlich. Jedoch wird angenommen, dass der für die Schalthandlung benötigte Kraftaufwand stark variiert. Nicht nur zwischen verschiedenen Modellen, sondern auch bei baugleichen Modellen, besonders wenn diese in unterschiedlichen Transformatoren verbaut sind. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass unter Normalbetrieb die Stufenschalter unter Öl geschaltet werden. Das in Transformatoren verwendete Isolieröl hat gute Schmiereigenschaften, wodurch die Reibung verringert und der Schaltvorgang erleichtert wird. Bei der Vormessung ist jedoch noch kein Öl vorhanden, was die Stufenschalter oft unterschiedlich schwergängig macht. Da dies für die Automatisierung zum Problem werden könnte, werden nun an unterschiedlichen Stufenschaltern Kraft- und Drehmomentmessungen vorgenommen. Diese Messwerte werden später dann für die Auslegung von Antrieben und die Konfiguration der Steuerung verwendet.

3.4.1 Vertikal-Zug-Messung

Bei diesem Versuch wird die Vertikal-Zug-Kraft gemessen, die notwendig ist, um einen Stufenschalter aus dem Nock zu ziehen, um diesen zu entsperren. Erst danach kann dieser nämlich in die gewünschte Stufe gedreht werden.

3.4.1.1 Messgerät

Die Vertikal-Kraft-Messung wird mit einer elektronischen Hängewaage von Kern durchgeführt. Dieses Messgerät besitzt eine Peak-Funktion, die den Spitzenwert einer Wägung anzeigt. Die Messfrequenz liegt bei 5 kHz. Das bedeutet, dass pro Sekunde fünf tausend Messungen durchgeführt werden und die höchste davon angezeigt wird. Dies wird bei der Messung benötigt, da das Untersuchungsinteresse bei dem höchsten Lastwert während eines Zugversuches liegt.

3.4.1.2 Versuchsaufbau

Bei dem Versuch in Abb. 14 wird der Stufenschalter hochgezogen bis die Drehsperre aufgehoben ist. Die Hebewaage misst die dabei notwendige Maximalkraft. Diese Messung wird in jeder Stufe separat durchgeführt, um auch diese Schwankungsbreite zu untersuchen.



Abb. 14: Versuchsaufbau Vertikal-Kraft-Messung, Quelle: Eigene Darstellung.

3.4.2 Drehmoment-Messung

Bei dieser Messung wird das erforderliche Moment eruiert, um den Stufenschalter nach dem Anheben in die richtige Position zu drehen.

3.4.2.1 Messgerät

Als Messgerät fungiert ein digitaler Drehmomentschlüssel von Stahlwille, der ebenfalls mit einer Peak-Hold-Funktion ausgestattet ist. Wieder liegt das Untersuchungsinteresse im maximal erforderlichen Moment, um eine Stufenschaltung durchzuführen.

3.4.2.2 Versuchsaufbau

Bei der Momentmessung (in Abb. 15) gestaltet sich der Versuchsaufbau schwieriger. Mit Hilfe eines geeigneten Adapters, wird der Moment, der für eine Schalthandlung notwendig ist, eruiert. Für die Momentmessung wird der Stufenschalter zuerst angehoben und leicht gedreht, dass er nicht mehr arretieren kann. Danach wird der Adapter mit dem Moment-Messgerät aufgesteckt und damit in die nächste Stufe gedreht. Sobald diese erreicht ist, rastet der Stufenschalter wieder selbstständig ein und das maximal benötigte Moment kann abgelesen werden. Auch diese Messung wird separat in jeder Stufe durchgeführt:

- Messung Stufe 1: Drehung von der ersten in die zweite Stufe
- Messung Stufe 2: Drehung von der zweiten in die dritte Stufe
- Messung Stufe 3: Drehung von der dritten in die vierte Stufe
- Messung Stufe 4: Drehung von der vierten in die fünfte Stufe
- Messung Stufe 5: Drehung von der fünften zurück die erste Stufe



Abb. 15: Versuchsaufbau Drehmomentmessung, Quelle: Eigene Darstellung.

3.4.3 Ergebnisse

Insgesamt wird der Stufenschalter bei 20 Transformatoren auf Vertikalkraft- und Drehmomentbedarf während des Schaltvorganges untersucht. In dieser Transformatoren-Testgruppe gibt es fünf unterschiedliche Bauarten und drei verschiedene Stufenschalter. Die Tab. 2 zeigt die gesamten Messungen, jener Transformatoren von denen nur jeweils ein Stück gemessen wurde, auf der linken Seite und die Gesamtwerte jenen Transformatoren von denen mehrere baugleiche Fabrikate gemessen werden, auf der rechten Seite. Rechts unten befinden sich die wichtigsten Gesamtwerte aller Prüflinge, die später für die Auslegung von Antrieb und Steuerung verwendet werden. Alle getesteten Schalter sind entweder grauer oder grüner Bauform und wurden entsprechend farblich markiert.

Der aussagekräftigste Wert ist vor allem der Maximalwert. Diese Kraft bzw. dieses Drehmoment muss die Umschaltvorrichtung mindestens aufbringen können. Alle Bauteile müssen danach dimensioniert und die Steuerung konfiguriert werden. Weiters kann festgestellt werden, dass der an den 8,2-MVA-Transformatoren verbaute grüne Schaltertyp einen viel größeren Kraft- und Momentbedarf aufweist, als die an den restlichen getesteten Transformatoren verbauten grauen Schaltertypen.

Messung: 3,8 MVA / 220001267			Gesamtwerte: 8,2 MVA / 2200007379		
Schalterstellung	Vertikalkraft	Drehmoment		Vertikalkraft	Drehmoment
Stufe 1	83 N	5,20 Nm	Maximaler Wert	210 N	8,10 Nm
Stufe 2	95 N	4,80 Nm	Minimaler Wert	117 N	5,90 Nm
Stufe 3	87 N	3,90 Nm	Schwankungsbereich intern	27 N	1,50 Nm
Stufe 4	92 N	3,50 Nm	Schwankungsbereich extern	93 N	2,20 Nm
Stufe 5	88 N	4,0 Nm			
Min	83 N	4,28 Nm	Gesamtwerte: 3,5 MVA / 2200011924		
Max	95 N	5,20 Nm		Vertikalkraft	Drehmoment
Schwankungsbreite	12 N	0,92 Nm	Maximaler Wert	133 N	5,10 Nm
			Minimaler Wert	59 N	3,56 Nm
			Schwankungsbereich intern	33 N	1,14 Nm
			Schwankungsbreite extern	74 N	1,54 Nm
Messung: 5 MVA / 2200015009			Gesamtwerte: 5 MVA / 2200014948		
Schalterstellung	Vertikalkraft	Drehmoment		Vertikalkraft	Drehmoment
Stufe 1	108 N	2,0 Nm	Maximaler Wert	96 N	3,40 Nm
Stufe 2	113 N	2,10 Nm	Minimaler Wert	71 N	2,80 Nm
Stufe 3	112 N	2,40 Nm	Schwankungsbereich intern	18 N	0,30 Nm
Stufe 4	103 N	2,60 Nm	Schwankungsbreite extern	25 N	0,60 Nm
Stufe 5	112 N	2,40 Nm			
Min	103 N	2,3 Nm	Gesamtwerte nach Stufenschalter-Typ		
Max	113 N	2,60 Nm		Vertikalkraft	Drehmoment
Schwankungsbreite	10 N	0,3 Nm	Max. Wert grüner Typ	210 N	8,10 Nm
			Max. Wert grauer Typ	133 N	5,20 Nm
Messung: 5,35 MVA / 2200015476			Gesamtwerte aller Prüflinge:		
Schalterstellung	Vertikalkraft	Drehmoment		Vertikalkraft	Drehmoment
Stufe 1	72 N	3,30 Nm	Maximaler Wert	210 N	8,10 Nm
Stufe 2	80 N	2,70 Nm	Minimaler Wert	59 N	2,00 Nm
Stufe 3	84 N	2,40 Nm	Schwankungsbreite intern	33 N	1,58 Nm
Stufe 4	86 N	2,90 Nm	Schwankungsbreite extern	151 N	6,10 Nm
Stufe 5	88 N	4,80 Nm			
Min	72 N	3,22 Nm			
Max	88 N	4,80 Nm			
Schwankungsbreite	16 N	1,58 Nm			

Tab. 2: Messergebnisse Kraft und Drehmoment, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Ergebnisse haben jedoch noch eine weitere wichtige Erkenntnis gebracht. Die Annahme, der ungleichmäßige Schwergängigkeit zwischen den verschiedenen Stufenschalter-Typen, hat sich bestätigt. Dies ist sehr gut in der Schwankungsbreite ersichtlich, die aus den Messergebnissen berechnet wird. Die interne Schwankungsbreite umfasst dabei die Messabweichungen zwischen den einzelnen Stufen eines Schalters. Die externe Schwankungsbreite hingegen zeigt die Abweichungen der Messwerte zwischen den verschiedenen Stufenschaltern. Während sich intern die Schwankungsbreite noch in Grenzen hält, steigt sie im externen Bereich stark an. Dies entspricht den Erwartungen, da sich unterschiedliche Stufenschalter nicht gleich verhalten können. Überraschend ist jedoch, dass für die Drehbewegung, zumindest beim grauen Schaltertyp, nur ein geringes Moment erforderlich ist. Auch wenn die Schwankungsbreite verhältnismäßig nicht viel geringer als bei der Vertikalbewegung ist, kann hierbei nicht von Schwergängigkeit gesprochen werden. Ganz anders bei der benötigten Vertikalkraft, deren Maximalwert bei 210 N liegt. Diese liegt sogar noch über dem erwarteten Wert. Jedoch muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass dieser Wert nicht die Norm widerspiegelt, sondern nur eine Stufenschalter-Bauform, bei der

solche Werte möglich sind. Der Durchschnitt ist mit 113 N viel geringer, jedoch müssen für eine ausfallsichere Bauteilauslegung keine Durchschnittswerte, sondern Maximalwerte berücksichtigt werden.

In den weiteren Kapiteln werden die Erkenntnisse aus diesen Versuchen immer wieder einfließen. Die Messwerte sind Teil der Antriebs-Spezifikation und für die Auswahl der Sensorik und Steuerungstechnik wichtig. Ebenfalls werden sie bei der Programmierung des Prototyps als Ausgangswerte dienen.

3.5 Einbauposition

Ein weiterer wichtiger Teil der Vorrichtungskonzeptionierung ist der vorhandene Platz. Die Stufenschalter sind an den verschiedensten Positionen am Deckel verbaut. Da nicht jeder Einbauort separat behandelt werden kann, wird hierbei nur die platzkritischste Stufenschalter-Einbauposition behandelt.

In Abb. 16 sind die Platzbeschränkungen und deren Wirkungsbereich ersichtlich und können damit auf die Vorrichtungsbauform Einfluss nehmen. Dadurch ist klar, dass das Aufnahmesystem des Stufenschalters im rot bemaßten Bereich einen bestimmten Durchmesser nicht überschreiten darf.



Abb. 16: Einbauposition eines Stufenschalters, Quelle: Eigene Darstellung.

4 ANTRIEBSTECHNIK

Die benötigte Antriebstechnik leitet sich von der Funktionsweise der Stufenschalter ab. Dies wird schon ausführlich im Kapitel 3.2 behandelt. Für den Umschaltvorgang sind also folgende Bewegungen notwendig:

- Vertikal-Hub
- Drehbewegung

Dieses Kapitel behandelt die Realisierung eines für diese Anforderungen geeigneten Antriebssystems.

4.1 Drehbewegung

Da wie aus Kapitel 2.5.3 hervorgeht, zuerst Übersetzung und danach Widerstand in jeweils allen Stufen gemessen werden, ist eine Drehbewegung in beide Richtungen erforderlich. Der Antrieb muss unter Last anlaufen und mit einer geringen Drehzahl betrieben werden können. Da der Stufenschalter nur an einer bestimmten Stelle arretiert, sind die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sehr groß. Ein weiterer Punkt ist der begrenzt zur Verfügung stehende Platz für diesen Antrieb.

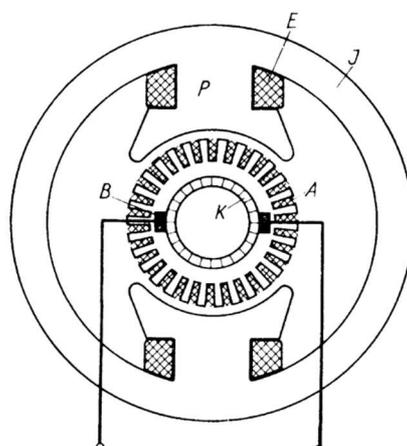
Um diese Anforderungen zu erfüllen, fällt die Entscheidung auf einen elektrischen Antrieb. Da es aber auch hier ein breites Spektrum verschiedener Bauarten gibt, gilt es nun die optimale für diese Anwendung zu eruiieren. Dafür werden folgende Punkte bewertet:

- Drehrichtungsänderung
- Drehzahlsteuerung
- Positioniergenauigkeit

Der Lastanlauf und das benötigte Moment sind kein Kriterium, da es von allen hier behandelten elektrischen Maschinen erreicht wird. Auch die Baugrößen dieser Motortypen sind nicht so unterschiedlich, dass es für die Entscheidung relevant wäre.

4.1.1 Gleichstrommaschine

Dieser elektrische Antrieb funktioniert mit Gleichspannung. Diese kann einfach über ein Schaltnetzteil erzeugt werden und eignet sich deshalb gut für die Umgebung. Die Abb. 17 zeigt den grundlegenden Aufbau einer Gleichstrommaschine.



- A Ankerwicklung
- B Bürsten
- J Joch
- E Erregerwicklung
- K Kommutator
- P Pol (Hauptpol)

Abb. 17: Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 285.

Der Ständer trägt ausgeprägte Pole, auf denen die Erregerwicklung sitzt. Die Erregerwicklung erzeugt ein Magnetfeld, sorgt also für den magnetischen Fluss. Die Stromzufuhr zu den rotierenden Läuferspulen erfolgt über Bürsten, die auf dem Kommutator schleifen. Durch die Lorenzkraft wird der Rotor bewegt und durch die anschließende Umpolung der Spannung in eine Drehbewegung versetzt.⁹

Die Abb. 18 zeigt die verschiedenen Arten von Gleichstrommaschinen. Diese unterscheiden sich in der Art ihrer Erregung, also wie das Magnetfeld erzeugt wird. Für die spezifische Anwendung werden vor allem permanenterrechte Motoren betrachtet, da diese meist bei den benötigten Kleinmotoren Anwendung finden.

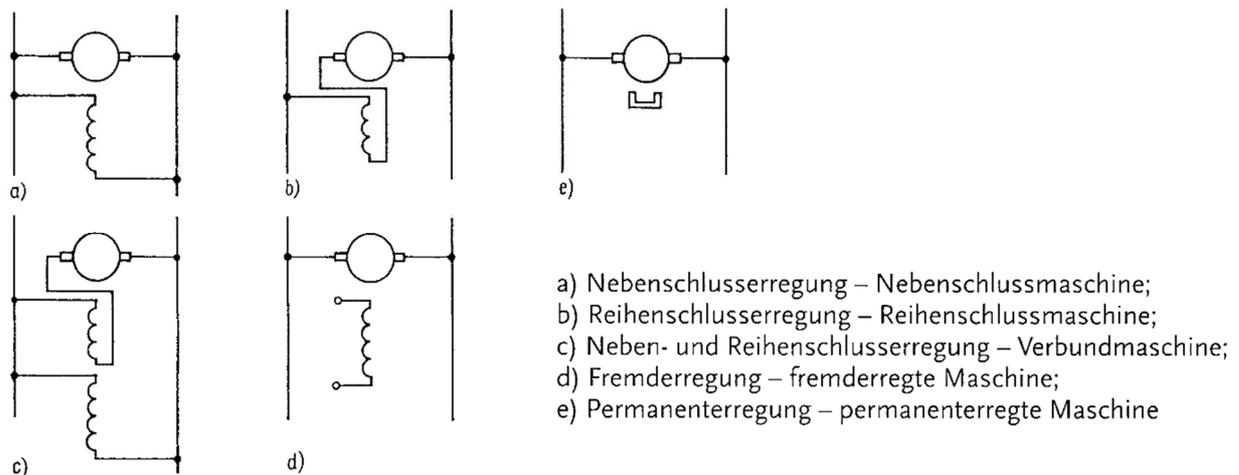


Abb. 18: Erregungsarten der Gleichstrommaschine, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 291.

4.1.1.1 Drehrichtungsänderung

Allgemein kann das Drehmoment bei Gleichstrommotoren durch Umkehrung des Ankerstroms oder durch Umkehrung des Feldstroms in seiner Richtung geändert werden.¹⁰ Da bei den für diese Anwendung benötigten Kleinmotoren jedoch meistens das Magnetfeld durch einen Permanentmagneten erzeugt wird, bewirkt ein Vertauschen der Zuleitungen eine Drehrichtungsänderung. Dies ist möglich da nur der Ankerstrom über die Zuleitungen versorgt wird und dadurch seine Richtung ändert, die Richtung des Magnetfeldes aber gleichbleibt.

Eine sehr einfache und für die Anwendung völlig ausreichende Methode ist die Ankerumschaltung mit einem Schütz. Die Schaltung dazu ist in Abb. 19. Dazu wird nur ein Einwegstromrichter benötigt und da ausschließlich im stromlosen Zustand geschaltet wird, können normale Luftschütze verwendet werden. Der Nachteil dieser Schaltung ist der Verschleiß durch Verwendung von mechanisch bewegten Teilen und das durch die Umschaltung verursachte „Drehmomentloch“.¹¹

⁹ Vgl. Müller/Ponick (2005), S. 284.

¹⁰ Vgl. Schröder (2013), S. 250.

¹¹ Vgl. Schröder (2013), S. 251.

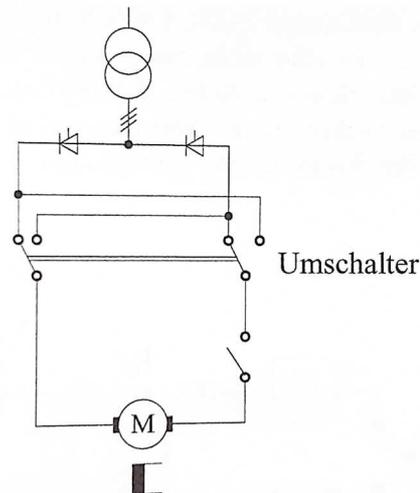


Abb. 19: Ankerstromumkehr mit Schütz, Quelle: Schröder (2013), S. 251.

Da jedoch weder eine häufige Momentumkehr noch eine Drehrichtungsänderung unter Last benötigt werden, erfüllt der permanenterregte Gleichstrommotor zumindest dieses Kriterium.

4.1.1.2 Drehzahlsteuerung

Für die Drehzahländerung einer Gleichstrommaschine gibt es allgemein drei Verfahren:

- Drehzahlstellen durch Feldänderung
- Drehzahlstellen durch Vorwiderstand
- Drehzahlstellen durch Spannungsänderung

Da bei einem permanenterregten Gleichstrommotor das Erregerfeld von einem Permanentmagneten erzeugt wird und dadurch nicht veränderbar ist, ist das erste Verfahren ungeeignet.

Aber auch das Drehzahlstellen durch einen Vorwiderstand gestaltet sich schwierig. Denn ein Vorwiderstand im Ankerkreis verändert, wie in Abb. 20 ersichtlich, nur die Steigung der Drehzahl/Drehmoment-Geraden und hat keinen Einfluss auf die Leerlaufdrehzahl.¹²

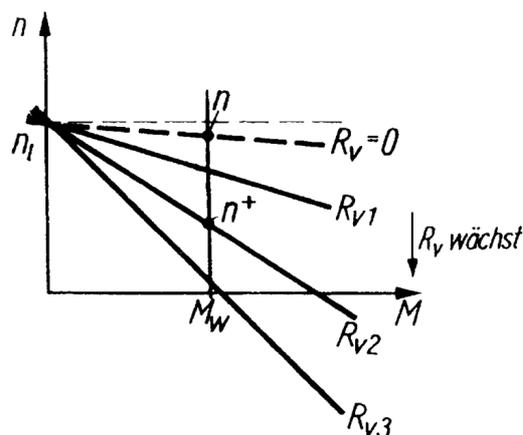


Abb. 20: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie Drehzahlstellen durch Vorwiderstand, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 325.

¹² Vgl. Fischer (2004), S. 75.

Dies führt bei kleinen Drehzahlen und gleichzeitiger geringer Belastung zu großen Stromwärmeverlusten im Vorwiderstand. Da dies genau die Anforderungen an den Antrieb sind, ist auch dieses Verfahren ungeeignet.

Dafür lässt sich über die Ankerspannung recht einfach die Drehzahl verändern. Wie in Abb. 21 ersichtlich, wird hierbei die Leerlaufdrehzahl variiert und somit die Drehzahl/Drehmoment-Gerade parallel verschoben.

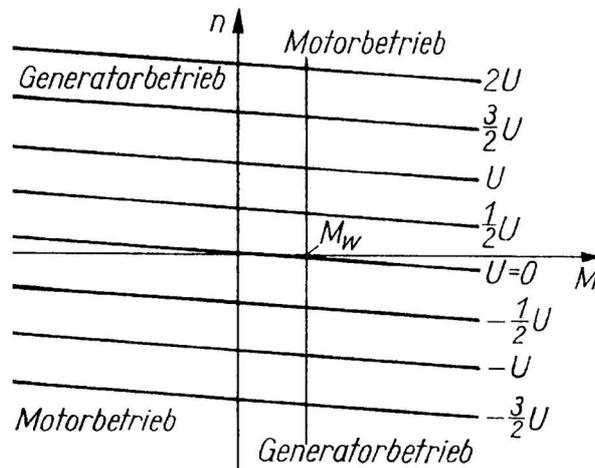


Abb. 21: Drehzahlstellen durch Spannungsänderung - Kennlinie, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 333.

Wird wie im spezifischen Fall, mit einem Permanentmagneten ein konstantes Erregerfeld erzeugt, ist die Leerlaufdrehzahl proportional zur Ankerspannung. Eine exakte Drehzahlsteuerung bedarf nun nur mehr die Realisierung einer Spannungsstellung. Dies kann mit einem gesteuerten Gleichrichter, dessen Ausgangsspannung zwischen null und einen Maximalwert einstellbar ist erfolgen.¹³

4.1.1.3 Positioniergenauigkeit

Die Genauigkeit, mit der ein Antrieb eine Bewegung ausführen kann, ist ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl. Die Abb. 22 zeigt die hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit.

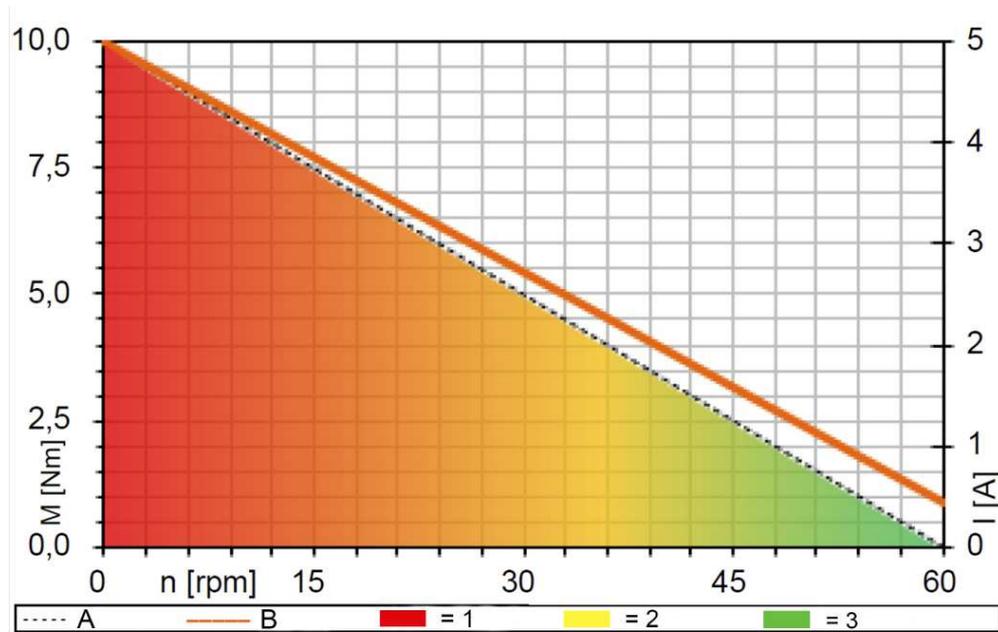


Abb. 22: Schaltwinkel Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.

¹³ Vgl. Müller/Ponick (2005), S. 333.

Der Stufenschalter kann nur an bestimmten Stellen, an denen sich die entsprechende Stufe befindet, einrasten. Um von einer Stufe in die nächste zu schalten, muss der Schalter genau um den Winkel α gedreht werden. Geringe Abweichungen können das Arretieren schon verhindern.

Bei Gleichstrommotoren ist jedoch die Drehzahl stark vom Moment abhängig. Wie in Abb. 23 ersichtlich, sinkt die Drehzahl bei steigender Belastung.



A Drehmoment B Motorstrom 1 Überlastbetrieb 2 Aussetzbetrieb 3 Nennbetrieb (S2)

Abb. 23: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie DC-Motor, Quelle: Igus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].

Um also die erforderliche Einschaltdauer und Spannung für die Drehbewegung zu berechnen, muss das Lastmoment exakt bekannt sein. Da jedoch das Kapitel 3.4.3 zeigt, dass es bei dem benötigten Moment für eine Umschaltung eine große Schwankungsbreite gibt, ist die Gleichstrommaschine für diese Positionieraufgabe ungeeignet. Natürlich kann bei dieser Problematik der Einsatz von Messtechnik, wie z.B. ein Inkrementalgeber, Abhilfe schaffen. Dieser wird jedoch in Kapitel 4.1.4 separat behandelt.

4.1.2 Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC)

Im Gegensatz zur Gleichstrommaschine, wo die Kommutierung mechanisch über Kohlenbürsten erfolgt, steht bei dem BLDC-Motor die Ankerwicklung still und die permanentmagnetische Erregung rotiert. Die Kommutierung erfolgt über Halbleiterschalter.¹⁴

In Abb. 24 ist zu erkennen, dass die Funktionsweise eines BLDC-Motors nicht auf dem einer Gleichstrommaschine basiert, sondern das Funktionsprinzip einer Drehstrommaschine aufweist. Wie bei einer Drehstrommaschine erfolgt die Anspeisung über drei Phasen.

¹⁴ Vgl. Bolte (2011), S. 390.

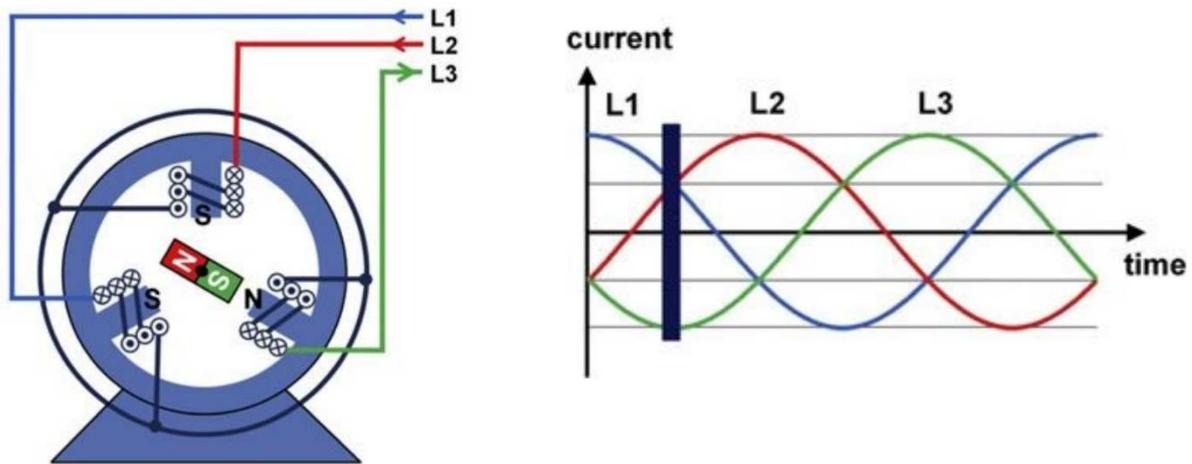


Abb. 24: Funktionsweise BLDC-Motor, Quelle: Büchi (2012), S. 16.

Diese werden jedoch nicht von einem Drehstromnetz versorgt, sondern von einer Treibereinheit. Die enthält ein leistungselektronisches Stellglied und speist die Wicklungen nach einem bestimmten Muster, um ein Moment zu generieren. Dafür ist es notwendig, dass die Steuerung jederzeit die Position des Läufers kennt. Dies wird beim BLDC-Motor mit Hall-Sensoren realisiert, wodurch es sich hierbei um ein Closed-Loop-Regelsystem handelt.

4.1.2.1 Drehzahlregelung

Durch diese Rückkoppelung zur Treibereinheit kann die Drehzahl konstant auf einen vorgegebenen Wert gehalten werden und ist nicht von der Belastung abhängig. Deshalb wird hierbei auch von einer Regelung gesprochen, da der Treiber ständig Feedback über die aktuelle Drehzahl bekommt. Die Drehzahl selbst wird von der Steuerung vorgegeben und bei Abweichung vom Soll-Wert sofort wieder geregelt.

Wie in Abb. 25 ersichtlich ist das Moment über einen sehr breiten Drehzahlbereich konstant und fällt erst bei hohen Drehzahlen rapide ab. Da der BLDC-Motor aber auch bei sehr niedrigen Drehzahlen ein konstant hohes Moment erreicht, ist er in dieser Kategorie für die Anwendung ideal.

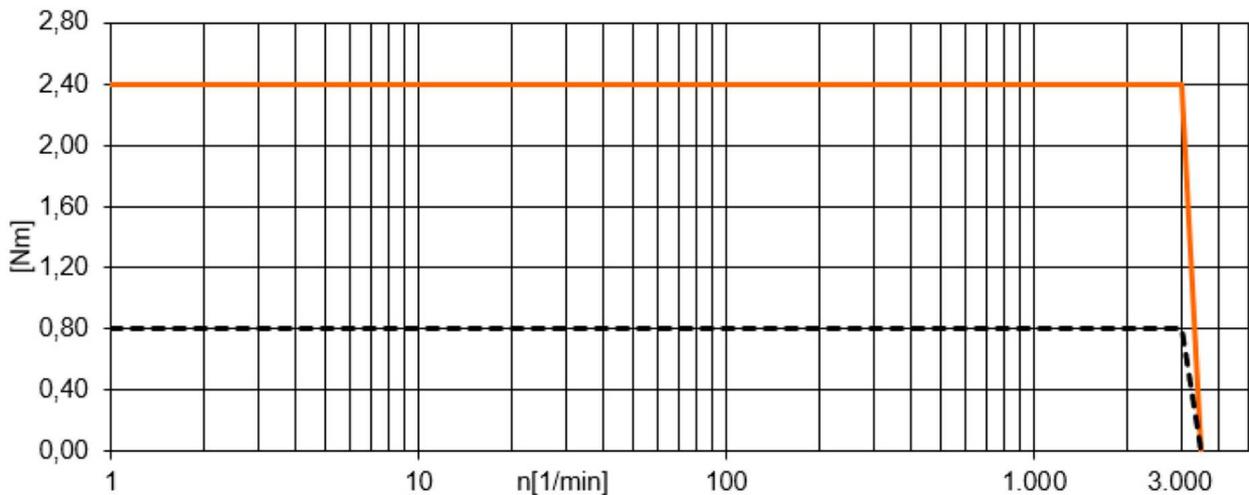


Abb. 25: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie BLDC, Quelle: Igus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].

4.1.2.2 Drehrichtungsänderung

Eine Drehrichtungsänderung kann ebenfalls über die Treibereinheit durch Umkehr der Bestromungsreihenfolge der Wicklungen realisiert werden. Bei bestimmten Bauformen ist auch ein Bremsmoment möglich.

4.1.2.3 Positioniergenauigkeit

Durch den konstanten Drehzahlverlauf und die ständige Positionserfassung mit Hilfe der Hall-Sensoren können auch Positionieraufgaben von BLDC-Motor übernommen werden. Da mit Hall-Sensoren die Positionserfassung jedoch nicht so genau wie z.B. mit einem Encoder durchgeführt und auch keine definierte Winkelposition angefahren werden kann, ist der BLDC-Motor für diese Kategorie weniger geeignet. Der Fokus dieses Motortypen liegt auf der Drehzahlregelung.

4.1.3 Schrittmotor

Schrittmotoren haben als charakteristische Eigenschaft das schrittweise Drehen des Rotors und damit der Motorwelle um den Schrittwinkel α . Dies wird durch ein sprungförmig weitergeschaltetes Statormagnetfeld erreicht.¹⁵ Erst bei steigender Schrittrate geht, durch die Trägheitsmomente von Rotor und Last, das ruckartige Fortbewegen der Welle in eine mehr und mehr kontinuierliche Drehbewegung über.¹⁶ Die Schrittauflösung ist dabei von der Motorkonstruktion und deren Ansteuerung abhängig. Die vielfältigen Bauformen von Schrittmotoren lassen sich im Allgemeinen auf drei Grundtypen zurückführen:

- Reluktanz-Schrittmotor (VR)
- Permanent-Schrittmotor (PM)
- Hybrid-Schrittmotor (HY)

Der Reluktanz-Schrittmotor war der erste eingesetzte Motor dieser Art. Dieser zeichnet sich durch eine kleine Schrittauflösung aus, kann aber nur ein geringes Drehmoment erreichen und hat kein Haltemoment. Dies macht ihn für diese Anwendung ungeeignet. Der Permanent-Schrittmotor hingegen kann größere Momente erreichen und verfügt über ein Selbsthaltemoment. Nachteilig ist hierbei allerdings der größere Schrittwinkel, wodurch Abstriche in der Positioniergenauigkeit hinzunehmen sind. Der Hybrid-Schrittmotor ist eine Kombination der VR- und PM-Schrittmotoren Typen und vereint deren Vorteile. Deshalb wird für die weitere Betrachtung ausschließlich diese Bauform verwendet.¹⁷

4.1.3.1 Positioniergenauigkeit

Beim Hybrid-Schrittmotor nimmt der Rotor aufgrund des Dauermagneten eine Vorzugshaltung ein und es bildet sich auch im unbestromten Zustand ein Rastmoment. Wird nun in Abb. 26a die Wicklung W1 bestromt, erzeugen gegenüberliegende Spulenpaare dieselbe magnetische Polarität. Der Rotor richtet sich mit seinem dauermagnetischen Feld darauf aus, wodurch der Motor nun ein Haltemoment besitzt. In Abb. 26b wird nun der Phasenstrom auf die Wicklung W2 kommutiert, wodurch Nord- und Südpol jeweils um

¹⁵ Vgl. Schröder (2013), S. 499.

¹⁶ Vgl. Schörlin (1996), S. 15.

¹⁷ Vgl. Schröder (2013), S. 505.

einen Schritt weiterwandern und den Rotor mitnehmen. Der Schrittwinkel in dieser Abbildung beträgt 45° , was eine Schrittzahl pro Umdrehung von 8 ergibt. Dies ist für die meisten Anwendungsfälle natürlich nicht ausreichend. Deshalb wird einfach die Polpaarzahl erhöht, was eine Verkleinerung des Schrittwinkels hervorruft.¹⁸

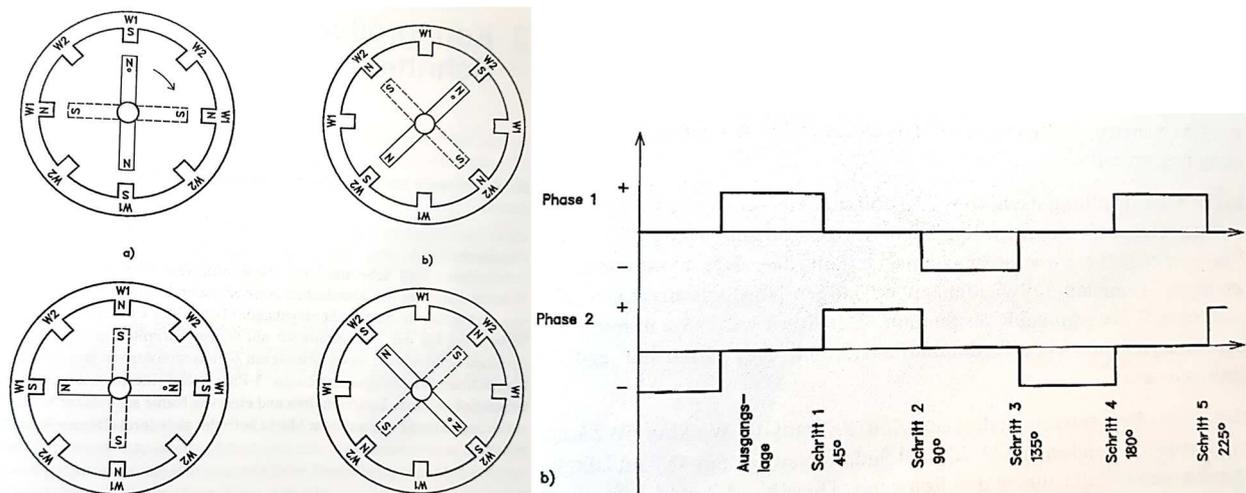


Abb. 26: Funktion Hybrid-Schrittmotor, Quelle: Schörlin (1996), S.25.

Durch die Abzählung dieser Schritte und die Kenntnis der momentanen Position kann nun eine definierte und reproduzierbare Rotorstellung angefahren werden.¹⁹ Die Genauigkeit dieser Drehbewegung ist also von der Schrittauflösung abhängig. Da moderne Hybridschrittmotoren auf eine Auflösung von 400 Schritten pro Umdrehung kommen und diese mit Hilfe von elektronische Zusatzmaßnahmen auch noch vervielfältigt werden kann, ist die Positioniergenauigkeit dieses Motortyps unerreicht. Nur bei Überbelastung kann es zu einem sogenannten Schrittverlust kommen. Dies bedeutet, dass der Motor vom Treiber eine bestimmte Schrittzahl vorgegeben bekommt, diese aber aufgrund des hohen anliegenden Lastmoments nicht verfahren kann. Dadurch weiß die Steuerung nicht mehr in welchem Winkel die Welle steht bzw. hat eine falsche Information. Mit Hilfe eines Inkrementalgebers und einem dadurch realisierten Motor-Feedback-System kann dem entgegengewirkt werden.

4.1.3.2 Drehzahlsteuerung

Für den Betrieb eines Schrittmotors wird generell eine geeignete Treiberendstufe und eine Steuerung mit schnellen Frequenzausgängen benötigt. Über diese kann dann auch die Drehzahlstellung erfolgen. Die Drehzahl ist abhängig von der Geschwindigkeit der Schrittabfolge. Diese wird wiederum von der Steuerung als Puls-Frequenz vorgegeben. Jeder Impuls in Abb. 27 ist genau ein Schritt. Der Treiber bestromt die Spulen (A/B) des Schrittmotors genau nach diesem Takt. Dadurch ist der Schrittmotor in der Lage, eine Last mit einer vorgegebenen Drehzahl zwischen 0 und der physikalisch maximal erreichbaren Drehzahl des Systems anzutreiben.²⁰ Um bei geringen Drehzahlen einen ruckartigen Bewegungsablauf zu

¹⁸ Vgl. Schörlin (1996), S. 24.

¹⁹ Vgl. Schörlin (1996), S. 15.

²⁰ Vgl. Schörlin (1996), S. 15.

vermeiden ist ein Mikroschrittbetrieb notwendig. Dieser kann an einer dafür geeigneten Treibereinheit eingestellt werden. Im Kapitel 7.5 wird die ideale Schrittauflösung für diese Anwendung eruiert.

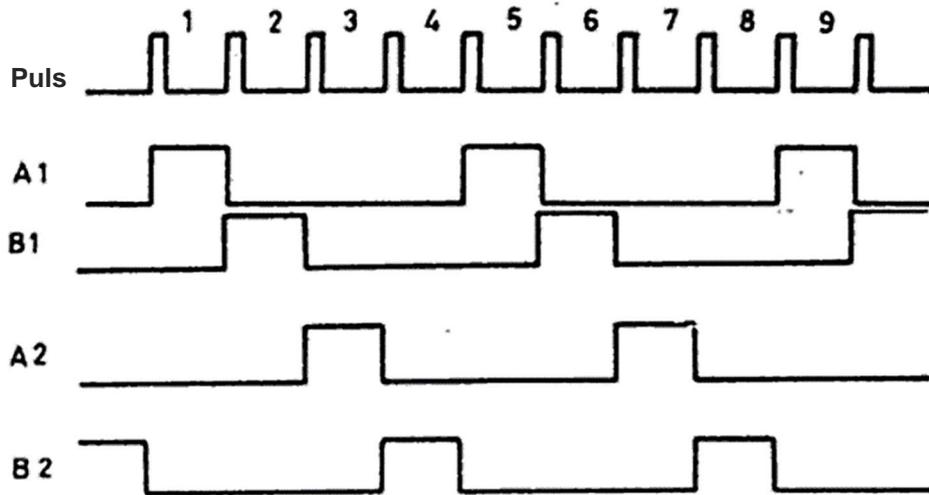


Abb. 27: Ansteuern eines Schrittmotors, Quelle: Athani (2005), S. 34.

Die Drehzahl wird also von der Frequenz des Impulssignals (Puls) der Steuerung bestimmt. Dieses ist natürlich in der Größe begrenzt. Da jedoch nur kleine Drehzahlen und dadurch auch nur kleine Frequenzen benötigt werden, ist eine nähere Betrachtung dieser Problematik nicht erforderlich. Der Vorteil gegenüber Gleichstrommotoren ist in Abb. 28 zu erkennen. Solange das maximale Moment laut Motorkennlinie nicht überschritten wird, ist die Drehzahl nur von der Puls-Frequenz abhängig. Natürlich ist hierbei der Drehzahlbereich stark begrenzt, jedoch für die gegebenen Anforderungen ausreichend.

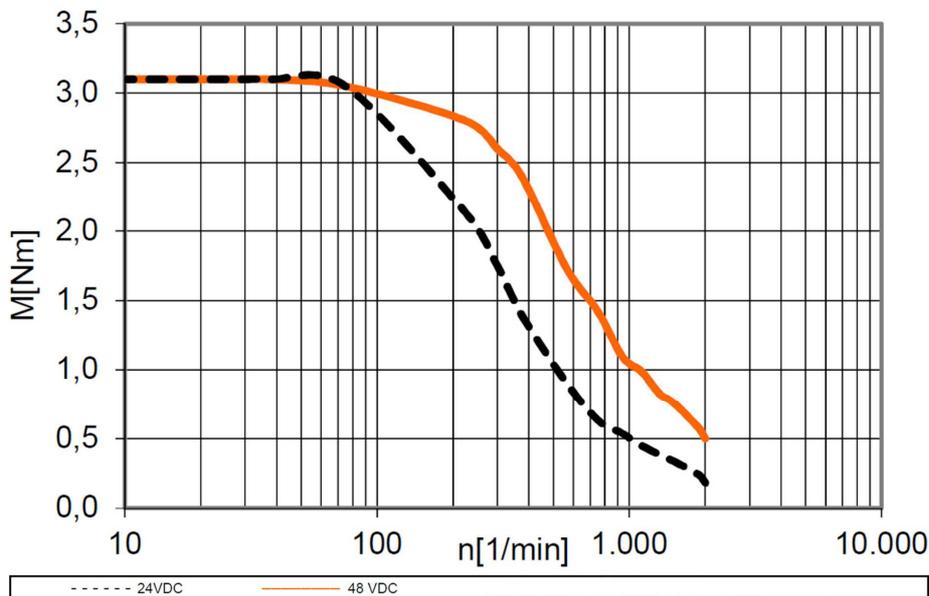


Abb. 28: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie Schrittmotor NEMA 23XL, Quelle: Icus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].

4.1.3.3 Drehrichtungsänderung

Eine Drehrichtungsänderung ist bei Schrittmotoren ebenfalls leicht zu realisieren, indem die Ansteuerungs-Reihenfolge der Phasen umgedreht wird. Dies erfolgt über den Richtungseingang der Treiberstufe. Durch das Haltemoment ist auch mit keinem „Drehmomentloch“ während der Richtungsänderung zu rechnen.

4.1.4 Drehgeber

Ein sehr wichtiger Punkt bei der Antriebsauswahl ist das genaue Positionieren. Mit einem Schrittmotor kann, wie schon erwähnt, über den bekannten Schrittwinkel eine beliebige Position berechnet und angefahren werden. Bei anderen Motorbauweisen ist dies über die konstante Drehzahl und die Einschaltdauer ebenfalls begrenzt möglich. Für höchste Anforderungen bedarf es jedoch ein genaues Wissen über Drehzahl- und Winkellage einer rotierenden Maschine. Dies kann mit Hilfe eines Drehgebers, auch Encoder genannt, realisiert werden. Ein Encoder wandelt einen Winkel zweier sich relativ zueinander drehbaren Objekte in ein elektrisches Signal um.²¹ Die Winkelstellung wird dabei immer zu einem Referenzpunkt gemessen. Grob wird zwischen zwei Kodierungsarten unterschieden:

- Inkrementalkode
- Absolut-Kode

4.1.4.1 Inkrementalkode

Ein Inkrementalgeber gibt den Wegelementen zugeordnete Impulse ab, die dann mit Hilfe eines Zählers aufsummiert werden.²² Aus der Anzahl bzw. Frequenz dieser Impulse lässt sich dann Winkellage und Drehzahl bestimmen.

Das Problem hierbei lässt sich in Abb. 29 gut erkennen. Durch das gleichmäßig geteilte Raster des inkrementalen Gebers wird nur die relative Winkeländerung ausgegeben und nicht die absolute Winkelinformation. Durch ein zweites Signal lässt sich zwar die Drehrichtung bestimmen, für den absoluten Winkel muss jedoch zuerst ein Referenzpunkt angefahren werden.

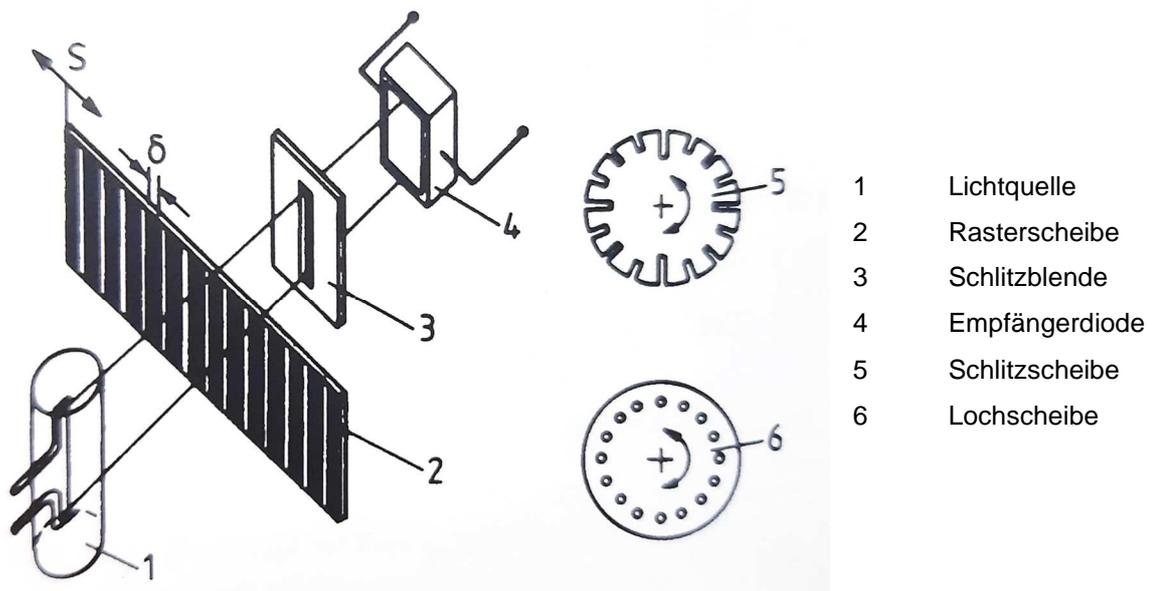


Abb. 29: Funktionsweise Inkrementalgeber, Quelle: Bergmann (2016), S.325.

²¹ Vgl. Basler (2016), S. 1.

²² Vgl. Bergmann (2016), S. 325.

4.1.4.2 Absolut-Kode

Soll zu jeder Zeit eine absolute Winkelposition zur Verfügung stehen, wird ein Absolutwertgeber benötigt. Hier wird anstelle eines monotonen Rasters eine aus mehreren Spuren bestehende Kodierung gelesen. In Abb. 30 ist ersichtlich, dass sich der Code in jeder Position unterscheidet, was eine eindeutige Winkelerkennung zu jedem Zeitpunkt ermöglicht.²³

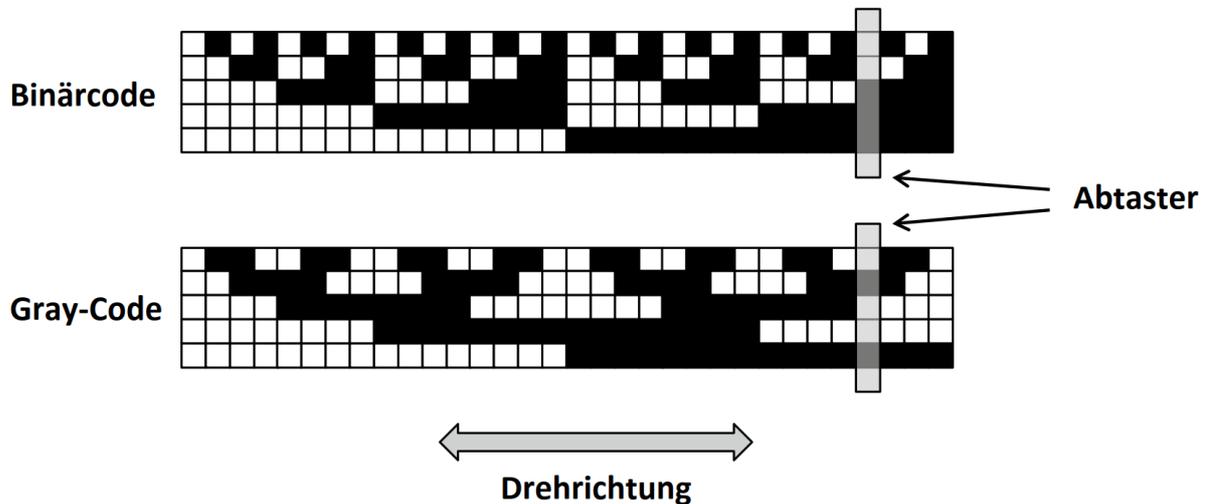


Abb. 30: Absolut Code, Quelle: Basler (2016), S. 17.

4.1.4.3 Fazit

Nun stellt sich die Frage ob für die gegebenen Anforderungen, die relative Winkeländerung ausreicht oder ob die ständige Kenntnis der absoluten Winkelposition notwendig ist. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die exakte Position der Welle beim Einschalten des Motors zur Verfügung stehen muss.²⁴ Dies wäre hilfreich, um die eingestellte Stufe des Transformators bei Prüfbeginn zu erfahren, um gegebenenfalls Änderungen vorzunehmen. Da jedoch die Stufenschalter nicht alle gleich verbaut sind, kann unmöglich durch den Winkel auf die Stufe geschlossen werden. Dies macht eine Referenzfahrt sowieso notwendig, wodurch sich die absolute Position auch mit einem Inkrementalgeber bestimmen lässt. Für diese Anwendung ist der Mehraufwand eines Absolutwertgebers deshalb nicht notwendig.

²³ Vgl. Bergmann (2016), S. 325.

²⁴ Vgl. Basler (2016), S. 16.

4.1.5 Entscheidung

In Tab. 3 werden die verschiedenen Antriebstechnologien gegenübergestellt, um die geeignetste für die gegebenen Anforderungen zu eruieren. Dabei wird jeweils der beste Motortyp in der jeweiligen Kategorie farblich hinterlegt.

Prior.	Anforderung	DC-Motor	BLDC-Motor	Schrittmotor
2	Drehzahl	Regeln über Spannungsstellung Drehzahl stark von Moment abhängig	Regeln über Treiber Drehmoment bis sehr hohe Drehzahlen konstant.	Regeln über Treiber Konstantes Moment bei geringer Drehzahl.
2	Drehrichtung	Phasentausch Momentloch möglich	Über Treiber Kein Momentloch	Über Treiber Kein Momentloch
1	Positionierung	Nur bei konstanter Belastung möglich	Über Hallsensoren Begrenzt möglich	Über Schrittwinkel Hochgenau

Tab. 3: Gegenüberstellung Antriebstechnik, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass sich der DC-Motor gegen seine Mitbewerber nicht behaupten kann. Bei den verbleibenden zwei Typen ist die Entscheidung nicht so einfach. Drehrichtungsänderungen lassen sich mit beiden Motoren leicht realisieren. Bei der Drehzahlsteuerung liegt der BLDC-Motor, speziell wegen seinem hohen Drehzahlenbereich bei konstantem Moment, vorne. Jedoch werden für diese spezifische Anwendung nur sehr kleine Drehzahlen benötigt, die der Schrittmotor ebenfalls mit konstantem Moment fahren kann. Die Entscheidung ist deshalb in der letzten Kategorie zu fällen. Diese kann der Schrittmotor für sich entscheiden. Mit diesen können genaue Positionieraufgaben auch ohne Einsatz eines Encoders einfach realisiert werden.

Die Entscheidung fällt deshalb auf den Schrittmotor NEMA 23XL von Igus. Dieser kann laut Abb. 28 ein Drehmoment von 3,1 Nm aufbringen. Die maximale Drehzahl innerhalb dieses Bereiches liegt bei nur 100 n/min, ist aber für die Anwendung mehr als ausreichend. Nicht ausreichend ist hingegen das maximale Moment des Motors. In Kapitel 3.4.3 zeigen Versuche, dass mindestens ein Drehmoment von über 8 Nm benötigt wird, um alle Stufenschalter-Bauformen zu bedienen. Da mit noch höheren Lasten zu rechnen ist und die Stufenschalter nicht empfindlich auf hohe Momente reagieren, sind mindestens 15 Nm gefordert.

Dies wird über ein passendes Planetengetriebe mit einer Übersetzung von $i=5$ realisiert. Die NEMA-Bauform ist schon für einen Getriebeanbau vorbereitet. Neben den höheren Momenten wird über ein Getriebe auch eine kleinere Schrittauflösung realisiert, was wiederum die Positioniergenauigkeit erhöht. Um bei Belastungen über dem zulässigen Momentbereich Schrittwerte zu vermeiden, wird zusätzlich ein Inkrementalgeber eingesetzt, der schon im Motor verbaut ist.

4.2 Vertikal-Hub

Wie in Kapitel 3.3 schon behandelt ist es notwendig, vor der Drehbewegung den Stufenschalter vertikal nach oben zu ziehen, um ihn zu entsperren. Danach kann er erst in die gewünschte Stufe gedreht werden, wo er durch eine Federkraft wieder selbstständig arretiert. In Abb. 31 ist die mechanische Funktionsweise dargestellt.

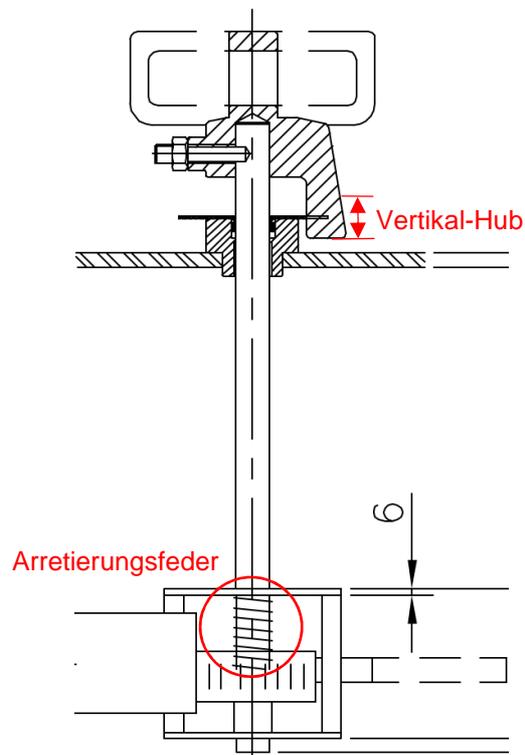


Abb. 31: Vertikal-Bewegung Stufenschalter, Quelle: ELMEK A.S. (2011) (leicht modifiziert).

Der benötigte vertikale Hub variiert hierbei, je nach Stufenschalter-Bauform, zwischen 5 und 15 mm. Daraus und aus den vorherigen Kapiteln ergibt sich für die Vertikal-Bewegung folgende Spezifizierung:

- 20 mm Vertikal-Hub
- Kraft min. 300 N
- Bremse
- Geringe Verfahrensgeschwindigkeit

Diese Spezifikationen sprechen für den Einsatz eines Gewindespindelantriebes. Natürlich kann auch über den Einsatz eines Linearmotors nachgedacht werden, jedoch liegen dessen Vorteile eher in hohen Verfahrensgeschwindigkeiten und durch die fehlende Untersetzung müsste dieser sehr groß dimensioniert werden, was sich negativ auf Baugröße und Kosten auswirkt. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Selbsthemmung, wodurch ein zusätzliches Bremssystem notwendig wäre.

4.2.1 Gewindespindel-Lineartisch

Der Gewindespindel-Lineartisch in Abb. 32 besteht aus einem Schlitten, der auf einer Führung liegt. Die Gewindespindel befindet sich gelagert auf den Führungsaufnehmungen und ist über eine Gewindemutter mit dem Schlitten verbunden. Wird nun die Spindel in eine Drehbewegung versetzt, so führt der Schlitten eine Linearbewegung aus. Bei Steilgewinden funktioniert diese Kraftübertragung auch umgekehrt, wo hingegen Spindeln mit einer geringen Steigung selbsthemmend sind.

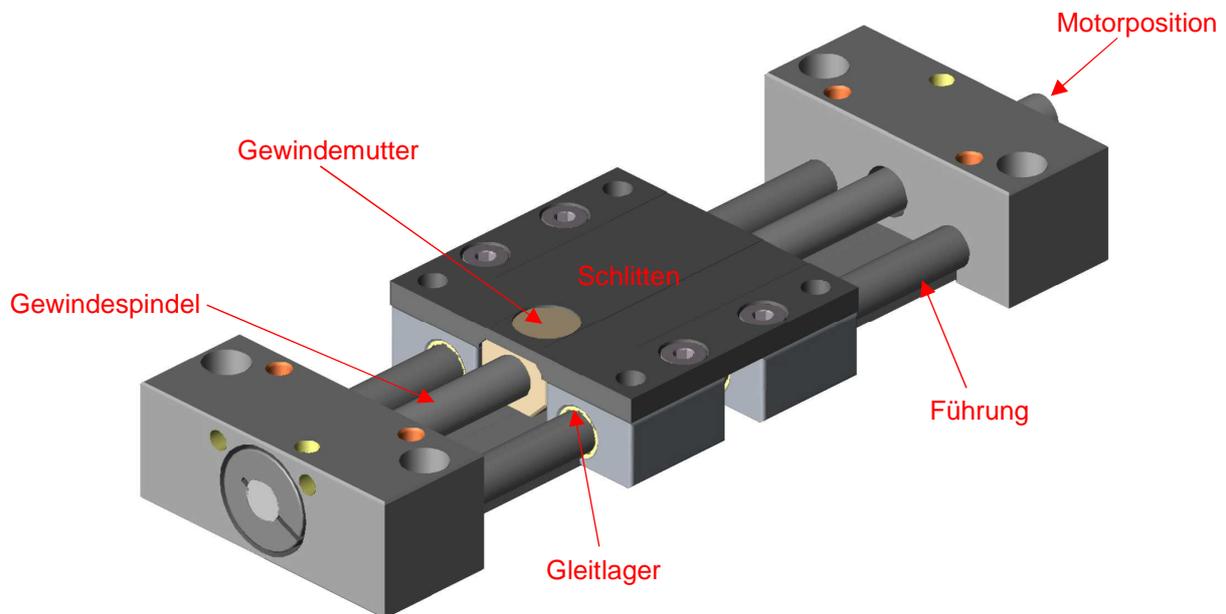


Abb. 32: Gewindespindel-Lineartisch, Quelle: Iigus (2019), S. 1 (leicht modifiziert).

4.2.2 Auswahl

Da große Lasten bei geringen Geschwindigkeiten gefordert sind, fällt die Auswahl auf die kugelumgelagerte Trapezgewindespindel TR10x2. Die geringe Steigung von 2 mm hat nicht nur eine hohe Untersezung zur Folge, sondern bewirkt auch eine Selbsthemmung, wodurch kein zusätzliches Bremssystem mehr notwendig ist.

Da der Motor für die Drehbewegung auf dem Schlitten montiert wird und dadurch auch dessen Moment auf darauf wirkt, darf dieser nur über ein geringes Spiel verfügen, um die geforderte hohe Positioniergenauigkeit zu gewährleisten. Deshalb fällt die Wahl auf ein Gleitlager zwischen Schlitten und Führung. Dies führt jedoch zu dem in Abb. 33a veranschaulichten Problem. Je mehr sich der Schwerpunkt der axialen Last von der Z-Achse entfernt, desto größer wird das Moment im Lager. Wird dieses Moment zu groß, blockieren die Gleitlager. Da der in Kapitel 4.1.5 ausgewählte Motor für die Drehbewegung eine breite Bauform besitzt und große axiale Kräfte auftreten können, wäre dies durchaus denkbar. Eine Lösung für dieses Problem zeigt Abb. 33b. Durch die Verwendung von zwei Linearmodulen wird nicht nur die Belastung geteilt, sondern es egalisieren sich auch die Hebelkräfte, wodurch es zu keiner Momentbelastung mehr kommt.

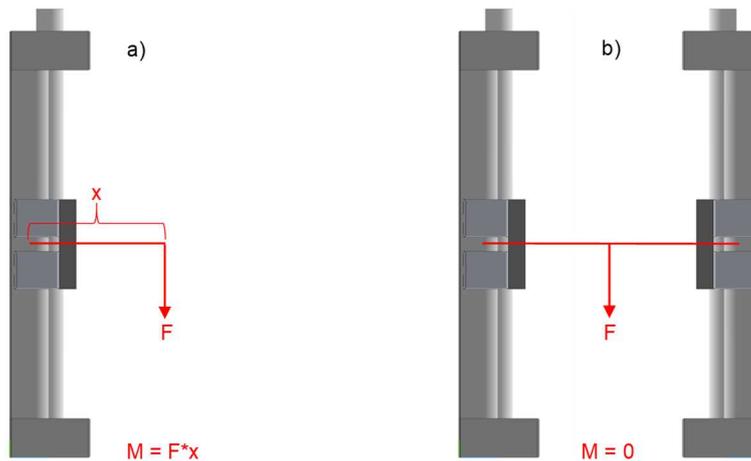


Abb. 33: Lineartisch Momentbelastung, Quelle: Igus (2019), S. 1 (leicht modifiziert).

Als Spindeltrieb eignet sich am besten, aus denselben in Kapitel 4.1.5 eruierten Gründen, ein Schrittmotor. Dieser wird an einem Ende des Lineartisches montiert und über eine Kupplung mit der Gewindespindel verbunden.

4.2.3 Auslegung

Die benötigten Schrittmotoren sind nun zu dimensionieren bzw. auszuwählen. Dafür wird das erforderliche Motormoment berechnet, um die notwendige Axialkraft aufzubringen. Die Versuche aus Kapitel 3.4.3 zeigen eine notwendige Maximalkraft von 210 N. Da jedoch noch das Gewicht von Motor, Getriebe und Stufenschalter-Aufnahme zu berücksichtigen ist, wird mit einem mindestens erforderlichen Kraftbedarf von 300 N gerechnet. Dies bedeutet, dass bei Verwendung von zwei Linearmodulen je eine Kraft von 150 N benötigt wird.

Zuerst muss der Wirkungsgrad berechnet werden, mit dem die Spindel ein Drehmoment in eine Kraft umwandelt. Dies wird aus folgender Gleichung ermittelt:

$$\eta = \frac{1 - \mu \cdot \tan \alpha}{1 + \mu / \tan \alpha} \quad (4.1)$$

η	Wirkungsgrad
μ	Reibungswiderstand
$\alpha / ^\circ$	Steigungswinkel

$$\eta = \frac{1 - 0,25 \cdot \tan 3,64}{1 + 0,25 / \tan 3,64}$$

$$\eta = 0,2$$

Der verwendete Steigungswinkel und Reibwiderstand stammen vom Herstellerdatenblatt (Igus). Über die Formel für die Kraft bei bekanntem Moment kann auch das erforderliche Moment bei bekannter Kraft ermittelt werden:

$$F_a = \frac{2\pi \cdot \eta \cdot M_d}{P \cdot 10^{-3}} \quad (4.2)$$

F_a / N	erzeugte Kraft
M_d / Nm	zugeführtes Drehmoment

$$M_d = \frac{F_a \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (4.3)$$

P / mm	Steigung
----------	----------

$$M_d = \frac{150 \text{ N} \cdot 2 \text{ mm}}{2000\pi \cdot 0,2}$$

η	Wirkungsgrad
--------	--------------

$$M_d = 0,24 \text{ Nm}$$

In der Formel aus 4.3 fehlt noch das Beschleunigungsmoment. Dieses kann aber für diese Anwendung vernachlässigt werden, da nur geringe Geschwindigkeiten benötigt und keine Anforderungen an die Anlaufzeit gestellt werden. Da jedoch Gleitlager und Trapezgewindespindel verwendet werden, ist das Losbrechmoment zu berücksichtigen.

Der ausgewählte NEMA17 Schrittmotor von Igus leistet ein Drehmoment von 0,5 Nm, wodurch noch genug Reserven für das Losbrechmoment und eventuell schwergängigere Stufenschalter-Bauformen vorhanden sind.

4.3 Gesamtantrieb

Die Abb. 34 zeigt den Gesamtantrieb. Die ausgewählten Linearmodule haben einen Hub von 90 mm. Dieser kann jedoch nicht vollständig verwendet werden, da die Endschalter noch ca. 10 mm pro Seite in Anspruch nehmen. Die verbleibenden 70 mm sind für die Anwendung jedoch mehr als ausreichend. Für die Befestigung des Getriebemotors zwischen den zwei Linearmodulen dient ein U-Blech, das sich zwischen Motor und Getriebe befindet. Ebenfalls notwendig sind die zwei Abstandhalter zwischen Linearschlitten und U-Blech, um Kollisionen im Verfahrensweg zu vermeiden. Ein weiterer Punkt, der noch zu erwähnen ist, betrifft die Verbindung der beiden Linearmodule. Diese ist abgesehen vom U-Blech nur an einer weiteren Stelle auszuführen. Dies kann unten oder oben, nicht jedoch beidseitig erfolgen. Der Grund dafür ist, dass es bei einer zu starren Verbindung schon durch geringe Asynchronitäten zwischen den beiden Antrieben zu Verspannungen und somit zum Blockieren kommen kann. Wird eine Seite frei gelassen, kann sich dies leichter ausgleichen.

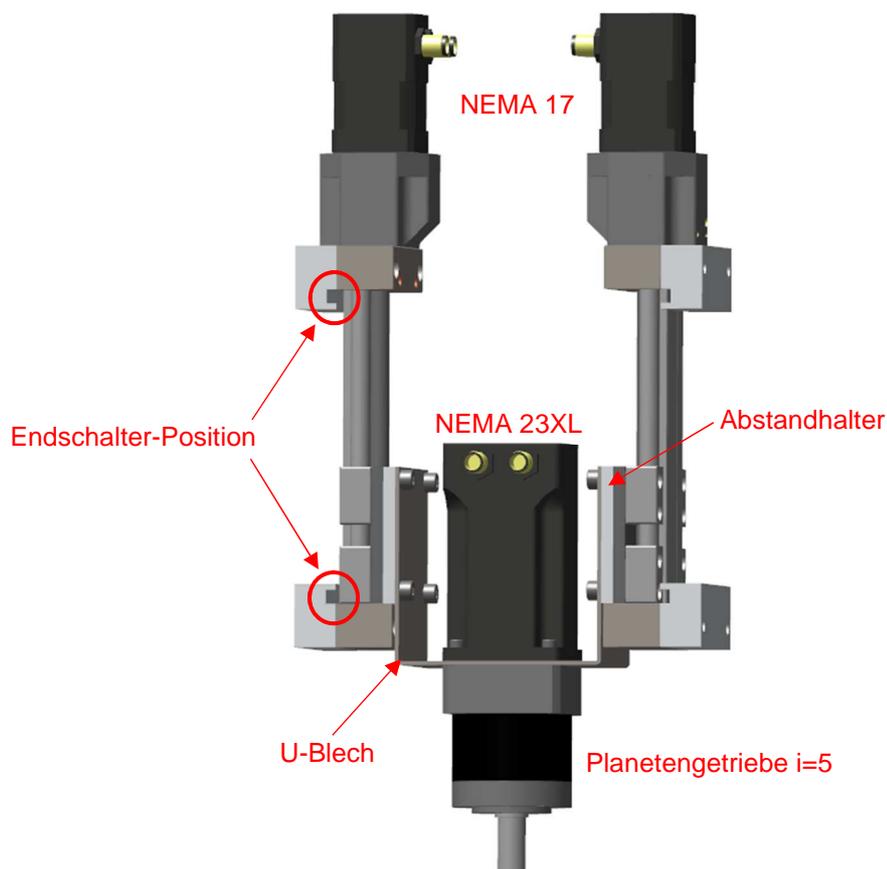


Abb. 34: Gesamtantrieb, Quelle: Eigene Darstellung.

5 BELASTUNGSMESSUNG

Sowohl der in Kapitel 4.1.1.3 für eine Stufenumschaltung notwendige Winkel α , als auch der für die Entsperrung nötige Vertikal-Hub variieren zwischen den verschiedenen Stufenschalter-Bauformen. Um eine korrekte Schalthandlung zu gewährleisten, ist also die genaue Kenntnis der verbauten Stufenschalter und deren Schaltwege erforderlich. Dies wäre noch realisierbar, jedoch Bedarf es aus sicherheitstechnischen Gründen sowieso einer Belastungsmessung. Wie schon erwähnt sind die Stufenschalter recht schwergängig und neigen zum Blockieren. Ohne ständiger Messung der aktuellen Belastung wird dies nicht erkannt, was zu einer Beschädigung der Umschaltvorrichtung oder der Stufenschalter selbst führen kann. Deshalb ist ein Monitoring der Kraft und Momentbelastung unbedingt notwendig. Da nun sowieso ein entsprechendes Messsystem vorhanden sein muss, ist die Idee die gesamte Bewegungssteuerung über Kraft- und Drehmomentmessungen zu realisieren.

5.1 Sensorik

Die Umsetzung dieser Aufgabe kann über Sensoren erfolgen, die folgende Messgrößen aufnehmen können:

- Kraftmessung: Zug/Druck (N) für Vertikal-Hub
- Momentmessung: Drehmoment (Nm) für Drehbewegung

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind hierbei nicht sehr groß, jedoch ist die Reaktionsgeschwindigkeit dieser Sensorik ein wichtiges Kriterium. Weiters müssen die zur Anwendung kommenden Messsysteme eine große Robustheit gegen industrielle Umwelteinflüsse aufweisen. Die geeignetste Technologie für industrielle Kraft- und Momentmessaufgaben, bei denen vor allem die Betriebssicherheit im Vordergrund steht, sind DMS-basierte Aufnehmer.

5.1.1 Kraftmessung

Eine Kraft auf einen Gegenstand bewirkt dessen Verformung. Wird der Elastizitätsbereich hierbei nicht überschritten, besteht zwischen Dehnung und Spannung Proportionalität. Da die Dehnung von der Längenänderung (5.1) und die mechanische Spannung von Kraft und Querschnitt (5.2) abhängig ist, kann von der Verformung eines Gegenstandes auf die darauf wirkende Kraft geschlossen werden.²⁵

$\varepsilon = \Delta l / l$	(5.1)	$\varepsilon / \frac{\mu m}{m}$	Dehnung
$\sigma = \frac{F}{q}$	(5.2)	l / m	Länge
$\sigma = E * \varepsilon$	(5.3)	$\sigma / N * m^{-2}$	mechanische Spannung
		$E / \frac{N}{m^2}$	Elastizitätsmodul
		q / m^2	Querschnitt
		F / N	Kraft

²⁵ Vgl. Bergmann (2016), S. 327.

Dieses Prinzip kann für die Kraftmessung verwendet werden, indem die Verformung eines Messgrößenaufnehmers erfasst und daraus auf die einwirkenden Kräfte geschlossen wird. Dabei ist darauf zu achten, dass der Elastizitätsbereich eines Werkstoffes nicht überschritten wird, da sonst eine plastische Dehnung auftritt. Dies würde weitere Kraftmessungen unmöglich machen und könnte zum Bruch führen.²⁶

5.1.1.1 Dehnungsmessstreifen

Ein Sensor, der sich optimal für die Messung von kleinsten Längenänderungen eignet, ist der Dehnungsmessstreifen. Dieser Sensor besteht aus einem elektrischen Leiter, dessen Widerstand von seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem spezifischen Widerstand abhängt.

$$R = \frac{l}{q} \rho \quad (5.4)$$

R/Ω	Widerstand
l/m	Länge
q/m^2	Querschnitt
$\rho/\Omega m$	spezifischer Widerstand

Durch das Strecken oder Stauchen dieses Leiters, wird dessen Länge, Querschnitt und spezifischer Widerstand verändert, wodurch über die Änderung des Widerstandes auf die Formänderung geschlossen werden kann. Da sich bei einer elastischen Verformung von Metallen der spezifische Widerstand nur sehr wenig ändert, kann dies vernachlässigt werden und es gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} \quad (5.5)$$

R/Ω	Widerstand
l/m	Länge
q/m^2	Querschnitt

Die relative Widerstandsänderung kann hierbei höchstens doppelt so hoch wie die zugehörige Dehnung sein. Da die zu messende Dehnungen im Mikrometer-Bereich liegen, sind auch die zu verarbeitenden Widerstandsänderungen dementsprechend niedrig.²⁷

Darum werden Folien-Messstreifen aus Abb. 35 verwendet, die aus einem Messgitter bestehen, wodurch sich die Leitungslänge stark vergrößert. Diese werden dann auf das zu untersuchende Werkstück geklebt. Dabei muss mit großer Sorgfalt vorgegangen werden, da diese nur in eingezeichnete Richtung (effektive Messgitterlänge) funktionieren.

²⁶ Vgl. Bergmann (2016), S. 327.

²⁷ Vgl. Schrüfner (2006), S. 253.

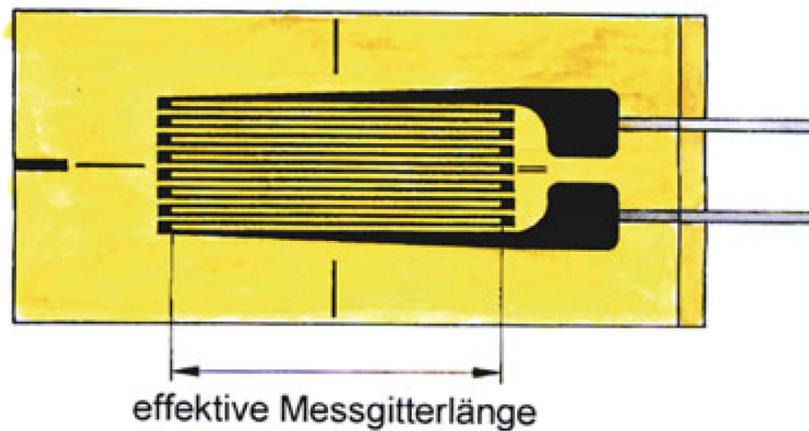


Abb. 35: Dehnungsmessstreifen, Quelle: Keil (2016), S. 15.

5.1.1.2 Messschaltung

Allein die Leitungsverlängerung reicht noch nicht aus, um brauchbare Messausschläge zu erhalten. Die Widerstandsänderung ist immer noch viel zu klein und da der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters temperaturabhängig ist, geht dies direkt als Fehler in die Messung ein. Deshalb kommen Brückenschaltungen zum Einsatz, um den Messausschlag zu maximieren und den Einfluss der Temperatur zu kompensieren.

Wenn in Abb. 36 die Kraft F auf den Biegebalken wirkt, werden die Dehnungsmessstreifen $R1$ und $R3$ gedehnt während gleichzeitig $R2$ und $R4$ gestaucht werden. Diese Widerstände werden dann in einer Halb- bzw. Vollbrücke verschalten.

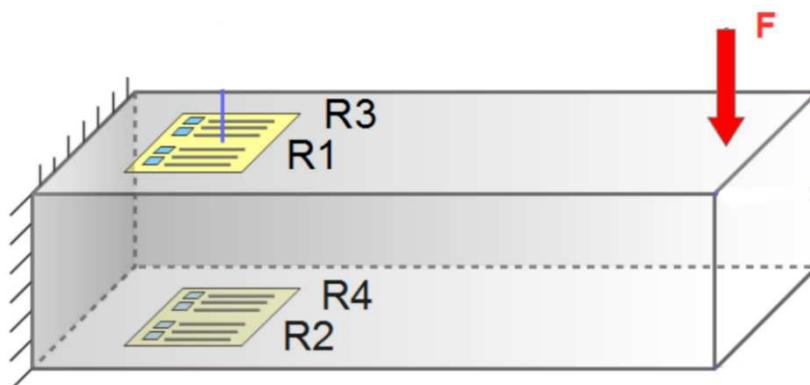
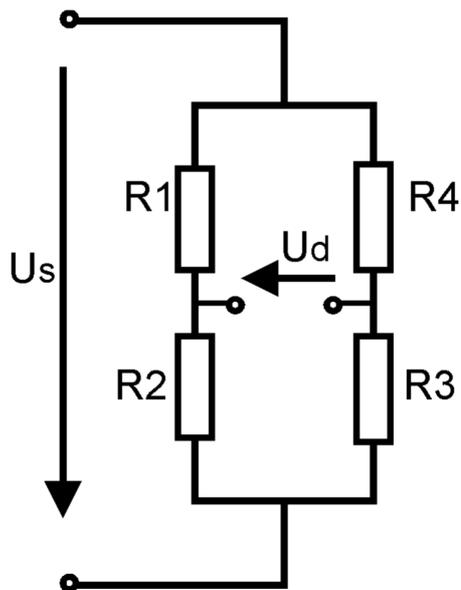


Abb. 36: Biegebalken-Kraft-Messaufnehmer, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].

Wirkt keine Kraft auf dem Biegebalken dann ist die Brücke in Abb. 37 ausgeglichen und die Differenzspannung $U_d = 0 V$. Bei steigender Belastung ändern sich die Widerstände $R1$ und $R3$ entgegengesetzt zu $R2$ und $R4$, wodurch die Differenzspannung stärker ansteigt. Dies erlaubt eine hohe Verstärkung. Da sich eine Temperaturschwankung auf alle Widerstände gleich auswirkt, kompensieren sich die temperaturbedingten Dehnung und Widerstandsänderungen. Dieses Signal wird von einer Elektronik verstärkt und als analoges Spannungs- oder Stromsignal ausgegeben.



$$(5.6) \quad R1 = R2 = R3 = R4 \vee \frac{R1}{R2} = \frac{R4}{R3} \Rightarrow U_d = 0$$

$$(5.7) \quad \frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} * \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right)$$

Abb. 37: Vollbrückenschaltung, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].

5.1.2 Momentmessung

Ein angreifendes Drehmoment an einer Welle bewirkt ebenfalls eine Verformung. Jedoch kommt es zu keinen Längen- und Querschnittsänderungen, sondern es treten sogenannte Schubspannungen auf. Diese entstehen, wenn Kräfte tangential zu der Ebene gerichtet sind, in der sie angreifen. Die größte Dehnung tritt dabei unter einem Winkel von 45° zur Welle auf.²⁸

5.1.2.1 Dehnungsmessstreifen

Diese Dehnungen können ebenfalls mit Dehnungsmessstreifen erfasst werden. Jedoch ist auf eine andere Positionierung zu achten. Da, wie schon erwähnt, die größte Dehnung unter einem Winkel von 45° auftritt, sind die Dehnungsmessstreifen in Abb. 38 dementsprechend geklebt.

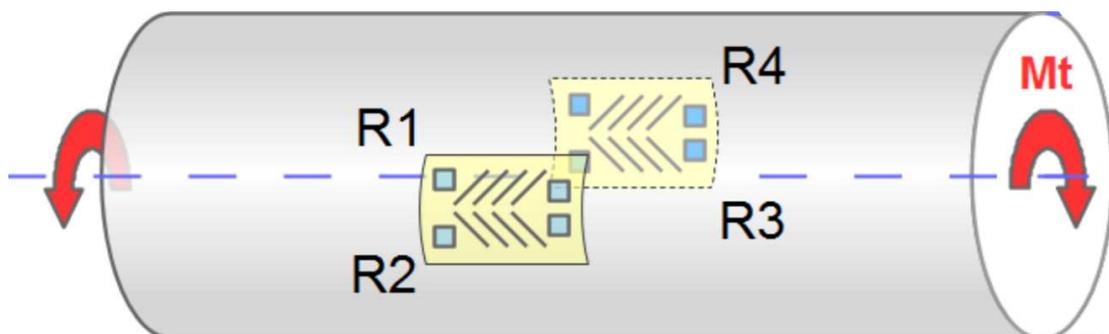


Abb. 38: Positionierung von Dehnungsmessstreifen bei Momentmessung, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].

²⁸ Vgl. Schröfler (2006), S. 258.

5.1.2.2 Messschaltung

Auch hier kommt eine Brückenschaltung wie in Kapitel 5.1.1.2 zur Anwendung, um Messergebnisse zu erhalten, die unabhängig von der Temperatur und proportional der Schubspannung sind. Ebenfalls ist es möglich Momente in beiden Richtungen zu messen. Eine Momentrichtungsänderung äußert sich in einem Vorzeichenwechsel von U_a in Abb. 37. Dies ist für die spezifische Anwendung sehr wichtig, da Schalthandlungen in beiden Richtungen durchgeführt und kontrolliert werden müssen.

5.1.3 Kraftmessdose

Da die Messergebnisse sehr von der Positionierung der Dehnungsmessstreifen abhängig sind und dies in der Praxis schwer zu realisieren ist, wird häufig auf schon fertig beklebte und kalibrierte Messgrößenaufnehmer zurückgegriffen. Diese sogenannten Kraftmessdosen werden so konstruiert, dass sie eine hohe Dehnung bei einer einwirkenden Kraft aufweisen. Durch die optimale Positionierung der Dehnungsmessstreifen können nun Kräfte oder Momente sehr genau gemessen werden.

Da für die Anwendung sowohl Kraft- als auch Momentmessungen notwendig sind, wird auf einen Mehrkomponentensensor zurückgegriffen. Mit diesem ist es möglich Zug- und Druckkräfte, sowie Drehmomente in beide Richtungen zu messen.

Die Kraftmessdose M-2396 von Lorenz Messtechnik in Abb. 39 ist ideal für die gegebenen Anforderungen. Durch die Flansch-Flansch-Lösung kann sie einfach in die Konstruktion integriert werden und den Kraftbedarf des Linearantriebes sowie das anliegende Moment jederzeit messen. Ein Nachteil dieses kombinierten Sensors ist das Übersprechen. Dies bedeutet, dass Kraft- und Momentmessung nicht völlig unabhängig voneinander ablaufen, sondern sich gegenseitig beeinflussen. Das Übersprechen wird in Prozent angegeben und beträgt bei der verwendeten Messdose 1%, was für diese Anwendung kein Problem darstellt. Außerdem ist es sowieso nicht nötig Kraft und Moment gleichzeitig zu messen, da während der Linearbewegung kein Moment und während der Drehbewegung nur geringe vertikale Kräfte anliegen. Der Einfluss des Übersprechens kommt deshalb nicht zum Tragen.



Pin A	Speisung (-) Drehmoment - <i>Excitation (-) torque</i>
Pin B	Speisung (+) Drehmoment - <i>Excitation (+) torque</i>
Pin C	Signal (+) Drehmoment - <i>Signal (+) torque</i>
Pin D	Signal (-) Drehmoment - <i>Signal (-) torque</i>
Pin E	Speisung (-) Kraft - <i>Excitation (-) force</i>
Pin F	Speisung (+) Kraft - <i>Excitation (+) force</i>
Pin G	Signal (+) Kraft - <i>Signal (+) force</i>
Pin H	Signal (-) Kraft - <i>Signal (-) force</i>
Pin J	Kontrollsignal Kraft (Option) - <i>Control signal force (option)</i>
Pin K	Kontrollsignal Drehmoment (Option) - <i>Control signal torque (option)</i>
Pin L	NC
Pin M	Schirm - <i>Shield</i>

Abb. 39: Mehrkomponentensensor M-2396, Lorenz Messtechnik (2019) Online-Quelle [Stand 05.10.2019].

5.1.4 Messverstärker

Der Mehrkomponentensensor M-2396 besitzt zwei Ausgänge, jeweils einen für die Moment- und Kraftmessung. Diese sind intern als Brücke wie in Abb. 37 verschaltet, weshalb es auch eine separate Speisung gibt. Diese Signale können jedoch nicht direkt in der Steuerung eingelesen werden, sondern

müssen zuerst über einen Messverstärker auf normgerechte Ausgangssignale verstärkt werden. Die meisten Steuerungen können folgende analoge Signalarten verarbeiten:

- Strom
 - 0-20 mA
 - 4-20 mA
 - ± 20 mA
- Spannung
 - ± 10 V
 - 0-10 V
 - 1-5 V

Stromsignale haben gegenüber Spannungssignalen den Vorteil, dass sie wesentlich unempfindlicher gegen elektromagnetische Störungen sind. Da bei dieser Anwendung damit gerechnet werden muss, fällt die Entscheidung auf einen Stromausgang. Aus Kapitel 5.1.1.2 geht jedoch hervor, dass vom Sensor bis zum Messverstärker trotzdem eine Spannungsmessung durchgeführt wird. Da sich der Messverstärker im Verteilerschrank befindet, ist unbedingt bis dahin ein geschirmtes Kabel zu verwenden. Nun gilt es den passenden Messbereich zu ermitteln. Da jeweils Kraft und Moment in beide Richtungen gemessen werden sollen, würde sich ein ± 20 mA Signal anbieten. Das 4-20 mA Signal hat aber den Vorteil, dass durch die 4 mA im Offset-Bereich ein Drahtbruch zuverlässig detektiert werden kann. Dies ist für die beschriebene Anwendung erforderlich, da eine nicht erkannte Fehlfunktion der Sensorik zu Beschädigungen führen kann. Deshalb werden die Messverstärker E-GM 40 verwendet und nach Tab. 4 kalibriert.

Messverstärker E-GM 40 12 \pm 8 mA		Messverstärker E-GM 40 12 \pm 8 mA	
Momentbelastung	Ausgangssignal	Kraft	Ausgangssignal
-15 Nm	4 mA	-500 N	4 mA
0 Nm	12 mA	0 N	12 mA
15 Nm	20 mA	500 N	20 mA

Tab. 4: Kalibrierung der Messverstärker, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund des linearen Zusammenhangs verhält sich das Strom-Ausgangssignal proportional zur Belastung des Sensors. Dieses Signal kann nun in einen analogen 4-20 mA Eingang eingelesen und verarbeitet werden.

5.1.5 Einbauposition

Da der Mehrkomponentensensor sowohl zur Kraft- wie auch Momentmessung verwendet werden kann, ist die Platzierung so zu wählen, dass beide Messgrößen am Sensor angreifen. Die Getriebewelle erweist sich als optimale Position, jedoch ist die direkte Verbindung der beiden Bauteile nicht möglich. Für die feste Verbindung zwischen Sensorflansch und Welle sorgt der zusätzliche Adapter aus Abb. 40.

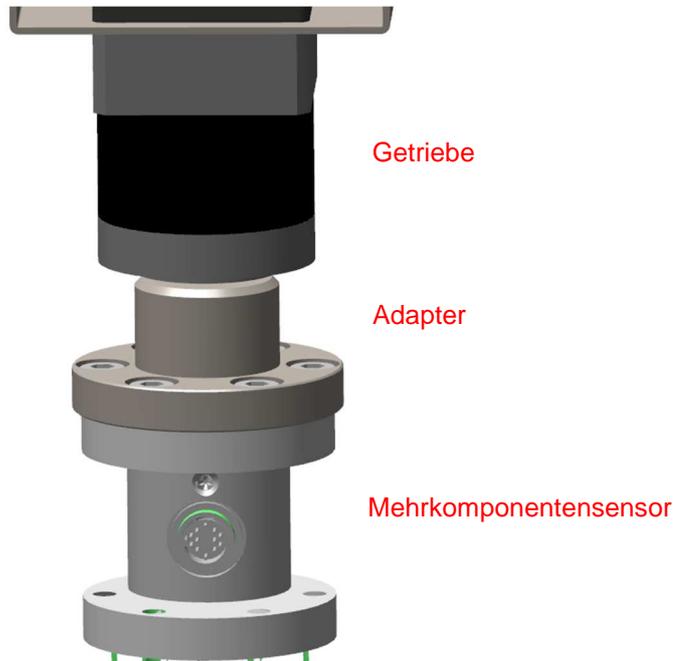


Abb. 40: Mehrkomponentensensor Einbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Adapter besitzt sensorseitig einen passenden Flansch und getriebeseitig wird das Moment durch die Passfeder der Welle und die axialen Kräfte durch eine Schraube in die Welle aufgenommen. Die Getriebewelle hat schon ein passendes Gewinde im Zapfen. Eine zusätzliche Lagerung ist hierbei nicht nötig, da die Getriebewelle laut Datenblatt für Axialkräfte bis zu 450 N gebaut ist. Dies ist für diese Anwendung ausreichend.

5.2 Alternative Messmethode: Motorstrommessung

Mittels der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Kraftmessdose können hochgenaue Messungen durchgeführt werden. Diese Genauigkeit ist jedoch für die Anwendung gar nicht notwendig, weshalb aus kommerziellen Gründen und zur Verringerung der Komplexität über alternative Messmethoden nachgedacht werden kann.

Ein interessanter Ansatz wäre die Momentmessung über den Motorstrom zu realisieren, wodurch der Mehrkomponentensensor eingespart werden kann.

5.2.1 Gleichstrommotor

Bei Gleichstrommotoren wird dies häufig angewendet, da hierbei der Motorstrom proportional zum Drehmoment ansteigt. In Abb. 41 ist gut ersichtlich, dass durch eine permanente Motorstrommessung jederzeit auf das anliegende Moment geschlossen werden kann.

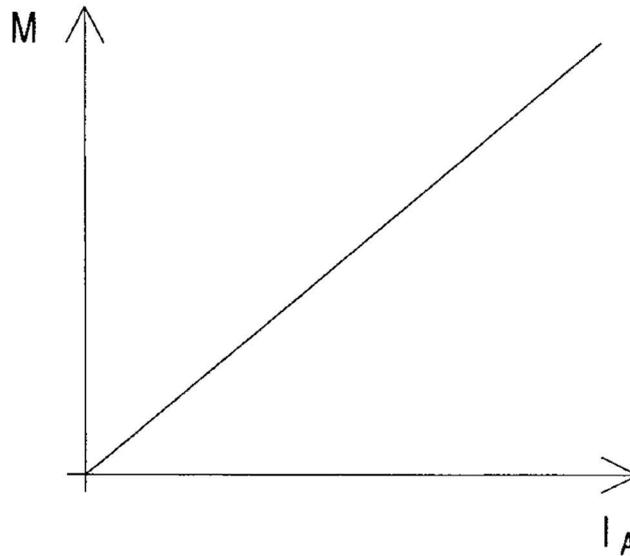


Abb. 41: Motorstrom-/Drehmomentkennlinie Gleichstrommotor, Quelle: Spring (2009), S. 52.

Da sich aber aus den in Kapitel 4.1.1 eruierten Gründen Gleichstrommaschinen nicht für die gegebenen Anforderungen eignen, wäre es optimal, wenn sich dieses Prinzip auch auf Schrittmotoren anwenden lässt.

5.2.2 Schrittmotor

Da Schrittmotoren mit einem eingepprägten Strom gefahren werden lässt sich dieser, anders als bei Gleichstrommaschinen, schwer zur Drehmomentmessung verwenden. Bei Schrittmotoren bleibt der Motorstrom auch bei schwankender Belastung stets konstant. Ein Schrittmotor erzeugt kein Moment, sondern eine bestimmte Drehbewegung, die bis zum maximalen Lastmoment des jeweiligen Motors eingehalten werden kann. Wird dieser überschritten kommt es zum Schrittwverlust. Aus diesem Grund fällt die Auswahl im Kapitel 4.1.5 auch auf einen Schrittmotor mit integriertem Inkrementalgeber. Wie schon ausführlich in Kapitel 4.1.4 behandelt misst dieser zuverlässig die Relativbewegung des Rotors, selbst wenn dieser überbelastet wird. Diese Messwerte werden als Feedback-Signal zur Steuerung übertragen, wodurch Schrittwverluste vermieden werden. Es wird also eine Closed-Loop-Regelung realisiert.

Mit einem geeigneten Treiber lässt sich damit eine Sinuskommutierung mit feldorientierter Regelung realisieren. Dieses Verfahren bewirkt, dass der Motorstrom dem Lastfall entsprechend geregelt wird. Dies schafft einen höheren Wirkungsgrad bei Lastschwankungen und höhere Spitzenmomente. Für die vorliegende Anwendung am Interessantesten ist jedoch, dass der Motorstrom nun abhängig von der Belastung ist. Dadurch soll es möglich sein, das anliegende Moment ohne Sensorik zu messen. Dafür ist jedoch eine ständige Motorstrommessung notwendig, welche in der verwendeten Icus Motorsteuerung D1 in Abb. 42 bereits integriert ist. Leider wird diese Messung momentan noch nicht ausgegeben, sondern kann nur vom internen Oszilloskop aufgezeichnet werden. Es ist aber seitens des Unternehmens Icus

angedacht, dass Informationen über die momentane Stromaufnahme der Motoren über eine CAN-Schnittstelle zukünftig ausgegeben werden.



Abb. 42: Igus D1 Motorsteuerung, Quelle: Igus (2019), S. 1.

Es wird erwartet, dass sich der Motorstrom nicht so proportional zum Moment, wie bei der Gleichstrommaschine, verhält und die Kennlinie einen eher nichtlinearen Verlauf hat. Bei den Linearantrieben gibt es zusätzlich noch ein weiteres Problem. Da die verwendeten Spindelgewinde-Lineartische selbsthemmend sind, werden bei Überbelastung die hohen Ströme wahrscheinlich nur für einen kurzen Moment auftreten, bevor der Motor blockiert und die Spindel sperrt. Da jedoch bei dem Versuchsaufbau sowieso eine genaue Kraftmessdose zur Anwendung kommt, kann über einen Vergleich der Messwerte eruiert werden, inwiefern die Motorstrommessung brauchbare Ergebnisse liefert. Dies wird in Kapitel 7.7 in Versuchen überprüft.

6 MECHANISCHE UMSETZUNG

In diesem Kapitel wird das mechanische Design und die Auslegung der Aufnahmeeinrichtung sowie die Positionierung der Vorrichtung am Transformatorendeckel behandelt. Dies beinhaltet auch die dafür notwendige Sensorik und gibt einen Einblick in dem Funktionsmechanismus der Anlage. Ein weiterer Bestandteil dieses Kapitels ist die notwendige Adaption der bestehenden Messzelle, um die Vormessung automatisiert durchführen zu können.

6.1 Aufnahmeeinrichtung Stufenschaltergriff

Die Aufnahmeeinrichtung ist die Verbindung zwischen Stufenschalter und Antriebssystem und hat die primäre Aufgabe der Kraftübertragung. Außerdem hat dieser Bauteil noch weitere Aufgaben zu erfüllen, die für das Funktionsprinzip der Anlage von zentraler Bedeutung sind. Die folgende Spezifizierung gibt einen Überblick über den Aufbau der Aufnahmeeinrichtung.

6.1.1 Anbindung und Maße

Die Aufnahmeeinrichtung wird direkt an den Flansch des Mehrkomponentensensor für die Kraft- und Momentmessung geschraubt und benötigt daher auf der oberen Seite ebenfalls den Flansch aus Abb. 39. Die Bestimmung der optimalen Baugröße erfolgt über Abb. 16. Hier wird der maximale Durchmesser auf 225 mm beschränkt, um eine Berührung des Ausdehnungsgefäßes zu vermeiden. Bei dieser Bemaßung sind fertigungsbedingte Toleranzen schon berücksichtigt.

Die Länge der Aufnahmeeinrichtung muss hingegen einen Mindestwert erreichen, sollte aber aus Gründen der Systemsteifigkeit so kurz wie möglich gehalten werden. Die Mindestlänge ist wieder aus Abb. 16 zu entnehmen. Alle Bauteile, die den maximalen Durchmesser überschreiten, müssen daher höher als 38 cm bezogen auf den Stufenschalter liegen. Da dies nicht auf den Mehrkomponentensensor zutrifft und dieser eine Länge von 6,5 cm aufweist, bleiben noch 31,5 cm übrig, welche die Aufnahmeeinrichtung mindestens aufweisen muss. Die Gesamtlänge der Einrichtung wird auf 32 cm festgelegt.

6.1.2 Spiel-Festlegung

Um die Robustheit des Systems zu gewährleisten wird ein vertikales Spiel benötigt, dessen aktuelle Position stets bekannt ist. Durch die verschiedenen Bauformen der zur Anwendung kommenden Stufenschalter und deren Toleranzen ist eine Positionierung allein über den Schaltwinkel problematisch. Natürlich ist es möglich mit den Schrittmotoren eine Position exakt anzufahren, jedoch variiert der Schaltwinkel α in Abb. 22 zwischen den Stufenschalter-Typen. In Kapitel 3.3 wurde die Funktionsweise des Stufenschalters erläutert. Daraus geht hervor, dass dieser in der jeweiligen Stufe durch eine Federkraft selbstständig arretiert. Diese Eigenschaft kann nun für die Betriebssicherheit verwendet werden.

Die Idee dahinter wird in Abb. 43 veranschaulicht. Hierbei soll ein Schaltvorgang von Stufe 3 in die Stufe 2 erfolgen. Im ersten Prozessabschnitt wird der Stufenschalter vertikal nach oben gezogen und erreicht im zweiten Abschnitt seine Endposition. Dadurch ist er für die Drehbewegung entsperrt. Im dritten Prozessabschnitt wird er in die Richtung der gewünschten Stufe gedreht. Nun wird er jedoch nicht an der exakten Position der zweiten Stufe abgesenkt, sondern schon davor. Der Absenkvorgang läuft so lange,

bis das Spiel eingefahren ist. Nun wird der Schalter langsam weitergedreht, bis er selbstständig im vierten Prozessabschnitt arretiert. Durch diese Methode können auch Stufenschalter mit unterschiedlichen Schaltwinkeln ohne eine Umkonfiguration der Steuerung bedient werden.

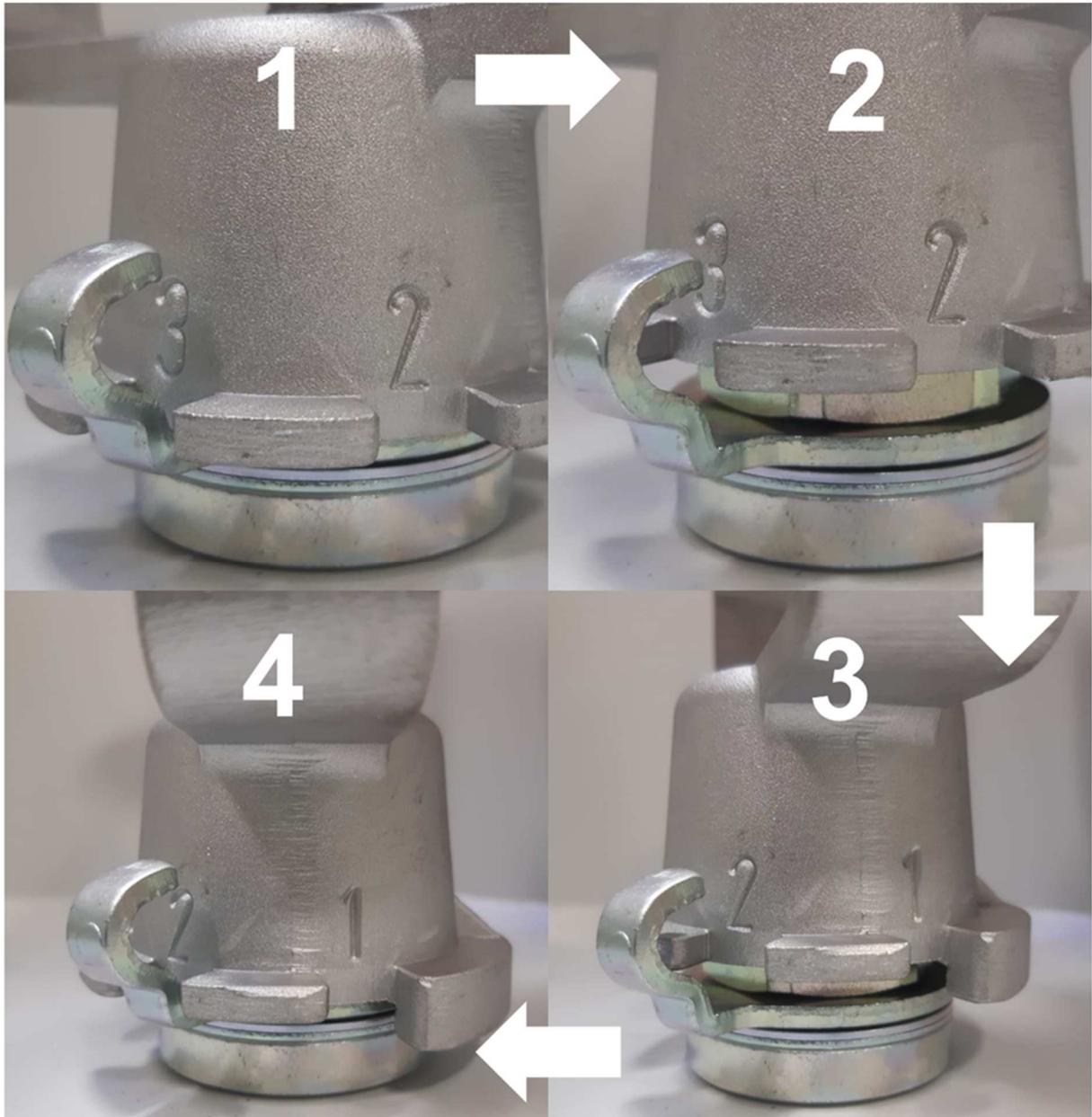


Abb. 43: Umschaltung durch Vertikal-Spiel, Quelle: Eigene Darstellung.

Die benötigte Spiel-Länge wird von dem erforderlichen Vertikal-Hub für die Entsperrung der Stufenschalter bestimmt. Dieser variiert jedoch zwischen den verschiedenen Bauformen. Untersuchungen ergeben einen maximalen Vertikal-Hub von 15 mm, weshalb dieser auf 20 mm festgelegt wird. Ein weiterer Punkt, der für diese Methode spricht, ist die dadurch erreichte Vereinfachung des Positioniervorganges. Ohne ein Spiel müsste die Höhenverstellung millimetergenau ausgeführt werden, um die Vorrichtung am Stufenschaltergriff fixieren zu können. Durch dessen Verwendung können geringe Höhenunterschiede ausgeglichen werden, was den Vorgang erleichtert und dadurch schneller macht.

6.1.3 Wegmesssystem

Wie schon erwähnt, ist es für die Methode aus Abb. 43 notwendig, jederzeit die momentane Stellung des Spiels zu kennen. Um dies zu realisieren kommen zwei Wegmesssysteme in Frage:

- Induktiver Wegsensor
- Potenziometer-Wegsensor

Da induktive Wegsensoren durch Magnetfelder, welche bei der Vormessung auftreten, gestört werden können, wird auf einen Potenziometer-Wegsensor zurückgegriffen. Um diesen in die Vorrichtung integrieren zu können, wird kurz auf dessen Funktionsweise eingegangen.

Potenziometrische Wegsensoren bestehen aus einem Potenziometer, dessen Abgriff von der zu messenden Größe, in diesem Fall dem Spiel, verstellt wird. Meist werden drahtgewickelte Potenziometer eingesetzt, dessen Material nur einen geringen Temperaturkoeffizienten aufweist und korrosionsbeständig ist. Der Abgriff erfolgt über einen Schleifkontakt. Dies ist auch der größte Nachteil dieser Technik, da der Schleifkontakt den Widerstandsdraht mit der Zeit beschädigen kann. Besonders bei Erschütterungen ist ein Ablösen des Abgriffes möglich. Dafür weist ein Widerstandsaufnehmer eine gute Empfindlichkeit auf und wird von Magnetfeldern nicht beeinflusst.²⁹

Da bei vorliegender Anwendung weder mit starken Erschütterungen noch mit hoher Beanspruchung zu rechnen ist, überwiegen die Vorteile eindeutig. In Abb. 44 ist der lineare Zusammenhang zwischen der Stellung des Schleifkontaktes und den abgegriffenen Widerstand klar ersichtlich.

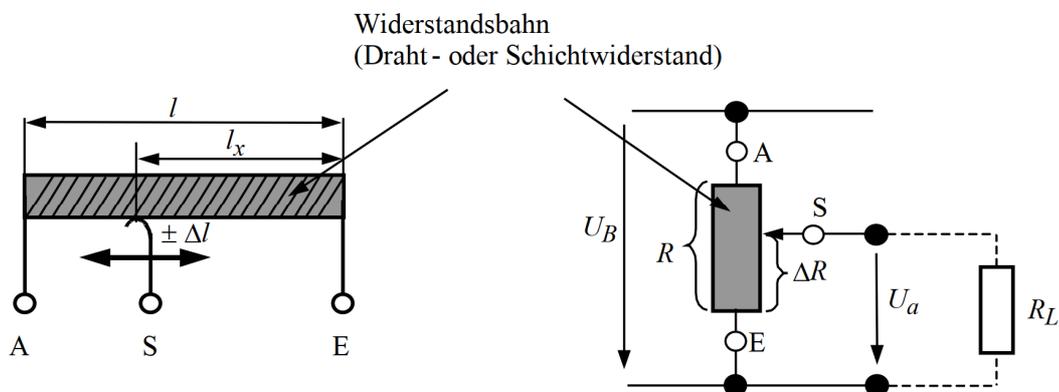


Abb. 44: Potenziometrischer Wegsensor, Quelle: Parthier (2007), S. 135.

Wird die den Widerstand proportionale Spannung U_a annähernd belastungsfrei vom Potenziometer abgegriffen können Genauigkeiten von $< 1\%$ erreicht werden. Dafür muss $R_L \gg R$ gelten. Dies lässt sich in der Praxis jedoch leicht realisieren.³⁰ Die abgegriffene Spannung kann nun in einem analogen Spannungseingang der Steuerung eingelesen und verarbeitet werden. Da für die spezifische Anwendung jedoch aus dem in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Gründen ein Stromsignal bevorzugt wird, kommt wieder ein Messverstärker mit einem 4-20 mA Ausgang zum Einsatz. Einige Steuerungen besitzen auch analoge Eingänge, über die Widerstandswerte direkt eingelesen werden können.

²⁹ Vgl. Schrüfer (2006), S. 230.

³⁰ Vgl. Parthier (2006), S. 135.

6.1.4 Adapter-System

Das Adapter-System dient der Befestigung des Stufenschalter-Griffes an der Umschaltvorrichtung. Auch hierbei gibt es einige Anforderungen:

- Der Adapter muss sich am Stufenschalter einfach zentrieren lassen, damit die Drehbewegung um den Mittelpunkt ausgeführt wird.
- Der Adapter muss für mehrere Stufenschalterarten gleicher Bauform funktionieren d.h. geometrische Abweichungen müssen kompensiert werden.
- Die Befestigung des Adapters auf dem Stufenschalter sollte nicht viel Zeit beanspruchen und kein Werkzeug benötigen.
- Der Adapter muss austauschbar sein, um die Umschaltvorrichtung auch für andere Bauformen verwenden zu können.

Die Abb. 45 zeigt die Realisierung eines Adaptersystems, das diese Anforderungen erfüllt. Durch die hellgraue Vorrichtung wird der Adapter beim Anbringen am Stufenschalter zentriert. Da diese durch den kleinen Sterngriff höhenverstellbar ist, können Längenabweichungen kompensiert werden. Durch den großen Sterngriff darunter wird der Adapter dann fixiert, auch hier können Breitenabweichungen ausgeglichen werden. Der gesamte Adapter ist gegebenenfalls auch austauschbar. Dafür ist aber, im Gegensatz zur Stufenschalter-Aufnahme, Werkzeug notwendig. Da der Austausch des Adapters jedoch selten vorkommt, ist dies zulässig.



Abb. 45: Stufenschalter-Adapter, Quelle: Eigene Darstellung.

6.1.5 Gesamtkonstruktion

Die Anbindung der Aufnahmeeinrichtung in Abb. 46 erfolgt über eine Flanschverbindung an den Mehrkomponentensensor, der über denselben Flansch verfügt. Das Spiel wird durch den Potenziometer-Wegsensor ständig überwacht und kann mit Hilfe der manuellen Fixierung in einer beliebigen Position gehalten werden. Dies wird nur beim Prototyp benötigt, falls sich das in Kapitel 6.1.2 behandelte Konzept der spielgesteuerten Positionierung als unbrauchbar herausstellt.

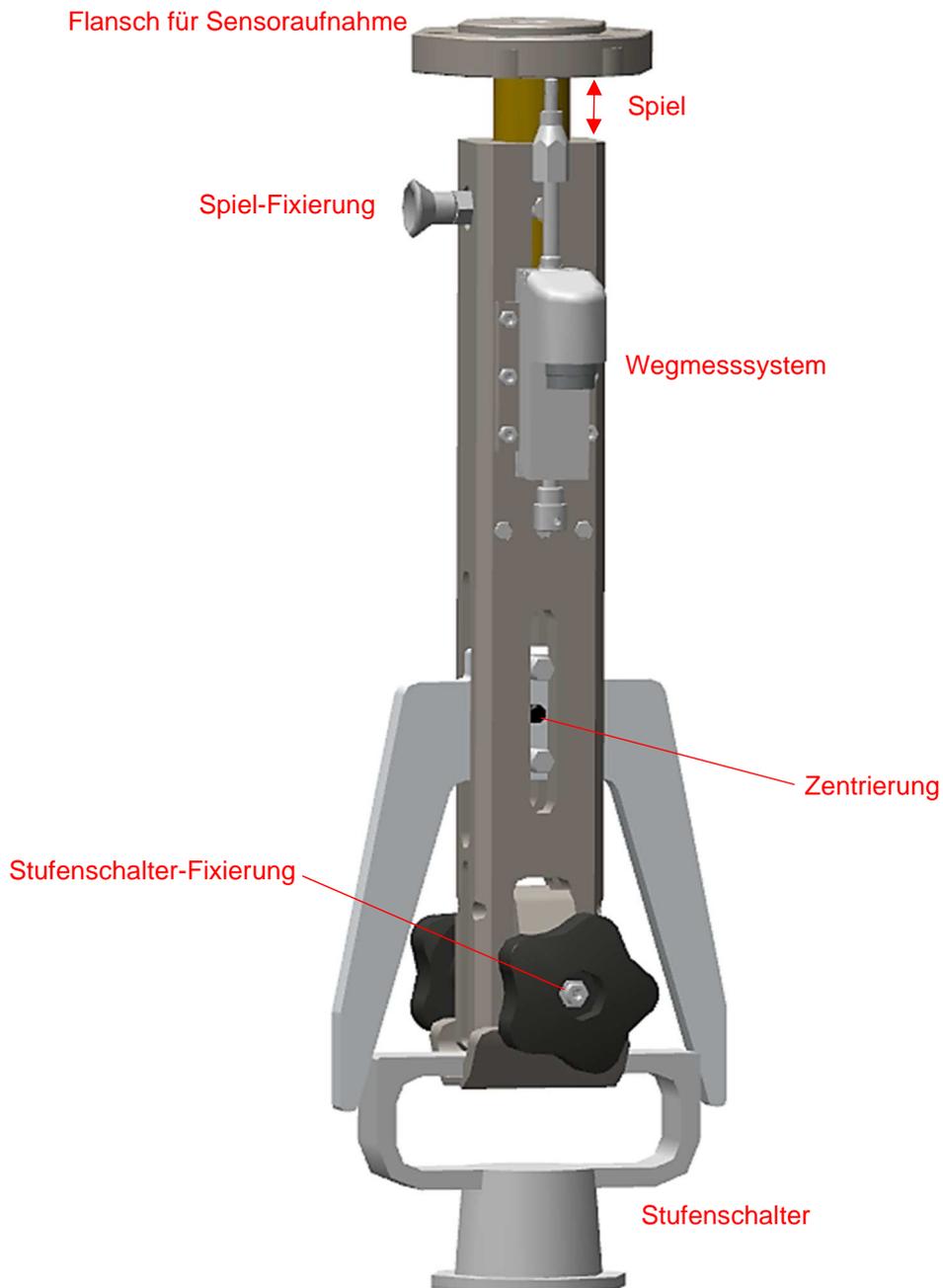


Abb. 46: Gesamtkonstruktion Stufenschalter-Aufnahmeeinrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2 Umschaltvorrichtung-Positionierung

Dieses Kapitel behandelt die Positionierung der Umschaltvorrichtung am Transformator-Deckel. Dabei sollen die verschiedenen Möglichkeiten evaluiert werden, um die Beste in Hinsicht auf Benutzerfreundlichkeit, Produktschonung und vor allem Betriebssicherheit zu eruieren.

Da die verschiedenen Transformatorentypen stark in ihrer Größe variieren und sich die Position des Stufenschalters am Deckel zwischen den Modellen ebenfalls unterscheidet, muss dieses System in allen drei Freiheitsgraden verstellbar sein. Dazu muss es eine hohe Steifigkeit gegen angreifende Momente aufweisen und in der Z-Achse fixiert werden können. Dies resultiert daher, dass für den Betrieb der Vorrichtung ein Vertikal-Hub sowie eine Drehbewegung notwendig sind. Diese Kräfte müssen vom Positionierungs-System aufgenommen werden. Dafür kommen drei Möglichkeiten in Frage:

- Handhabungseinrichtung: Roboterarm
- Deckenanbindung: Schienensystem
- Deckelanbindung: Positionierung am Deckel

Da eine Handhabungseinrichtung über Gelenke verfügt, die ohne zusätzliche Bremsen keine Momente aufnehmen können und die geforderte Steifigkeit eines solchen Systems nur mit enormer Überdimensionierung erreicht werden kann, wird diese Methode nicht weiterverfolgt.

6.3 Deckenanbindung

Da wie schon erwähnt der Platz am Deckel sehr begrenzt ist, bietet es sich an die Vorrichtung über eine Deckenanbindung über dem Deckel zu positionieren und mit Hilfe eines Schienensystems zu verstellen. Diese Methode hat auch den Vorteil, dass die Produktberührung minimiert wird und dadurch eventuelle Beschädigungen verhindert werden.

6.3.1 Realisierung der Deckenanbindung

In Abb. 47 wird nochmal veranschaulicht wie begrenzt der Platz für die Umschaltvorrichtung am Deckel ist. Es ist gut ersichtlich warum der Durchmesser der Vorrichtung bis zu einer bestimmten Höhe stark limitiert ist. Da es ähnliche Deckel mit noch höheren Ausdehnungsgefäßen gibt, ist die Länge der Vorrichtung bis zu den Linearmodulen entsprechend größer gewählt. Die Höhenverstellung erfolgt über einen zusätzlichen Antrieb, der sich an der gewünschten Position fixieren lässt. Die Verstellung der X- und Y-Achse wird über ein Kugelroll-Schienensystem an der Decke realisiert. Dieses ist in der Lage Momente aufzunehmen, wodurch kein Bremssystem benötigt wird. Sobald eine Vertikal-Kraft anliegt, zentriert sich das System von selbstständig. Jedoch fällt sofort die enorme Höhe der gesamten Vorrichtung auf. Dies führt zu zwei Problemen. Erstens ist es notwendig, dass die gesamte Vorrichtung sehr steif ist, damit sich diese nicht in sich verdreht und so den tatsächlich gefahrenen Drehwinkel verfälscht. Durch die konstruktiv bedingte enorme Höhe der Vorrichtung kann dies nicht ausreichend gewährleistet werden. Zweitens ist es, wie schon erwähnt, notwendig neben der Z-Achse auch die X- und Y-Achse zu verstellen. Dies erfolgt manuell über die Schienenführung. Wirkt nun am unteren Ende der Vorrichtung eine horizontale Kraft, führt dies zu einer Momentbelastung des Schienensystems. Da das Drehmoment das Produkt aus Kraft und Länge ist, bewirkt in dem hier dargestellten Fall selbst eine geringe Kraft ein hohes Moment. Bei Kugelroll-

Schienenwagen kann dies zu einen Kugelbruch führen. Deshalb muss die Gesamthöhe der Vorrichtung unbedingt verringert werden.

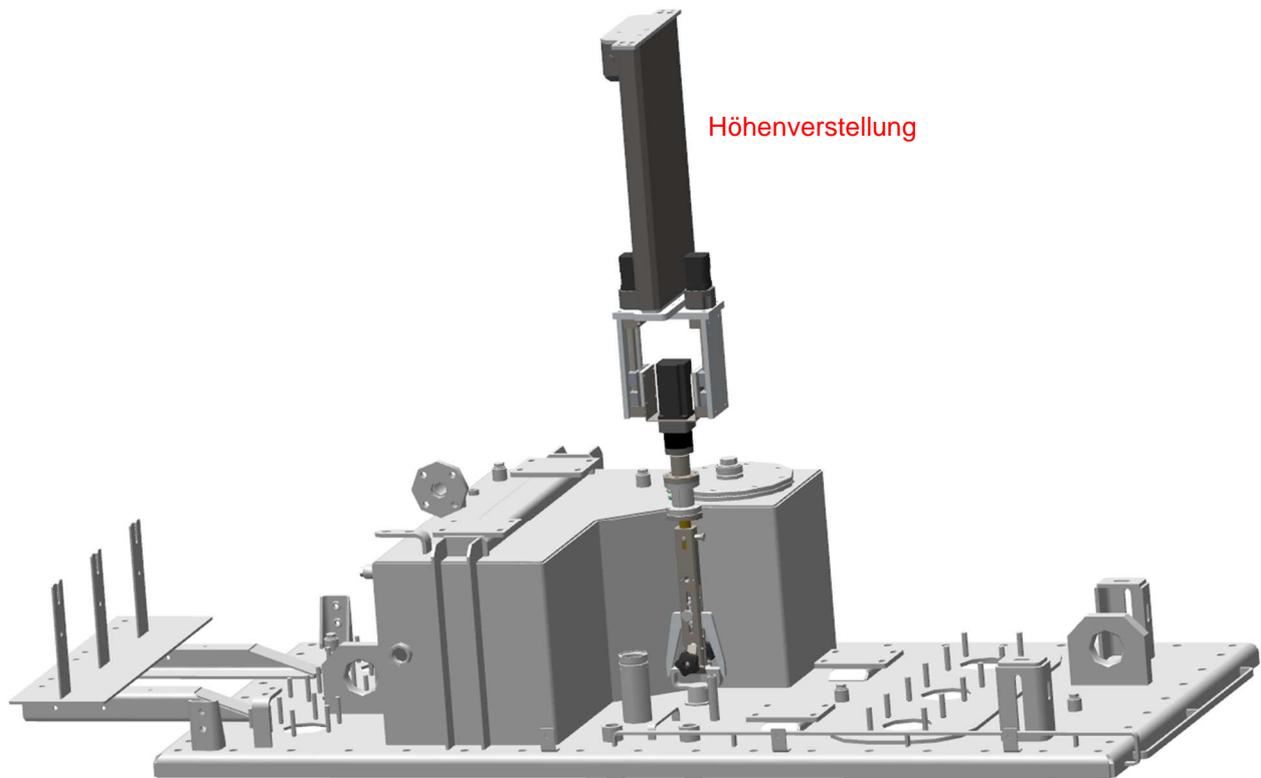


Abb. 47: Deckenanbindung-Umschaltvorrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.2 Realisierung der verkürzten Deckenanbindung

Um die Gesamthöhe der Vorrichtung zu verringern wird in Abb. 48 ein weiteres Konzept veranschaulicht. Hierbei erfolgt die Höhenverstellung seitlich und es wird auf der anderen Seite in einer Schienenführung gefahren. Die Verstellung der anderen beiden Freiheitsgrade erfolgt wieder über ein Schienensystem an der Decke. Dadurch kann die Vorrichtungshöhe um 200 mm verringert werden, bei gleichbleibender Höhenverstellung von 300 mm. Dies ist für die Anwendung zu gering, denn das bedeutet, dass die Höhe der unterschiedlichen Transformatoren-Aktivteile nur in diesem Bereich variieren darf. Dies ist jedoch nicht der Fall. Untersuchungen zeigen, dass mindestens die doppelte bis dreifache Höhenverstellung notwendig ist, um die gesamte Bandbreite der verschiedenen Transformatoren abzudecken. Dies hätte wiederum einen enormen Höhenzuwachs zur Folge, wodurch wieder die davor behandelten Probleme auftreten würden.

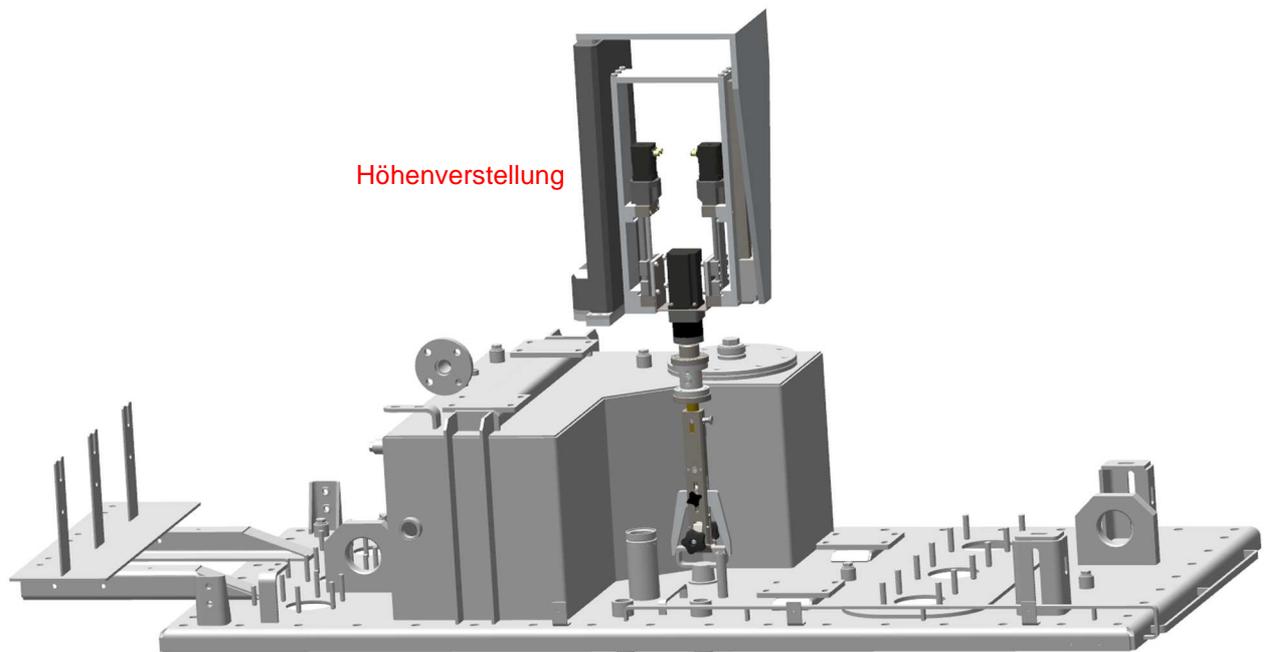


Abb. 48: Deckenanbindung Höhenreduktion, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4 Positionierung am Deckel

Da die Realisierung einer steifen Deckenanbindung schwierig umzusetzen ist und deren Positionierung mit vielen Problemen verbunden ist, wird nun ein weiteres Konzept betrachtet und evaluiert. Hierbei erfolgt die Anbindung und dadurch die Aufnahme der Kräfte nicht über ein Schienensystem an der Decke, sondern über den Transformatoren-Deckel selbst.

Durch die Deckelanbindung der Vorrichtung in Abb. 49 können die wesentlichen Probleme der Deckenanbindung ausgeschalten werden.

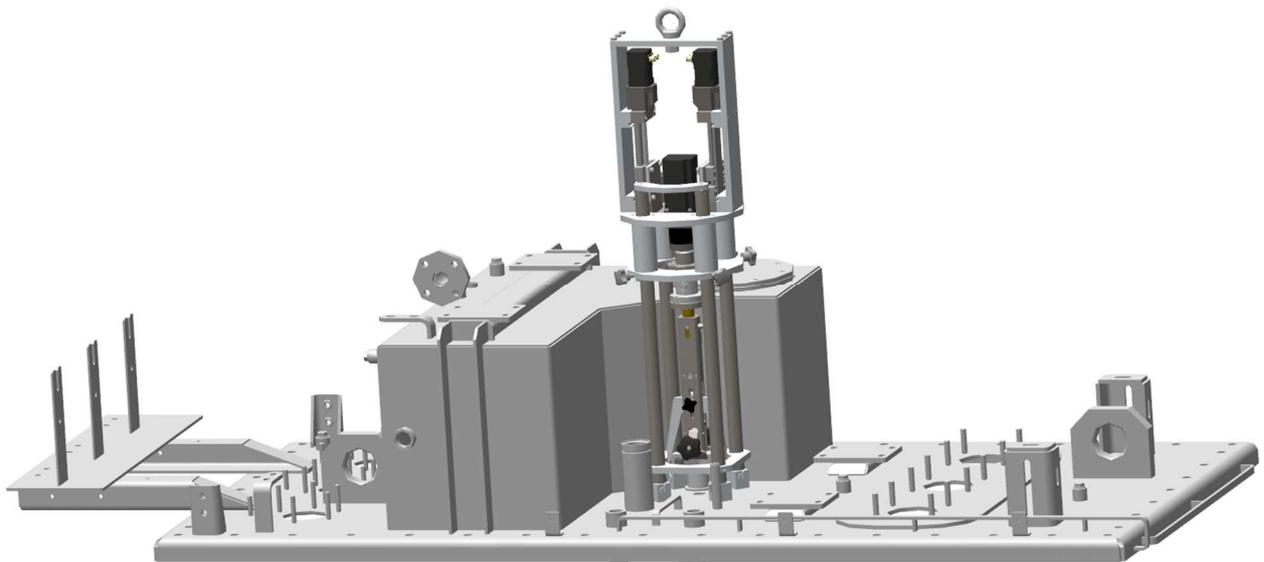


Abb. 49: Vorrichtung-Positionierung am Deckel, Quelle: Eigene Darstellung.

Hierbei werden Kraft und Moment nicht über ein Schienensystem an der Decke aufgenommen, sondern direkt über den Deckel abgeleitet. Dies führt zu einer sehr hohen Systemsteifigkeit. Da die Vorrichtung

direkt auf den Deckel gestellt wird, ist auch keine Höhenverstellung mehr notwendig. Die geringen Höhenunterschiede der Stufenschalter-Griffe können über das Spiel ausgeglichen werden. Diese Vorrichtung kann dann einfach, z.B. mit Hilfe des kleinen Schwenkkranes aus Abb. 1, auf den Deckel herabgelassen und nach der Verwendung wieder hochgezogen werden. Da diese Verbindung nur die Gewichtskraft der Vorrichtung während des Hebevorganges aufnehmen muss, kann dies mit einem einfachen Seil erfolgen. Die Nachteile bei diesem Konzept sind der erhöhte Platzbedarf am Deckel und die zusätzliche Produktberührung. Damit kann jedoch leichter umgegangen werden als bei den Konzepten mit Deckenanbindung, bei denen mit massiven physikalischen Problemen zu rechnen ist. Bei der Positionierung am Deckel kann ein Großteil dieser Probleme ausgeschaltet werden. Deshalb fällt die Entscheidung auf dieses Konzept.

6.4.1 Fixierung der Deckelanbindung

Wie schon erwähnt ist für den Schaltvorgang eine vertikale Kraft und ein Drehmoment notwendig. Die Kraft kann bei diesem Konzept vom Deckel aufgenommen werden, jedoch gibt es ein Problem mit dem Moment. Diesem steht nur die Reibungskraft zwischen den Vorrichtungsfüßen und Deckel entgegen, die sich folgendermaßen beschreiben lässt:

$F_R = F_N * \mu$	(6.1)	F_R/N	Reibungskraft
		F_N/N	Normalkraft
		$\mu/1$	Reibungszahl

Nun soll das Haltemoment bestimmt werden, den die Vorrichtung momentan aufbringt. Das Gesamtgewicht der Umschaltvorrichtung beträgt ca. 20 kg. Für den Radius ist nun der mittlere Kreis in Abb. 51 relevant. Dieser Kreis geht durch den Mittelpunkt der vier Vorrichtung-Beine und besitzt einen Radius von 87,3 mm. Dies wird für die Umrechnung von Kraft auf Moment benötigt. Der Reibungskoeffizient ist abhängig von der Oberfläche und wird mit 0,15 angenommen.

$F_N = m * g$	(6.2)	F_R/N	Reibungskraft
$F_N = 20 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}$		F_N/N	Normalkraft
$F_N = 196 \text{ N}$		$\mu/1$	Reibungskoeffizient
$F_R = F_N * \mu$	(6.3)	m/kg	Masse
$F_R = 196 \text{ N} * 0,15$		$g/\frac{m}{s}$	Erdbeschleunigung
$F_R = 29,43 \text{ N}$		M_H/Nm	Haltemoment
$M_H = F_R * R$	(6.4)	R/m	Radius
$M_H = 29,43 \text{ N} * 0,0873 \text{ m}$			

$$M_H = 2,57 \text{ Nm}$$

Die Vorrichtung kann also höchstens mit einem Drehmoment von 2,57 Nm belastet werden, bevor sie sich selbst zu drehen beginnt. Dies ist für die vorliegende Anwendung natürlich viel zu wenig. Die Untersuchungen der Stufenschalter aufgelistet in Tab. 2 haben ergeben, dass bis zu 8,1 Nm für den

Schaltvorgang benötigt werden. Da der Antrieb über eine Momentsteuerung verfügt und daher auf Anschlag fährt, wird das minimale Haltemoment mit 15 Nm spezifiziert.

Aus der Formel für die Reibungskraft (7.3) geht hervor, dass diese durch zwei Größen veränderbar ist. Der Reibungskoeffizient kann z.B. durch einen Anti-Rutsch-Belag an den Füßen erhöht werden. Jedoch da die Decklackierung variiert und mit Ölrückständen gerechnet werden muss, ist darauf kein Verlass. Eine Gewichtserhöhung ist ebenfalls nicht zweckgemäß, da die Vorrichtung dadurch unhandlich wird.

Eine Deckeigenschaft kann hierbei jedoch Abhilfe schaffen. Der Transformatoren-Deckel besteht aus Stahl, also ferromagnetischem Material. Dadurch ist es möglich Magnete zu verwenden, die die Normalkraft ohne zusätzliches Gewicht stark erhöhen. Diese müssen jedoch schaltbar sein, um die Vorrichtung positionieren zu können. Dies lässt sich mit zwei Bauarten realisieren:

- Elektromagnete
- Schaltbare Permanentmagnete

6.4.1.1 Elektromagnete

Elektromagnete bestehen aus einer Spule, die um einen Eisenkern gewickelt ist. Fließt nun Strom durch die Spule entsteht ein Magnetfeld, das durch den Eisenkern zusätzlich verstärkt wird. Der Vorteil dabei ist, dass damit im Regelfall wesentlich größere magnetische Feldstärken erzeugt werden können, als mit Permanentmagneten. Dadurch kann kompakter gebaut werden. Wird der Strom unterbrochen, nimmt die Feldstärke bis zu einem unbeachtlich kleinen Restmagnetismus ab. Dies ist für die beschriebene Anwendung auch der Nachteil dieser Bauform. Da im stromlosen Zustand keine Haltekraft aufgebracht werden kann, muss das Magnetsystem ständig versorgt werden. Dies erhöht den Stromverbrauch der Anlage und kann bei Fehlfunktion zum plötzlichen Verlust der Haltekraft und damit zu Beschädigungen führen.

6.4.1.2 Schaltbare Permanentmagneten

Ein sogenannter Magnetfuß besteht aus einem drehbaren Magnet zwischen zwei weiteren Magneten oder ferromagnetischem Material. Über einen Schalter kann der mittlere Magnet gedreht werden. Dadurch werden die magnetischen Feldlinien so umgeleitet, dass sie entweder über die Polschuhe austreten (eingeschalteter Zustand) oder nur intern fließen (ausgeschalteter Zustand). Der Vorteil dieser Technik ist, dass für das Aufbringen einer Haltekraft kein elektrischer Strom notwendig ist. Dadurch kann von einer Verkabelung abgesehen und es muss auch kein Haltekraftverlust bei Stromausfall befürchtet werden. Nachteilig speziell für diese Anwendung ist, dass das Ein- und Ausschalten der Magnete nicht über die Steuerung realisiert werden kann, sondern jeder der vier Magnete manuell geschaltet werden muss. Dies führt zu einem höheren Zeitaufwand und bietet keine Sicherheit gegen Bedienungsfehler. So könnte das Einschalten eines Magneten vergessen und dadurch die Haltekraft unzulässig reduziert werden.

6.4.1.3 Elektrisch schaltbare Permanentmagneten

Bei einer anderen Bauform kann dieses Problem beseitigt werden. Elektrisch schaltbare Permanentmagneten funktionieren im Prinzip genau umgekehrt, wie die davor behandelten Elektromagneten. Sie bestehen aus einem permanentmagnetischen Haftsytstem, das im stromlosen Zustand wirksam ist, und einer Erregerwicklung. Im eingeschalteten Zustand neutralisiert sich das

Magnetfeld, wodurch die Positionierung der Vorrichtung erfolgen kann. Dadurch werden die Vorteile von Permanentmagneten und Elektromagneten vereint. Die Haltekraft kann über die Steuerung geschaltet werden und ist gleichzeitig von der Stromversorgung unabhängig. Strom wird nur mehr zum Positionieren und Lösen der Vorrichtung benötigt. Ein großer Nachteil dieses Systems ist jedoch die Bauform. Da nun Permanentmagnet und Spule benötigt werden, fällt diese um einiges größer aus als bei den anderen zwei Arten.

6.4.1.4 Entscheidung und Auslegung

Da besonders der Einbauort der Magneten sehr platzkritisch ist und bei den Prototypen der zusätzliche Verkabelungsaufwand eingespart werden soll, fällt die Wahl auf manuell schaltbare Permanentmagneten. Bewährt sich jedoch der Einsatz von Magneten, so ist wegen den davor beschriebenen Vorteilen über den Einsatz von elektrisch schaltbarem Permanentmagneten nachzudenken.

Nun ist es aber notwendig die mindestens benötigte Haltekraft der einzelnen Magnete zu berechnen, um eine Auswahl treffen zu können. Wie schon erwähnt ist ein Haltemoment von mindestens 15 Nm für den sicheren Betrieb der Umschaltvorrichtung nötig. Davon können 2,57 Nm abgezogen werden, welche die Vorrichtung allein schon durch ihre Gewichtskraft aufbringt. Nun bleibt noch ein Drehmoment von 12,43 Nm übrig, das von insgesamt vier zur Anwendung kommenden Magneten gehalten werden muss. Jeder Magnet muss also mindestens ein Haltemoment von 3,11 Nm aufbringen. Dies muss zuerst in die Haltekraft (7.5) umgerechnet werden, die an den einzelnen Füßen horizontal anliegen muss, um das zentral am Adapter anliegende Drehmoment zu halten.

$F_H = \frac{M_H}{R}$	(6.5)	F_H/N	Haltekraft
		M_H/Nm	Haltemoment
$F_H = \frac{3,11 Nm}{0,0873 m}$		R/m	Radius
$F_H = 35,62 N$		F_{AM}/N	Anziehungskraft Magnet
$F_{AM} = \frac{F_H}{\mu}$	(6.6)	$\mu/1$	Reibungskoeffizient

$$F_{AM} = \frac{35,62 N}{0,15}$$

$$F_{AM} = 237,5 N$$

Danach kann über den Reibungskoeffizienten die mindestens benötigte Anziehungskraft (7.6) der einzelnen Magnete bestimmt werden. Der Reibungskoeffizient ist wieder auf 0,15 festgelegt, was ungefähr dem Reibwert von Metall auf Metall bzw. Metall auf lackiertem Metall bei leichten Ölrückständen entspricht. Dies scheint für die Anwendung am plausibelsten. Die ausgewählten Magnete in Abb. 50 besitzen eine Anziehungskraft von 320 N, wodurch noch Reserven für eventuelle geringere Reibwerte vorhanden sind.

6.4.2 Konstruktion der Vorrichtung

Die Abb. 50 zeigt die Gesamtkonstruktion des davor behandelten Konzeptes der Deckelanbindung.



Abb. 50: Vorrichtung Deckelanbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Es fällt sofort auf, dass nun die beiden Linearmodule beidseitig verbunden sind. Dies ist notwendig, da im oberen Bereich ein Hebepunkt vorgesehen ist, um die Vorrichtung später auf den Deckel zu positionieren. Im Kapitel 4.3 wird davon aus den dort beschriebenen Gründen aber abgeraten. Deshalb kommen Passschrauben zur Anwendung, die bei größerer Bohrung als deren Passung für den notwendigen Spielausgleich sorgen. Über die vier Sterngriffschrauben erfolgt die Grobeinstellung der Höhe. Dies sollte jedoch nur selten zur Anwendung kommen, da in den meisten Fällen das Vertikal-Spiel (in Gelb dargestellt) ausreicht. Ebenfalls höhenverstellbar ist der Verbindungsring. Dieser sorgt für zusätzliche Stabilität und kann bei Bedarf angehoben werden. Dies kann nötig werden, wenn sich ein Aufbauteil am Deckel zwischen den Vorrichtungsfüßen befindet. Da der Verbindungsring im platzkritischen Bereich liegt, ist für Sterngriffschrauben kein Platz, wodurch eine Verstellung nur mit Werkzeug erfolgen kann. Dies ist jedoch nur selten notwendig.

Nun gilt es aber zu überprüfen ob die in Abb. 16 spezifizierten Maße eingehalten werden können. Die Höhe vom Stufenschalter bis zu den oberen Sterngriffschrauben darf höchstens 380 mm betragen, da ab diesem Punkt der maximal zulässige Durchmesser überschritten wird. Dies kann eingehalten werden.

Der kritische Teil liegt jedoch unter dieser Marke. Hier müssen alle Bauteile innerhalb eines Radius von 112,5 mm liegen. Der äußerste grüne Kreis in Abb. 51 mit einem Radius von ca. 111 mm ist der Verbindungsring der Vorrichtung-Beine und liegt knapp unter diesem Wert. Im mittleren Kreis sind die Beine selbst eingeschlossen. Es ist wichtig, dass dieser noch kleiner ist, da die Schweißnaht zwischen Deckel und Ausdehnungsgefäß noch Platz in Anspruch nimmt. Auch dies wird hier erfüllt. Es fällt aber auf, dass die benötigten Werte nur sehr knapp eingehalten werden. Es ist anzumerken, dass bei der Bemaßung in Abb. 16 jegliche Toleranzen schon berücksichtigt sind.

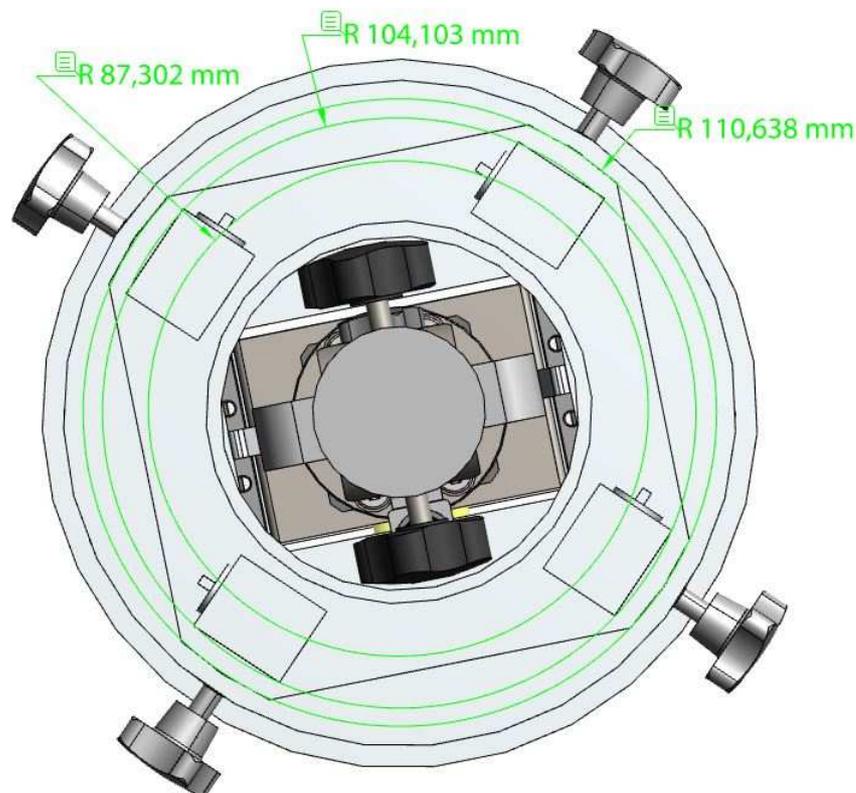


Abb. 51: Vorrichtung-Bemaßung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.3 Prototyp

In Abb. 52 ist der Prototyp der Umschaltvorrichtung ersichtlich. Dieser hängt am Kran über der Messzelle und kann bei Bedarf auf dem Transformatoren-Deckel positioniert und am Stufenschalter fixiert werden. Nach diesem Prinzip soll später die Vorbereitung der automatisierten Vormessung durchgeführt werden. Solange die Umschaltvorrichtung nicht benötigt wird, hängt sie über der Messzelle. Bei einer Messung wird sie auf den Transformator herabgelassen und bei Beendigung der Vormessung wieder hochgehoben. Dies wird mit einem eigenen kleinen Schwenkkran realisiert, der dann fix mit dem Hebepunkt der Vorrichtung verbunden ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Vorrichtung bei Erschütterungen nicht vom Transformator fällt. Ebenfalls muss die Kabelführung noch überdacht werden, speziell die der Sensorik auf beweglichen Teilen.

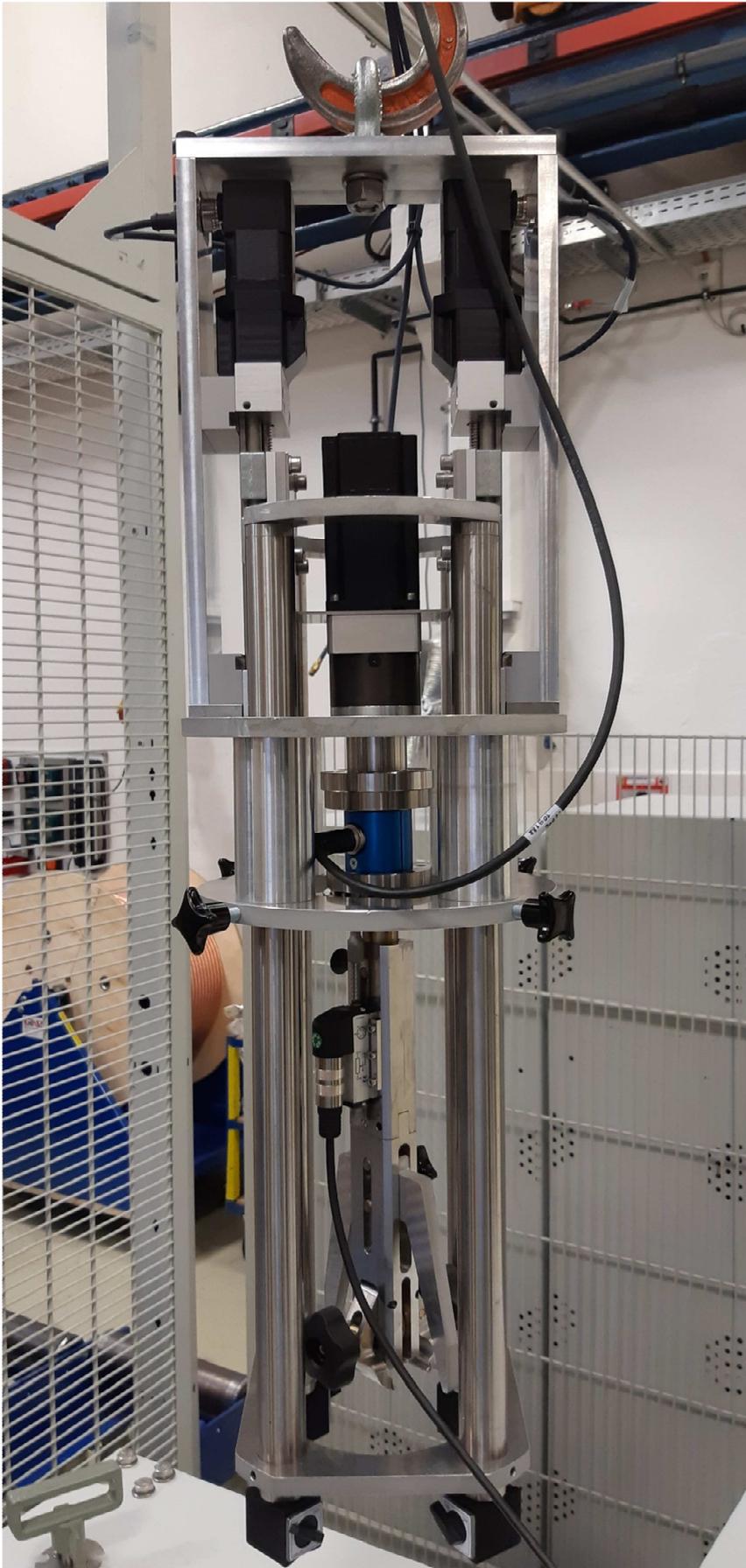


Abb. 52: Prototyp Stufenschalter-Umschaltvorrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5 Prüfanlage

In diesem Kapitel geht es um die Errichtung einer automatisierungsgerechten Umgebung für die Transformatoren-Vormessung. Da das Einsparungspotenzial, in Tab. 1 ersichtlich, nur durch die Abwesenheit von Personal erreicht wird, gibt es gewisse Anforderungen an die Prüfanlage. Damit befasst sich die Norm DIN EN 50191. Nach dieser Norm soll die Prüfanlage errichtet werden.

6.5.1 Prüfanlage ohne Anwesenheit von Prüfpersonal

Da die Prüfung nicht von Personal beaufsichtigt wird, ist der Punkt „Prüfanlagen ohne Anwesenheit von Prüfpersonal“ in der Norm zu beachten. Hier wird entweder nach einem Prüfplatz mit zwangsläufigem Berührungsschutz oder nach der Errichtung eines Prüffeldes verlangt. Außerdem bedarf es der Realisierung einer NOT-AUS-Einrichtung mit einer ausreichenden Anzahl von manuellen Betätigungseinrichtungen.³¹

6.5.2 Prüffeld

Bei Prüffeldern sind die Anforderungen geringer als bei einem Prüfplatz mit zwangsläufigem Berührungsschutz. Insbesondere bei Prüfspannungen bis 1000 V dürfen Abgrenzungen auch aus Bändern, Seilen, Ketten und Leisten bestehen, solange bestimmte Abstände zum Boden eingehalten werden.³²

Da bei der Vormessung keine höheren Spannungen auftreten, wäre dies eine Möglichkeit. Jedoch gibt es hierbei ein Problem. Arbeiten in Prüffeldern dürfen nur unter Aufsicht des Arbeitsverantwortlichen durchgeführt werden.³³ Dadurch würde für jegliche Vor- und Nachbereitungsaufgaben die Anwesenheit zusätzlichen Personals notwendig sein, was sich negativ auf die Mitarbeiter-Zeiterparnis auswirkt.

6.5.3 Prüfplatz mit zwangsläufigen Berührungsschutz

In Prüfplätzen mit zwangsläufigen Berührungsschutz darf sich elektrotechnisch unterwiesenes Personal auch ohne Aufsicht eines Arbeitsverantwortlichen aufhalten. Dies verlangt nach zusätzlichen Maßnahmen, um deren Sicherheit zu gewährleisten. So muss für einen Schutz gegen direktes Berühren spannungsführender Teile gesorgt sein. Dies kann entweder durch Isolierung, Abdeckung oder ein Gehäuse mit einer Mindestschutzart von IP3X ausgeführt sein oder durch Wände bzw. Gitter. Diese müssen jedoch mindestens 1800 mm hoch sein und dürfen über keine größeren Öffnungen als 40 mm verfügen. Des Weiteren darf das Öffnen von Zugängen erst möglich sein, wenn keine Prüfspannung mehr anliegt bzw. muss das Öffnen der Prüfeinrichtung die Prüfspannung zwangsläufig ausschalten. Nur wenn alle Zugänge geschlossen sind darf die Prüfung starten. Ein weiterer Punkt betrifft den Abbau von Restspannungen. Dies ist gerade in diesen spezifischen Fall interessant, da beim Prüfen von

³¹ Vgl. DIN EN 50191 (2011), S. 13.

³² Vgl. DIN EN 50191 (2011), S. 12.

³³ Vgl. DIN EN 50191 (2011), S. 15.

Transformatoren-Aktivteilen, nach dem Abschalten noch immer Spannung vorhanden ist. Diese muss bis zum Erreichen der aktiven Teile auf einen ungefährlichen Wert abgebaut werden.³⁴

6.5.4 Realisierung

In der Einleitung in Kapitel 1.5 wird schon kurz das Umfeld behandelt. Daraus geht hervor, dass nicht eine komplett neue Prüfwelle errichtet werden muss, sondern die bestehende entsprechend adaptiert werden kann. Abb. 1 zeigt ein Bild der Prüfanlage, die in Abb. 53 in Übersicht skizziert ist. Aktuell ist der Prüfplatz schon von drei Seiten normkonform abgeriegelt. Die dem Fertigungsband zugewandte Seite mit einem Schiebegeritter, die rechte Seite mit einem festen Gitter und die linke Seite mit der Hebebühne und der darin integrierten Schiebetür. Die Gitter und Schiebetüren sind schon normkonform ausgeführt.

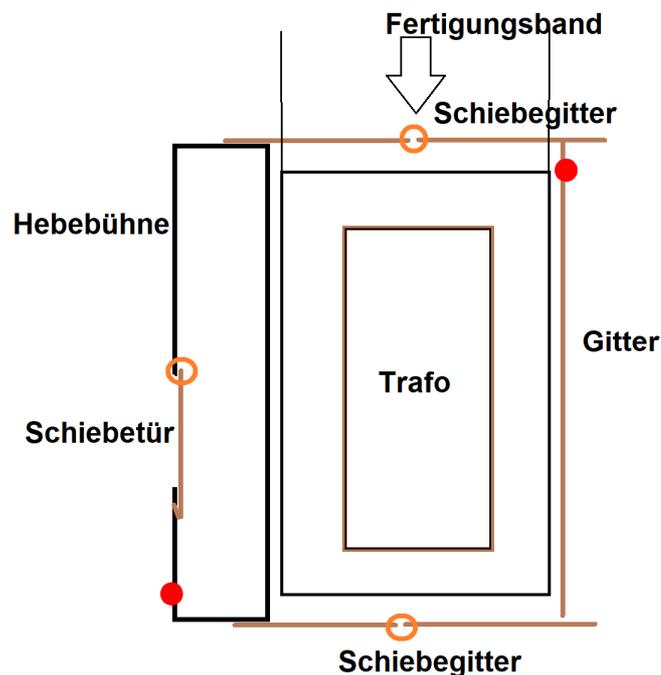


Abb. 53: Skizze des Prüfplatzes, Quelle: Eigene Darstellung.

Im vorderen Bereich fehlt jedoch noch eine entsprechende Absicherung. Da dies das Ende der Fertigungslinie ist und von dort aus die Aktivteile abtransportiert werden, muss auch diese Stelle zugänglich sein. Darum ist hier ebenfalls ein Schiebegeritter angedacht. Weiters fehlt noch die Überwachung der drei Zugänge. Wie schon erwähnt, muss deren Zustand jederzeit überwacht werden. Dazu dienen Kontakte, die sobald betätigt, die Prüfung abrechnen und die Entladung der Wicklungen einleiten. Da die Kontakte als Öffner ausgeführt sind, bewirkt auch ein Kabelbruch dasselbe wie eine Betätigung. Die verwendete Messbrücke Tettex Winding Analyser 2293 besitzt schon eine NOT-AUS-Einrichtung inklusive manueller Betätigungseinrichtung. Die Kontakte, die in Abb. 53 orange eingezeichnet sind, werden zusammen mit den rot eingezeichneten zusätzlichen Betätigungsschaltern seriell dazugeschaltet. Damit ist gewährleistet, dass bei einer Betätigung der NOT-AUS-Taster oder beim Öffnen eines Zuganges während der Messung, nicht nur spannungslos geschaltet wird, sondern die Wicklungen auch entladen werden.

³⁴ Vgl. DIN EN 50191 (2011), S. 11.

7 STEUERUNGSTECHNIK

In diesem Kapitel geht es um die Auswahl der geeigneten Steuerungstechnik und die Programmierung der Anlage. Diese wird in einem Versuchsaufbau getestet, um aus diesen Erkenntnissen ein störungssicheres Programm zu entwickeln.

7.1 Speicherprogrammierbare Steuerung

Da sich die Vormessung in einer industriellen Umgebung befindet und mit elektromagnetischen Störungen zu rechnen ist, kommt eine SPS zum Einsatz. Die Vorteile, die für eine speicherprogrammierbare Steuerung für diese Anwendung sprechen sind folgende:

- Betriebssicherheit
- Flexibilität
- Geringer Platzbedarf
- Schnelle Fehleranalyse

Es gibt viele verschiedene Hersteller für solche Steuerungen, wie z.B. B&R, Rockwell und Beckhoff. Da diese Arbeit aber für Siemens verfasst wird, erfolgt die Umsetzung mit einer Simatic S7 SPS. Siemens ist zumindest auf dem europäischen Markt eindeutiger Marktführer, was die Auswahl zusätzlich rechtfertigt.

7.2 Hardware-Auswahl

Eine SPS besteht aus einer CPU und modular erweiterbaren Ein- und Ausgangsmodulen, wodurch sie einfach an die gegebenen Anforderungen angepasst werden kann. Deshalb ist es nötig vor der Auswahl der geeigneten SPS die erforderlichen Ein- und Ausgänge festzulegen.

7.2.1 Analog-Eingänge

Die physikalischen Messgrößen an den Sensoren werden über die zur Anwendung kommenden Messverstärker in Stromsignale umgewandelt, welche dann von der SPS verarbeitet werden können. Diese sind in Tab. 5 aufgelistet. Um die eingesetzten Sensoren auswerten zu können, sind also drei analoge Stromeingänge notwendig.

Sensor	Physikalischer Messbereich	Analog-Ausgang
Mehrkomponenten-Sensor Kraftausgang	± 500 N	4-20 mA
Mehrkomponenten-Sensor Momentausgang	± 15 Nm	4-20 mA
Potenzimeter-Wegsensor	0-25 mm	4-20 mA

Tab. 5: Benötigte Analog-Eingänge, Quelle: Eigene Darstellung.

7.2.2 Analog-Ausgänge

Analoge Ausgänge sind in der Lage bestimmte Spannungs- und Stromsignale auszugeben und dadurch z.B. ein Proportionalventil zu steuern. In dieser Anwendung werden sie für die in Kapitel 7.7 beschriebenen Versuche benötigt, um über die SPS das Stromsignal der Messverstärker in ein Spannungssignal

umzuwandeln. Dieses kann dann über die analogen Eingänge der Motorsteuerung D1 in Tab. 6 eingelesen und visualisiert werden.

Aktor	Physikalischer Messbereich	Analog-Eingang
Motorsteuerung D1, Analogeingang 1	-500 N	0-10 V
Motorsteuerung D1, Analogeingang 2	+15 Nm	0-10 V

Tab. 6: Benötigte Analog-Ausgänge, Quelle: eigene Darstellung.

7.2.3 Digital-Eingänge

Digitale Eingänge können nur die Zustände Ein oder Aus annehmen. Die Tab. 7 und Tab. 8 beinhalten alle für die Anwendung benötigten Sensoren, die einen digitalen Eingang benötigen.

Sensor	Digital-Eingang
Messbrücken-Ausgang: Aufwärts schalten	24 V
Messbrücken-Ausgang: Abwärts schalten	24 V
Taster Initialisieren	24 V
Taster Abbruch	24 V
Linearmodul Endschalter 1	24 V
Linearmodul Endschalter 2	24 V
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 1 (N)	24 V
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 2 (N)	24 V
Inkrementalgeber Getriebemotor (N)	24 V

Tab. 7: Benötigte Digital-Eingänge, Quelle: eigene Darstellung.

In Kapitel 2.5.1 werden die Ausgänge der Messbrücke behandelt. Daraus geht hervor, dass je ein Eingang für das Ab- und Aufwärtsschalten des Stufenschalters vorhanden sein muss. Zusätzlich werden noch Eingänge für die Realisierung eines Abbruchs- und Initialisierungstasters benötigt. Zwei weitere digitale Eingänge werden für die beiden Endschalter des Linearmoduls benötigt. Auf die Endschalter des zweiten Linearmoduls kann verzichtet werden, da die beiden Module fest miteinander verbunden sind.

Sensor	HSC-Eingang
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 1 (A)	24 V
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 1 (B)	24 V
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 2 (A)	24 V
Inkrementalgeber Linearantriebsmotor 2 (B)	24 V
Inkrementalgeber Getriebemotor (A)	24 V
Inkrementalgeber Getriebemotor (B)	24 V

Tab. 8: Benötigte High-Speed-Counter-Eingänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Pro Inkrementalgeber sind drei Eingänge erforderlich. Zwei für die phasenversetzten Taktgeber A und B und ein Rücksetzeingang N. Hierbei ist zu beachten, dass die Taktgeber-Eingänge für hohe Frequenzen geeignet sein müssen, sogenannte High-Speed-Counter-Eingänge. Insgesamt werden also 9 digitale Eingänge und 6 HSC-Eingänge benötigt.

7.2.4 Digital-Ausgänge

Digitale Ausgänge liefern entweder ein Ein- oder ein Aus-Signal. Die Tab. 9 und Tab. 10 beinhalten alle für die Anwendung benötigten Aktoren, die über einen digitalen Ausgang gesteuert werden.

Aktor	Digital-Ausgang
Relais Feedback-Signal	24 V
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 1 Freigabe	24 V
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 1 Richtung	24 V
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 2 Freigabe	24 V
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 2 Richtung	24 V
Getriebeantrieb-Schrittmotortreiber Freigabe	24 V
Getriebeantrieb-Schrittmotortreiber Richtung	24 V

Tab. 9: Benötigte Digital-Ausgänge, Quelle: eigene Darstellung.

Aktor	Impuls-Ausgang
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 1 (Icus D1) Impuls	24 V
Linearantrieb-Schrittmotortreiber 2 (Icus D1) Impuls	24 V
Getriebeantrieb-Schrittmotortreiber (Icus D1) Impuls	24 V

Tab. 10: Benötigte Pulse-Train-Outputs, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus Kapitel 2.5.1 geht ebenfalls hervor, dass fürs Starten der nächsten Messung ein Feedback-Signal notwendig ist. Dafür liefert die Messbrücke ein 3,3 V Signal und wartet auf das zurückkommende Signal, um zu bestätigen, dass der Schalt-Vorgang abgeschlossen ist. Da die SPS aber 24 V am Ausgang bereitstellt, wird dies über ein zusätzliches Relais realisiert. Für die drei Treiber der Schrittmotoren wird jeweils ein Freigabe-, Impuls- und Richtungsausgang benötigt. Hierbei ist zu beachten, dass die Impulsausgänge hohe Frequenzen liefern müssen. Dies ist mit sogenannten Pulse-Train-Outputs (PTO) möglich. Es sind also insgesamt sieben digitale Ausgänge und drei PTOs erforderlich.

7.2.5 CPU Auswahl

Es gibt eine große Anzahl verschiedener Modelle der Simatic S7 Steuerung. Dazu zählen u.a. die älteren 200er, 300er und 400er Baureihen, die noch weit verbreitet sind. Die neueste Generation sind jedoch die 1200er und 1500er Modelle. Dabei ist die 1200er eine Kleinststeuerung mit eingeschränkter Funktionalität und die 1500er die High-End-Variante. Beide werden mit der Programmiersoftware von Siemens, dem TIA-Portal, projektiert. Bei der Programmierung der 1200er Baureihe stehen jedoch nicht alle Funktionalitäten zur Verfügung. Dies gestaltet z.B. das Skalieren von analogen Signalen schwieriger und speziell bei den Motion-Control-Bausteinen bietet die 1500er Steuerung mehr Möglichkeiten. Da das beforschte Projekt große Anforderungen in diesem Bereich stellt, fällt die Entscheidung auf eine 1500er Baureihe.

Für diese Baureihe gibt es Kompakt-CPU's, die sehr interessant für diese Anwendung sind, da sie bereits technologische Funktionen integriert haben und über On-Board-Peripherie verfügen. Davon gibt es zwei in der Leistung abgestufte Systeme, die in Tab. 11 gegenübergestellt sind.

Diese unterscheiden sich in zwei relevanten Punkten, den Programm-Arbeitsspeicher und der Anzahl der integrierten Ein- und Ausgänge. Der Arbeitsspeicher ist ein Maß für die Programmgröße. Desto größer er ist, desto aufwendiger kann das Programm sein, das in die CPU eingespielt wird. Für die vorliegende Anwendung reichen die 175 KByte der schwächeren Version aber vollkommen aus. Ein weiterer Unterschied sind die zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgänge. Hierbei hat die CPU 1512C doppelt so viele integriert wie die abgestufte Version. Die Auflistung der zur Anwendung kommenden Sensoren und Aktoren in den Tab. 5 bis 10 zeigt aber, dass die 16 digitalen Ein- und Ausgänge der 1511C ausreichen. Über die Eingänge dieser Kompakt-CPU's lassen sich bis zu sechs schnelle Zähler (HSC) realisieren, die für Frequenzen von bis zu 100 kHz geeignet sind. Diese werden für die Inkrementalgeber der Motoren benötigt. Über die vier schnellen PTO-Ausgänge können Schrittmotoren angesteuert werden.

Es sind auch fünf analoge Eingänge vorhanden, wovon vier für Strom- oder Spannungsmessung verwendet werden können. Ebenfalls finden die zwei analogen Ausgänge Anwendung. Die CPU 1511C1-PN ist also aus technischer und kommerzieller Sichtweise die ideale Steuerung für diese Anwendung.

Merkmale	CPU 1511C-1 PN	CPU 1512C-1 PN
Arbeitsspeicher für Programm	175 KByte	250 KByte
Integrierte Ein-/Ausgänge		
Digitale Eingänge (integriert)	16	32
Digitale Ausgänge (integriert)	16	32
Analoge Eingänge (integriert)	5 (4 x U/I, 1 x RTD)	5 (4 x U/I, 1 x RTD)
Analoge Ausgänge (integriert)	2	2
Integrierte Schnittstellen		
PROFINET IO IRT	1 x PN IO IRT (2-Port Switch)	1 x PN IO IRT (2-Port Switch)
Webserver	Ja	Ja
Integrierte technologische Funktionen		
Schnelle Zähler (HSC)	6 (max. 100 kHz)	6 (max. 100 kHz)
Frequenzmesser	6 (max. 100 kHz)	6 (max. 100 kHz)
Periodendauermessung	6 Kanäle	6 Kanäle
PTO (Schrittmotorensteuerung), PWM (Pulsweitenmodulation), Frequenzausgabe	4 Kanäle (max. 100 kHz)	4 Kanäle (max. 100 kHz)

Tab. 11: Kompakt-CPU Systemübersicht, Quelle: Siemens AG (2017), S. 50.

7.3 Versuchsaufbau

Um die Ansteuerung der Umschaltvorrichtung testen zu können, ist die Realisierung eines Versuchsaufbaues notwendig. Hierfür dient ein Testdeckel mit vier Stufenschaltern, die sich zwar in ihrer Bauform unterscheiden, jedoch über das gleiche Funktionsprinzip aus Kapitel 3.3 verfügen. Drei davon können mit dem verwendeten Adapter geschaltet werden. Für den roten Schalter in Abb. 54 ist ein anderer Adapter notwendig. Bei dem Versuchsaufbau erfolgen die Schaltvorgänge genauso wie bei der Aktivteil-Vormessung nicht unter Öl, weshalb ein Testen unter Realbedingungen möglich ist. Beim Versuchsaufbau zeigt sich, dass der Prototyp einfach und schnell auf dem Stufenschalter fixiert werden kann.

Bei der Verdrahtung der Bauteile in Abb. 55 ist darauf zu achten, dass die digitalen Ein- und Ausgänge der Simatic Steuerung und die Schrittmotor-Treiber dasselbe Bezugspotenzial besitzen, damit sie miteinander kommunizieren können. Deshalb werden diese zusammen mit den Messverstärkern vom selben Murr-Schaltnetzteil versorgt. Nur die Simatic-CPU wird von einem separaten Netzgerät bestromt.

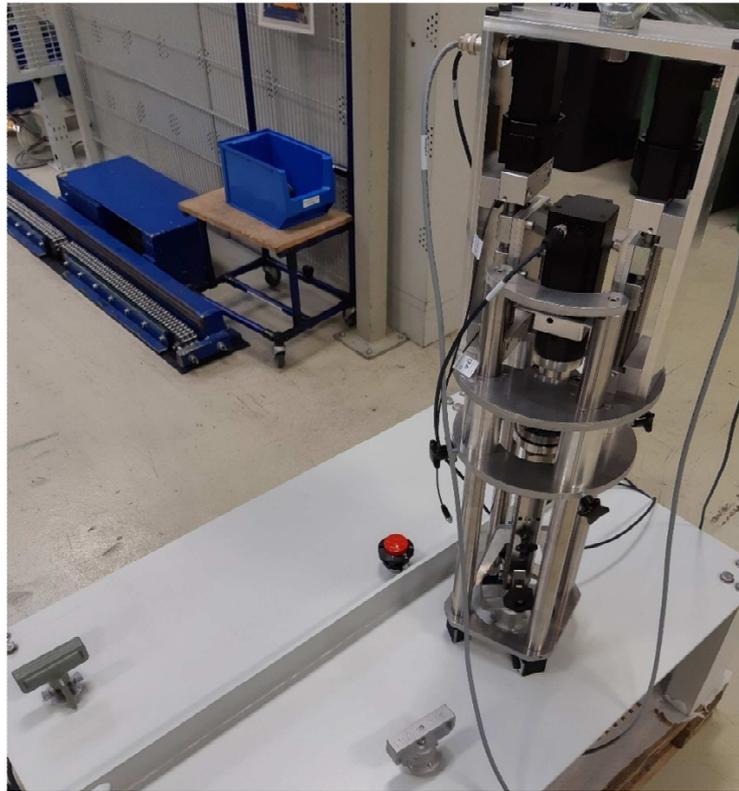


Abb. 54: Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Taster simulieren die digitalen Ausgänge der Vormessbrücke. Je einen für Auf- und Abwärtsschalten, einen für die Initialisierung und einen Abbruchtaster. Eine LED-Leuchte simuliert den digitalen Feedback-Eingang der Messbrücke und eine weitere dient als Störungsleuchte.

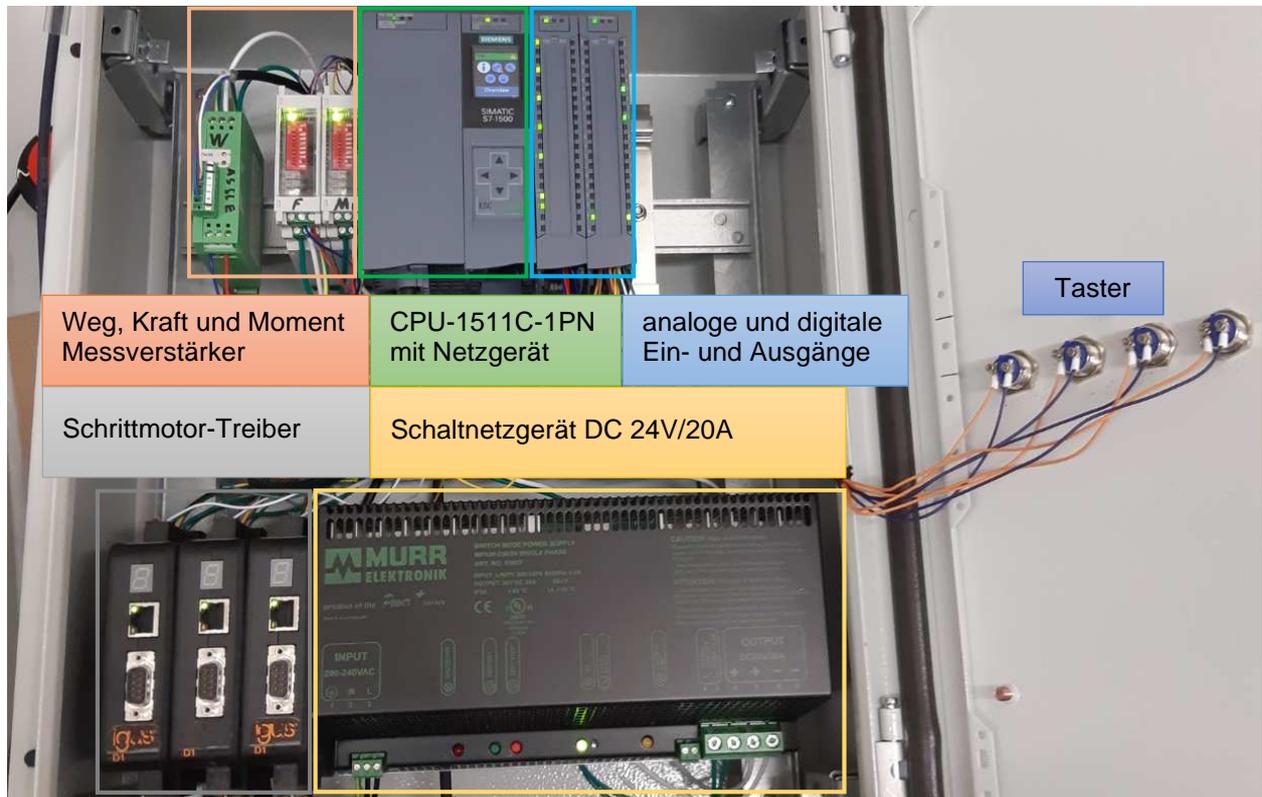


Abb. 55: Aufbau Verteilerschrank, Quelle: Eigene Darstellung.

7.4 Motion-Control-Bausteine

Für die Erstellung des SPS-Programmes wird die Programmiersprache FUP gewählt. In TIA Portal stehen eine große Auswahl von Motion-Control-Bausteinen zur Auswahl, die speziell für Schritt- und Servomotoren eine Vielzahl verschiedener Ansteuerungsmöglichkeiten bieten. Die wichtigsten Bausteine für die spezifische Anwendung sind in Abb. 56 aufgelistet.

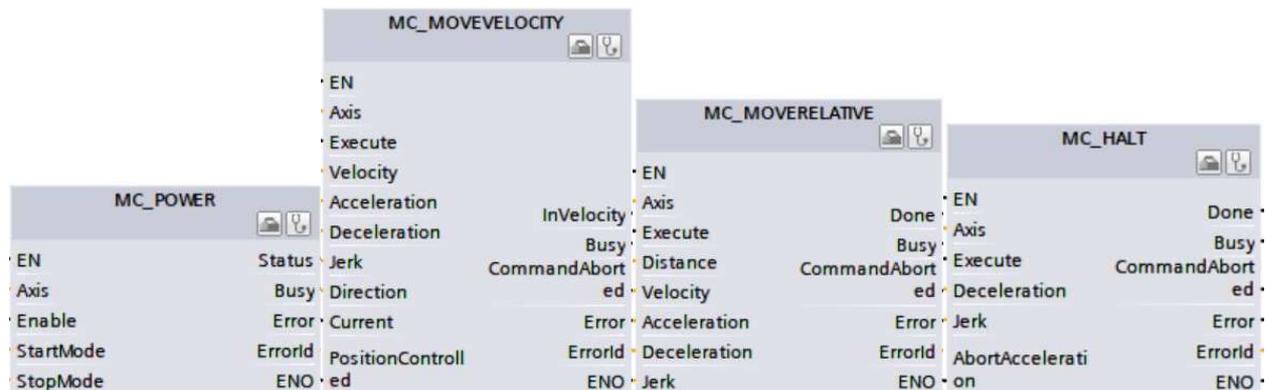


Abb. 56: Motion-Control-Bausteine; Quelle: Eigene Darstellung.

Mit der Motion-Control-Anweisung „POWER“ wird ein Technologieobjekt über den Parameter „Enable“ freigegeben (TRUE) oder gesperrt (FALSE). Der aktuelle Zustand wird am Parameter „Status“ ausgegeben. Das Sperren während eines Bewegungsauftrages bewirkt dessen Abbruch. Zu beachten ist, dass sobald ein Schrittmotor freigegeben wird, er bereits ein Haltemoment aufbringt. Mit dem MOVEVELOCITY-Baustein wird die Achse mit konstant eingestellter Geschwindigkeit bewegt. Ein Stillstand ist mit der Wegnahme der Freigabe (POWER) oder über den HALT-Baustein möglich. Eine weitere wichtige Anweisung ist „MOVERELATIVE“. Damit wird eine Achse relativ zu ihrer Position verfahren. Die Relativbewegung kann entweder in Grad bei rotierenden Antrieben oder mit einer Wegvorgabe bei Linearantrieben eingestellt werden. Am Parameter „Done“ wird ein „TRUE“ ausgegeben, sobald die Zielposition erreicht wird. Die Parameter Beschleunigung, Geschwindigkeit, Verzögerung und Ruck können direkt an den Bausteinen konfiguriert werden. Wird dies unterlassen, so werden die Einstellungen im Technologieobjekt übernommen.

Da für die Anwendung zwei miteinander verbundene Linearantriebe verwendet werden, ist es notwendig diese synchron zu betreiben. Dafür gibt es den Motion-Control-Baustein GEARIN. Damit ist es möglich einen Gleichlauf zwischen einer Leit- und einer Folgeachse zu realisieren. In Abb. 57 ist dessen Umsetzung mit dem entsprechenden Baustein ersichtlich.

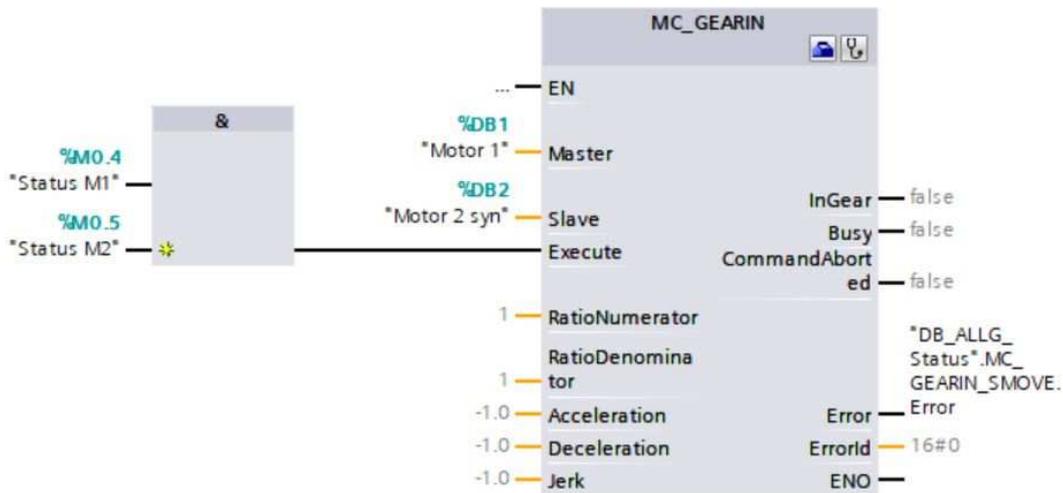


Abb. 57: Gleichlauf-Baustein GEARIN, Quelle: Eigene Darstellung.

Am Parameter „Execute“ wird der Auftrag gestartet sobald beide Motoren freigegeben sind. Ab dann synchronisiert sich die Folgeachse (Slave) zur Leitachse (Master). Zu beachten ist, dass als Folgeachse nur das Technologieobjekt „Gleichlaufachse“ verwendet werden kann. Außerdem ist es sehr wichtig, dass ein TRUE am Parameter „Error“ sofort die Freigabe der beiden Achsen wegnimmt. Da dies bedeutet, dass der Auftrag abgewiesen wird, kann es sonst passieren, dass sich nur die Master-Achse bewegt, was bei der beschriebenen Anwendung zu Beschädigung der Vorrichtung führen kann.

7.5 Handbetrieb

Um die Reaktion des Stufenschalters auf das Schaltkonzept aus Kapitel 6.1.2 zu testen, wird zuerst ein Handbetrieb der Vorrichtung realisiert. Hierbei dienen zwei Taster zum Auf- und Abwärtsfahren der Linearmodule und die beiden anderen zum Links- und Rechtsdrehen des Getriebemotors. Ebenfalls kann dadurch überprüft werden ob die Auslegung der Motoren und Magnete für die Anwendung ausreicht. Durch die Lackierung erhöht sich nämlich der Abstand zwischen den Magneten und dem ferromagnetischen Deckel. Dies kann zu einer starken Verringerung der Haltekraft führen. Außerdem ist es nicht möglich, den Reibungskoeffizienten genau zu bestimmen.

Bei den Versuchen fallen sofort die ruckartigen Bewegungsabläufe der Antriebe auf. Dies hat den Grund, dass die Treiber in Einzelschrittmodus vorkonfiguriert sind. Die verwendeten Motoren verfügen über eine Schrittauflösung von 200 Schritten pro Umdrehung. Dies entspricht einem Schrittwinkel von $1,8^\circ$. Bei jedem Schrittimpuls bewegt sich der Rotor um diesen definierten Winkel. Bei langsamen Geschwindigkeiten kommt es dadurch zu einer ruckartigen Fortbewegung. Dies ist unerwünscht, da es sehr laut ist und dadurch starke Vibrationen entstehen, welche die gesamte Vorrichtung, insbesondere die verbaute Sensorik, belasten. Um eine kontinuierliche Drehbewegung zu erreichen, ist ein Mikroschrittbetrieb notwendig. Die Versuche zeigen, dass für die benötigten geringen Geschwindigkeiten eine Schrittauflösung von $1/64$ ideal ist. Dies kann an den Schrittmotor-Treibern eingestellt werden. Nun muss beachtet werden, dass sämtliche Bewegungsvorgaben ebenfalls dieser Auflösung unterliegen. Ein Nachteil des Mikroschrittbetriebes ist, dass sich das maximale Moment des Motors verringert. Die Kennlinie in Abb. 28 gilt für den Viertelschrittmodus. Es ist damit zu rechnen, dass bei der gewählten höheren Schrittauflösung geringere Momente erreicht werden. Da die Motoren aber großzügig dimensioniert sind, ist nicht mit

Problemen zu rechnen. Bei den Schaltversuchen im Handbetrieb kann außerdem folgendes festgestellt werden:

- Das Motormoment reicht für alle Stufenschalter-Bauformen aus.
- Die Magnete können die anliegenden Momente aller am Testdeckel verbauten Stufenschalter aufnehmen, jedoch ist beim grünen Schalter auf ein nicht zu weit eingefahrenes Spiel zu achten.
- Die Stufenschalter arretieren oft nicht selbstständig, sondern erst nach Wegnahme der Motor-Freigabe.

Der Grund für die im letzten Punkt beschriebenen Probleme ist die Verspannung des Adapters während eines anliegenden Moments. Bei manuellen Versuchen funktioniert dieses Prinzip einwandfrei. Der Stufenschalter arretiert selbstständig, sobald die entsprechende Position erreicht wird. In der Vorrichtung kommt es jedoch während der Drehbewegung zu Verspannungen. Die dadurch erhöhten Reibungskräfte im integrierten Spiel sind höher als die Federkraft nach unten. Erst nach Wegnahme der Motor-Freigabe und dadurch auch dessen Haltemoments kommt es zur Entspannung und Arretierung. Ein Überschalten der Stufe ist allerdings nicht zu befürchten, solange das Spiel ausreichend eingefahren und dadurch die Arretierungs-Federkraft des Schalters unterstützt wird. Dies ist bei der Entwicklung des Schaltprogramms zu berücksichtigen. Weitere Versuche, bei denen ohne Einsatz des Spiels Schalthandlung durchgeführt werden, zeigen keine hohe Betriebssicherheit.

7.6 Automatik-Betrieb

Nun wird aus den Erkenntnissen vom Handbetrieb und den im Kapitel 3.4.3 eruierten Messwerten ein Programm entwickelt, das selbstständig in die gewünschte Stufe schaltet. Dazu wird der Datenbaustein aus Abb. 58 erstellt, der die entsprechenden Parameter für Weg, Geschwindigkeit, Kraft und Moment enthält. Diese Werte ergeben sich aus den Messwerten in Tab. 2 und der Beobachtung der Sensorwerte und Verfahrensgeschwindigkeiten im Handbetrieb. Es zeigt sich z.B., dass der Momentbedarf nicht nur vom Schaltertyp abhängt, sondern auch ob der Schalter angehoben ist (Moment Stop) oder zwischen den Stufen aufliegt (Moment Einrasten). Ebenfalls ist für das Arretierdrehen eine viel geringere Geschwindigkeit notwendig als für das Positionsdrehen.

DB_ALLG_Parameter (Momentaufnahme erzeugt: 20.11.2019 15:42:44)				
	Name	Datentyp	Startwert	Kommentar
1	Static			
2	ALLG	Struct		Parameter
3	HEBEN_SENKEN	Struct		
4	KraftHebenStop	Real	-300.0	Abbruchsbedingung Heben
5	WegSenkenStopGrua	Real	16.0	Abbruchsbedingung Senken (Spielposition) graue Bauform
6	WegSenkenStopGruen	Real	11.0	Abbruchsbedingung Senken (Spielposition) grüne Bauform
7	Velocity	LReal	320.0	Geschwindigkeit Anheben + Positionsdrehen 320/64=5mm/s oder 5°/s
8	Distance	LReal	-64.0	Relativbewegung zum Entspannen -64/64=-1mm (abwärts)
9	Direction	Int	2	Abwärtsbewegung
10	DREHEN	Struct		
11	MomentStopImUhrzeiger	Real	6.0	Abbruchsbedingung Positionsdrehen
12	MomentStopGegenUhrzeiger	Real	-6.0	Abbruchsbedingung Positionsdrehen
13	WegAblaufFertigGrua	Real	13.0	Spielposition bei Arretierung bei grauer Bauform
14	WegAblaufFertigGruen	Real	5.0	Spielposition bei Arretierung bei grüner Bauform
15	MomentEinrastenImUhrzeiger	Real	8.0	Abbruchsbedingung Arretierdrehung
16	MomentEinrastenGegenUhrzeiger	Real	-8.0	Abbruchsbedingung Arretierdrehung
17	Velocity	LReal	64.0	Geschwindigkeit Arretierdrehen
18	Distance	LReal	2560.0	Relativbewegung beim Positionsdrehen 2560/64=40°
19	Direction	Int	1	

Abb. 58: Datenbaustein Parameter, Quelle: Eigene Darstellung.

Für den Automatik-Betrieb werden zwei Taster als Aufwärts- und Abwärtsschaltbefehl verwendet. Diese simulieren die digitalen Ausgänge der Messbrücke. Ein weiterer Taster dient als Abbruchstaste und der vierte Taster dient der neuen Initialisierung des Programmes. Dies ist notwendig da Kapitel 3.3.1 zeigt, dass die Schaltrichtung zwischen den verschiedenen Stufenschalter-Bauformen variiert. In Abb. 11 ist ersichtlich, dass die grüne Bauform im Uhrzeigersinn und die grauen Bauformen gegen den Uhrzeigersinn hochgeschaltet werden. Deshalb ist es notwendig vor der ersten Schalthandlung die Bauform zu identifizieren. Durch die Kenntnis der Bauform können auch die Parameter in Abb. 58 auf die jeweilige Bauform optimiert werden. In diesem Datenbaustein sind deshalb bestimmte Werte für den grünen und grauen Stufenschalter separat angegeben. Natürlich gibt es noch weitere Bauformen, speziell von dem grauen Schalter gibt es einige unterschiedliche Typen. Diese sind sich jedoch in Schaltrichtung und Vertikal-Hub sehr ähnlich und unterscheiden sich häufig nur im Schaltwinkel. Deshalb kann die Vielzahl der verschiedenen Schalter auf die zwei relevanten Typen in Tab. 12 reduziert werden:

Typ	Drehrichtung Aufwärtsschalten	Arretierungs- Federkraft	Vertikal-Hub zum Entsperren	Kraft- Momentbedarf
grüne Typen	rechts	stark	ca. 1,5 cm	hoch
graue Typen	links	schwach	ca. 0,5 cm	niedrig

Tab. 12: Programmtechnisch relevante Stufenschalter-Bauformen, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Programm besteht also aus zwei Teilen. Zuerst wird der Stufenschalter identifiziert und danach geschaltet. Sobald der Schalter einmal identifiziert ist, wird der entsprechende Programmabschnitt übersprungen bis wieder die Initialisierungstaste gedrückt wird. Dies ist immer bei der Messung eines neuen Transformators der Fall.

7.6.1 Identifikation Stufenschalter-Bauform

Das Diagramm in Abb. 59 zeigt den Ablauf für die Identifikation der Bauform. Dieser Programmabschnitt besteht aus insgesamt sechs Teilabschnitten. Davon werden die ersten drei bei jeder Schalthandlung ausgeführt und die restlichen nur bei der ersten Schalthandlung, wenn noch kein Stufenschalter identifiziert ist.

Die programmtechnische Umsetzung eines solchen Ablaufes gestaltet sich allein in der Programmiersprache FUP schwierig. Das Programm wird schnell unübersichtlich, was die Fehlersuche erschwert und dadurch auch dessen Optimierung. Deshalb wird für diese Anwendung auf die Programmiersprache GRAPH zurückgegriffen. GRAPH ist eine graphische Programmiermöglichkeit, die für Ablaufsteuerungen optimiert ist. Ein Funktionsbaustein, der in GRAPH konfiguriert ist, besteht aus einer Ablaufkette von einzelnen Schritten, in denen auszuführende Aktionen festgelegt sind. Zwischen den Schritten können Transitionen eingefügt werden, in denen FUP- oder KOP-Anweisungen entscheiden, ob sie durchschalten. Damit kann eine übersichtliche Schrittkette programmiert und beobachtet werden.

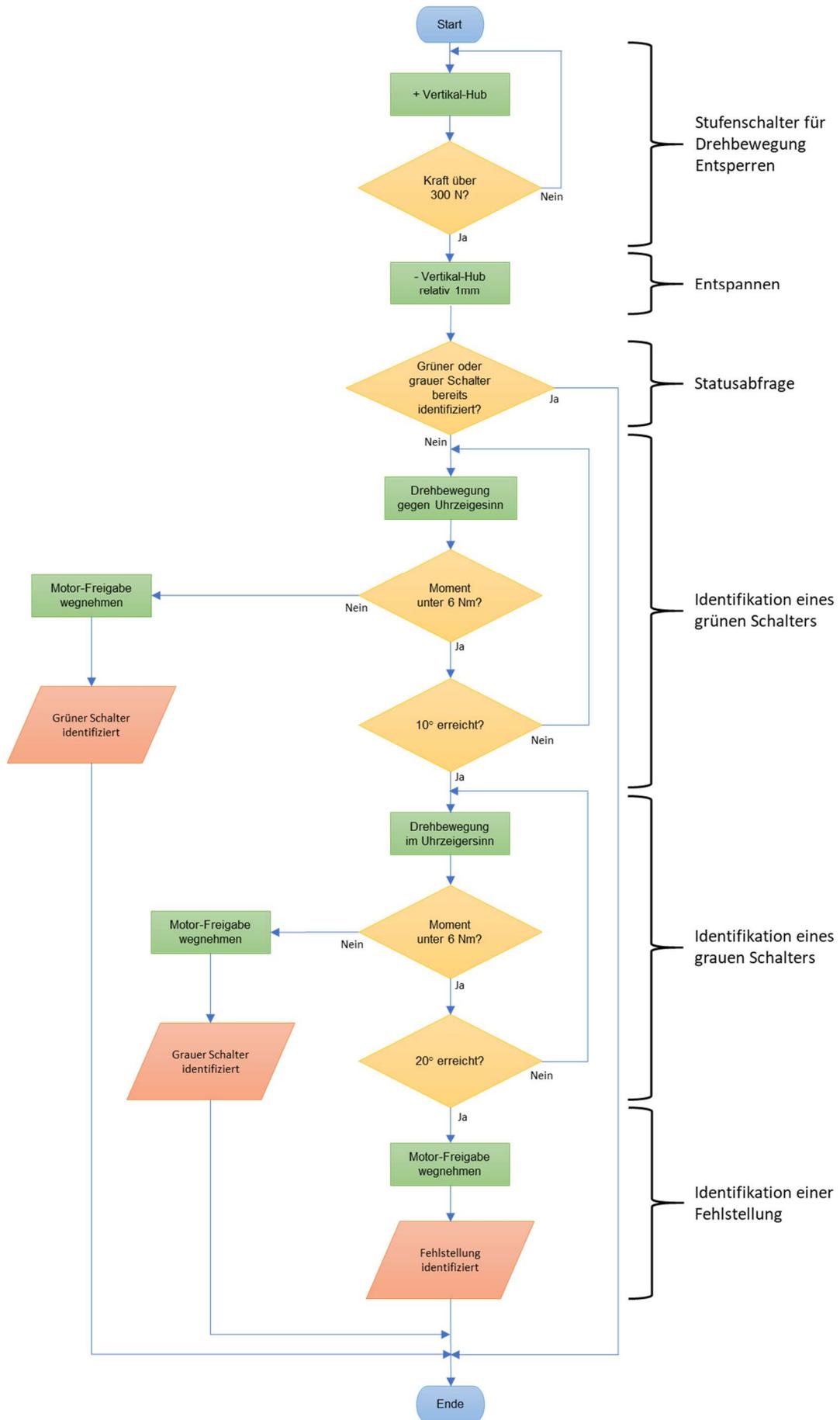


Abb. 59: Ablaufdiagramm Identifikation Stufenschalter-Bauform, Quelle: Eigene Darstellung.

7.6.1.1 Stufenschalter entsperren

Um den Stufenschalter drehen zu können, muss dieser zuerst entsperrt werden. Dies wird realisiert indem er angehoben wird. Da, wie schon erwähnt, der Vertikal-Hub zwischen den Bauformen variiert, wird er solange nach oben bewegt bis die benötigte Kraft auf 300 N ansteigt. Dies zeigt die Schrittkette aus Abb. 60.

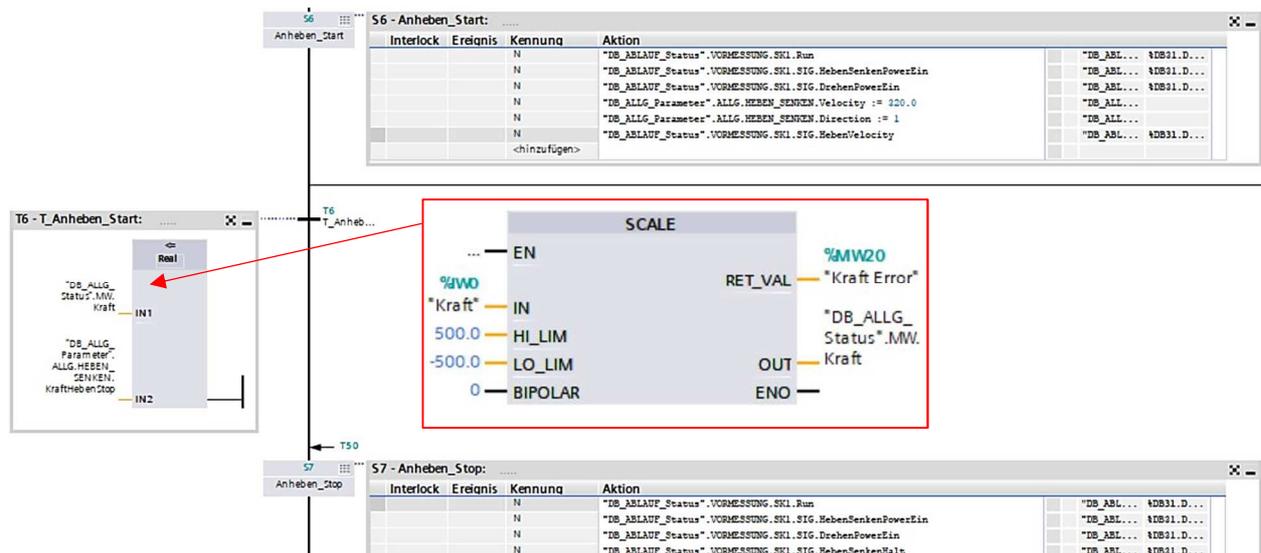


Abb. 60: Ablauffolge Anheben, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Schritt „Anheben_Start“ wird zuerst der Datenbaustein „DB_ABLAUF_Status“ aufgerufen und den Motoren die Freigabe erteilt. Danach wird der Datenbaustein „DB_ALLG_Parameter“ mit den Geschwindigkeits- und Richtungsvorgaben beschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass Weg- und Geschwindigkeitsvorgaben stets mit 64 zu multiplizieren sind, da die Treiber in 1/64-Mikroschrittbetrieb konfiguriert sind. Aus der Vorgabe 320 mm/s wird also eine reale Geschwindigkeit von 5 mm/s. Diese Operanden sind an den Parametern der in Kapitel 7.4 beschriebenen Motion-Control-Bausteine anzulegen. Diese befinden sich im OB1. Mit der letzten Aktion „HebenVelocity“ wird dem MOVEVELOCITY-Baustein am Parameter „Execute“ ein „TRUE“ gegeben, was den Anhebe-Vorgang starten lässt. Die Motorenfreigabe bewirkt sofort den Gleichlauf der beiden Antriebe über den Baustein aus Abb. 57.

Der MOVEVELOCITY-Baustein bleibt so lange aktiv bis die Transition T6 durchschaltet und der Schritt „Anheben_Stop“ ausgeführt wird. In diesem Schritt wird die Bewegung mit dem HALT-Baustein gestoppt. Die Weiterschaltbedingung in Transition T6 ist erfüllt, sobald der skalierte Analogeingang des Kraftsensors einen eingestellten Wert unterschreitet. Da der Sensor Zug- und Druckkräfte messen kann, werden die Zugkräfte mit einem Minus als Vorzeichen dargestellt. Wird also der im Datenbaustein konfigurierte Wert von -300 unterschritten, bedeutet dies, dass über 300 N Zugkräfte wirken. Damit wäre das Entsperrn abgeschlossen.

7.6.1.2 Entspannen des Stufenschalters

Der Schalter ist nun angehoben und somit für die Drehbewegung entsperrt, jedoch wirken noch 300 N Zugkräfte auf ihn. Um eine Schalthandlung durchführen zu können, ist es notwendig davor eine Entspannung durchzuführen. Dafür wird eine Relativbewegung von 1 mm nach unten durchgeführt. Dies wird über den Motion-Control-Baustein „MOVERELATIVE“ realisiert. Der Ablauf hierfür ist in Abb. 61 veranschaulicht.

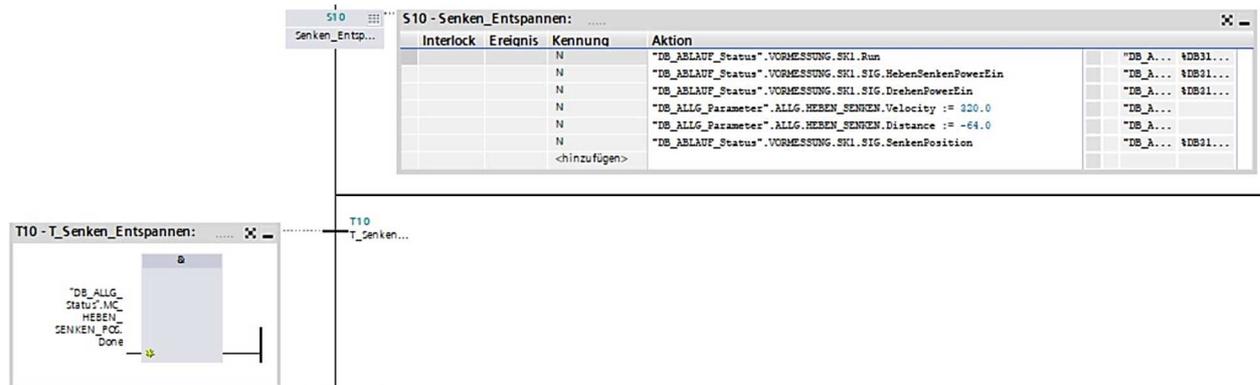


Abb. 61: Ablaufkette Entspannung Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Aufbau des Schrittes „Senken_Entspannen“ folgt demselben Prinzip wie „Anheben_Start“ aus Abb. 60. Auch hier wird Weg und Distanz mit 64 multipliziert und es ist ein Gleichlauf der Antriebe über dem entsprechenden Baustein zu realisieren. Die Transition T10 schaltet durch, sobald am Parameter „Done“ des Bausteines „MOVERELATIVE“ ein „TRUE“ ausgegeben wird. Dies bedeutet, dass der eingestellte Weg verfahren und somit die Entspannung abgeschlossen ist.

7.6.1.3 Statusabfrage

Nun erfolgt die Statusabfrage in Abb. 62, bezüglich Stufenschalteridentifikation. Wird ein Schaltertyp erkannt, merkt sich das Programm diesen so lange bis die Initialisierungstaste gedrückt wird. Bei schon gespeichertem Schaltertyp wird die restliche Identifikations-Ablaufkette übersprungen.

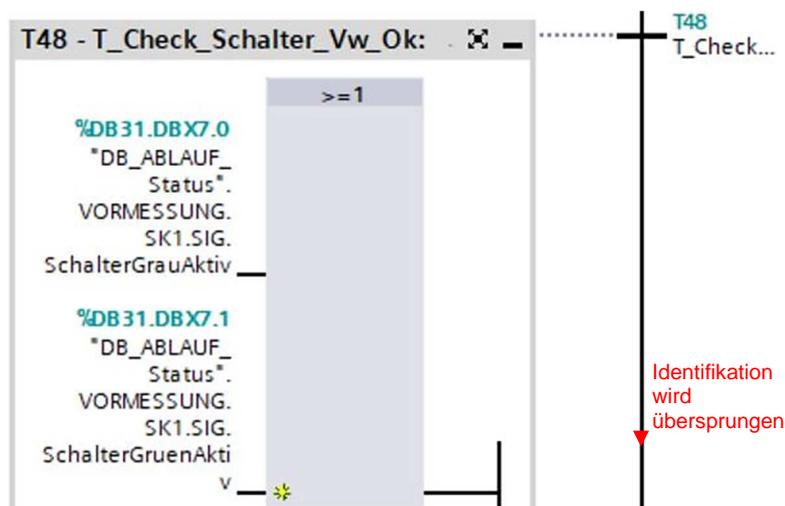


Abb. 62: Ablaufkette Statusabfrage, Quelle: Eigene Darstellung.

7.6.1.4 Identifikation eines grünen Stufenschalters

In Abb. 63 ist die Erkennung eines grünen Schalters dargestellt. Dazu muss der Stufenschalter zunächst in der ersten Stufe stehen. Dies ist aus produktionstechnischen Gründen stets der Fall.

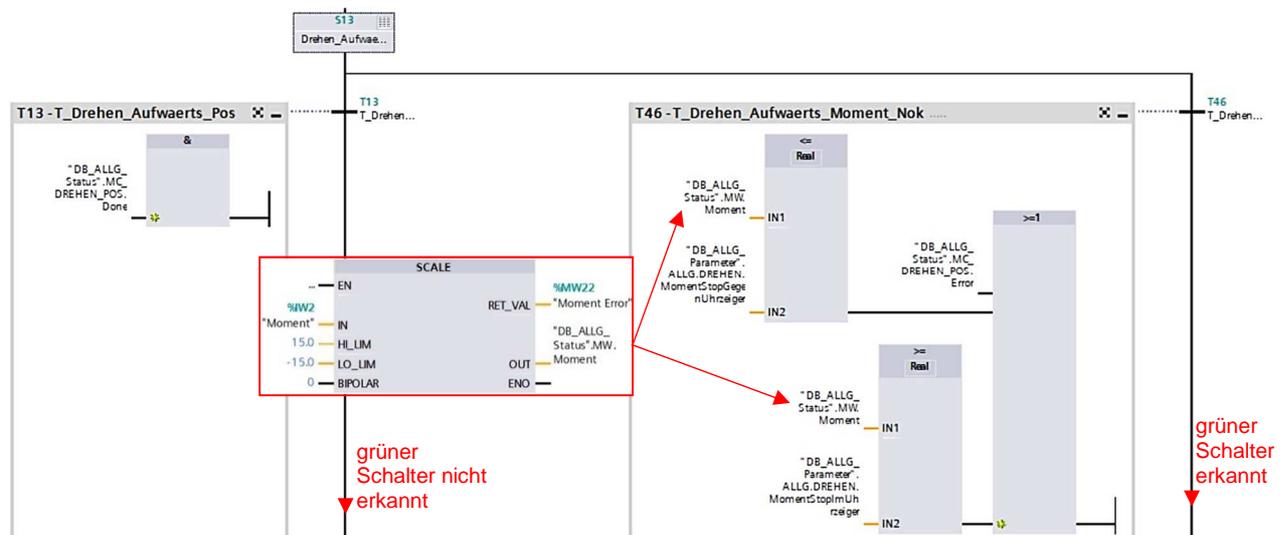


Abb. 63: Ablaufkette Identifikation grünen Schalter, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Schritt S13 wird mit dem MOVERELATIV-Baustein eine Relativbewegung von 10° gegen den Uhrzeigersinn ausgeführt. Da der grüne Stufenschalter in diese Richtung ansteht, wird dieser bei einer Drehmomentüberschreitung sofort erkannt. Kann aber die Bewegung erfolgreich ausgeführt werden, wird dies über dem Parameter „Done“ bestätigt und es ist definitiv kein grüner Schaltertyp. Da das skalierte Moment in Abhängigkeit der Drehrichtung ein positives oder negatives Vorzeichen haben kann, ist es auch notwendig einen positiven und einen negativen Grenzwert festzulegen und diese mit einer ODER-Funktion zu verknüpfen.

7.6.1.5 Identifikation eines grauen Stufenschalters / Fehlstellung

Wird kein grüner Stufenschalter erkannt, so wird die Ablaufkette in Abb. 64 ausgeführt. Hierbei wird eine Relativbewegung von 20° im Uhrzeigersinn durchgeführt.

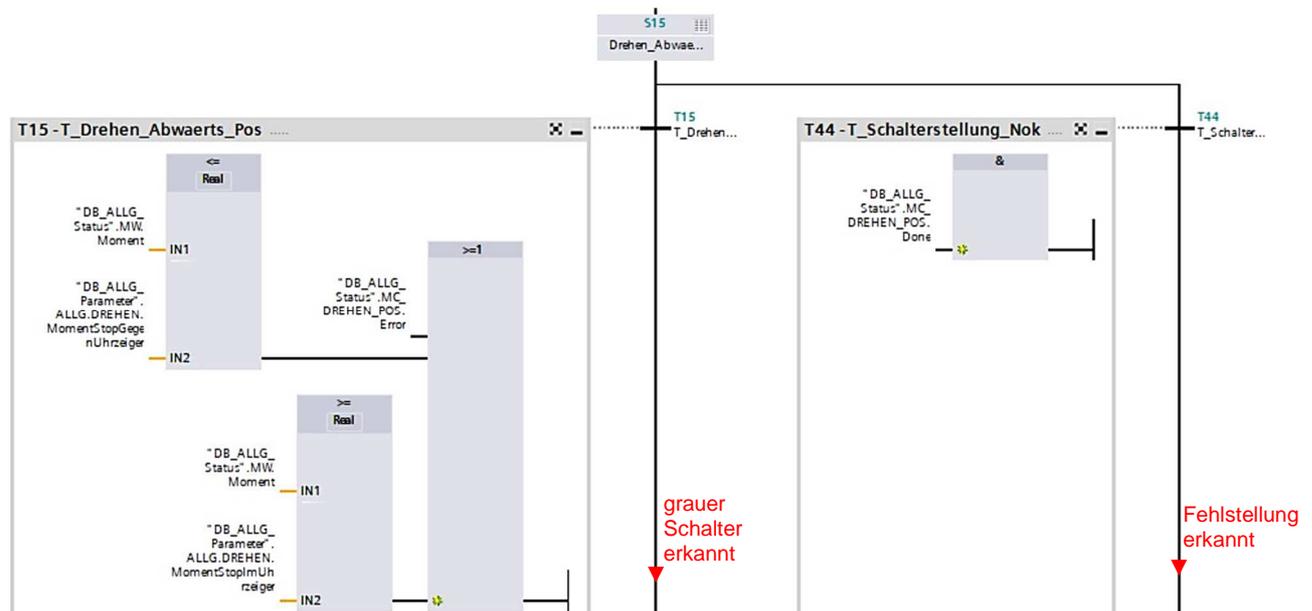


Abb. 64: Ablaufkette Identifikation grauer Schalter, Quelle: Eigene Darstellung.

Davon ausgegangen, dass der Schalter ursprünglich in der ersten Stufe stand, steht nun die graue Bauform an. Dies zeigt sich über den Anstieg des Drehmomentes. Falls jedoch über den Parameter „Done“ die erfolgreiche Bewegungsausführung bestätigt wird, wird eine Fehlstellung detektiert. In diesem Fall befindet sich der Stufenschalter nicht in der ersten Stufe. Dies wird dann über die Störungsleuchte visualisiert.

Dadurch kann auch eine Fehlstellung identifiziert werden, jedoch mit einer Einschränkung. Steht der Stufenschalter in der letzten Stufe, wird die Fehlstellung nicht erkannt, sondern ein falscher Schaltertyp identifiziert. Da dies aber aus produktionstechnischen Gründen unwahrscheinlich ist, wird dies vorerst akzeptiert.

7.6.2 Schaltprogramm

Im zweiten Programmabschnitt wird eine Schalthandlung in die gewählte Richtung ausgeführt. Das Ablaufdiagramm in Abb. 65 beschreibt die drei dafür notwendigen Teilschritte. Zu erwähnen ist, dass bei jeder Schalthandlung stets beide Programmabschnitte ausgeführt werden.

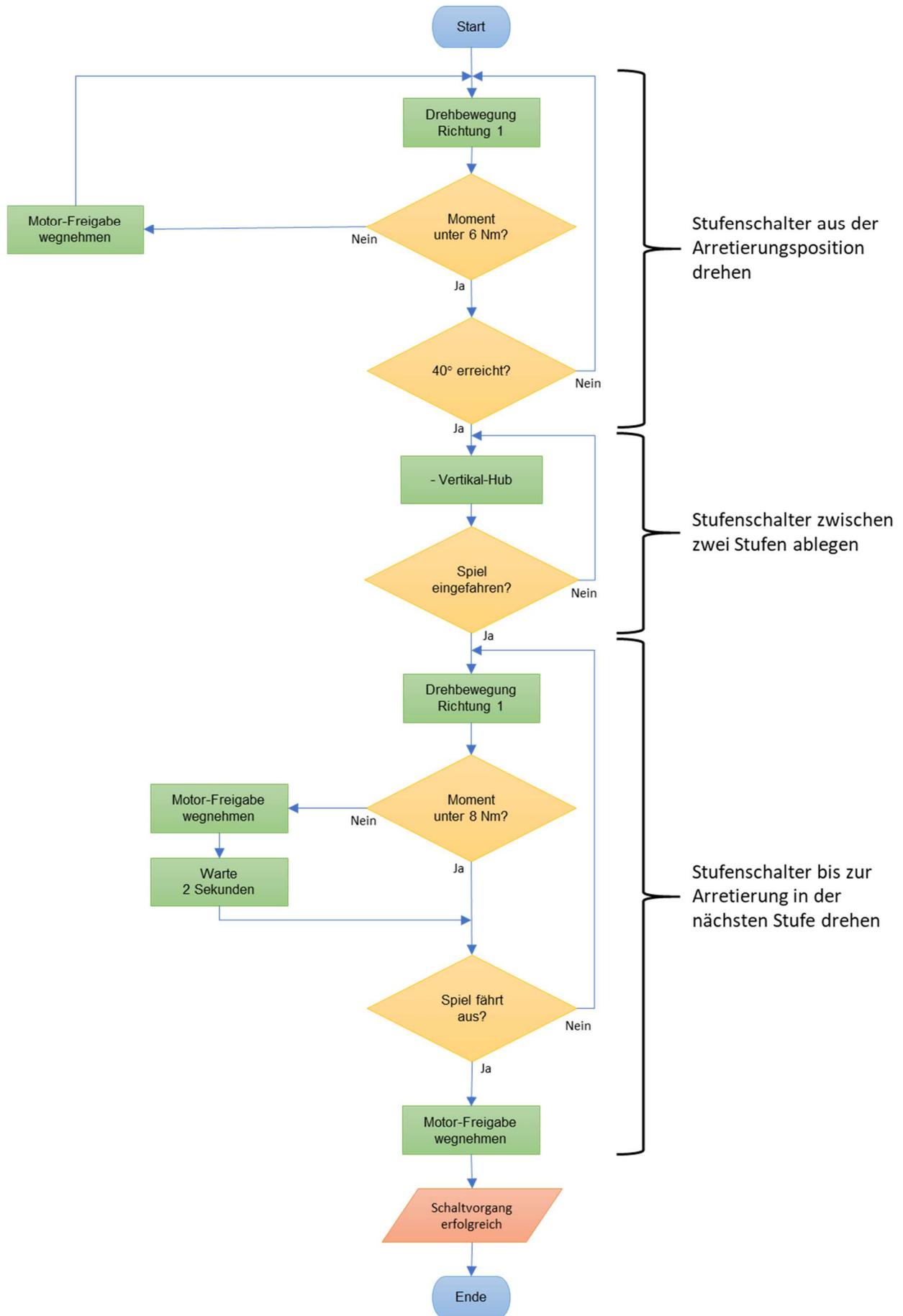


Abb. 65: Ablaufdiagramm Schaltprogramm, Quelle: Eigene Darstellung.

7.6.2.1 Aus Arretierungsposition drehen

In diesem Programmteil ist die Bauform des Stufenschalters schon bekannt und er ist angehoben und damit entsperrt. In der Schrittkette in Abb. 66 wird er nun in die entsprechende Richtung aus der Arretierungsposition gedreht. Als Drehwinkel wird 40° gewählt, da hierbei noch bei keinem untersuchten Stufenschalter die nächste Arretierungsposition erreicht wird.

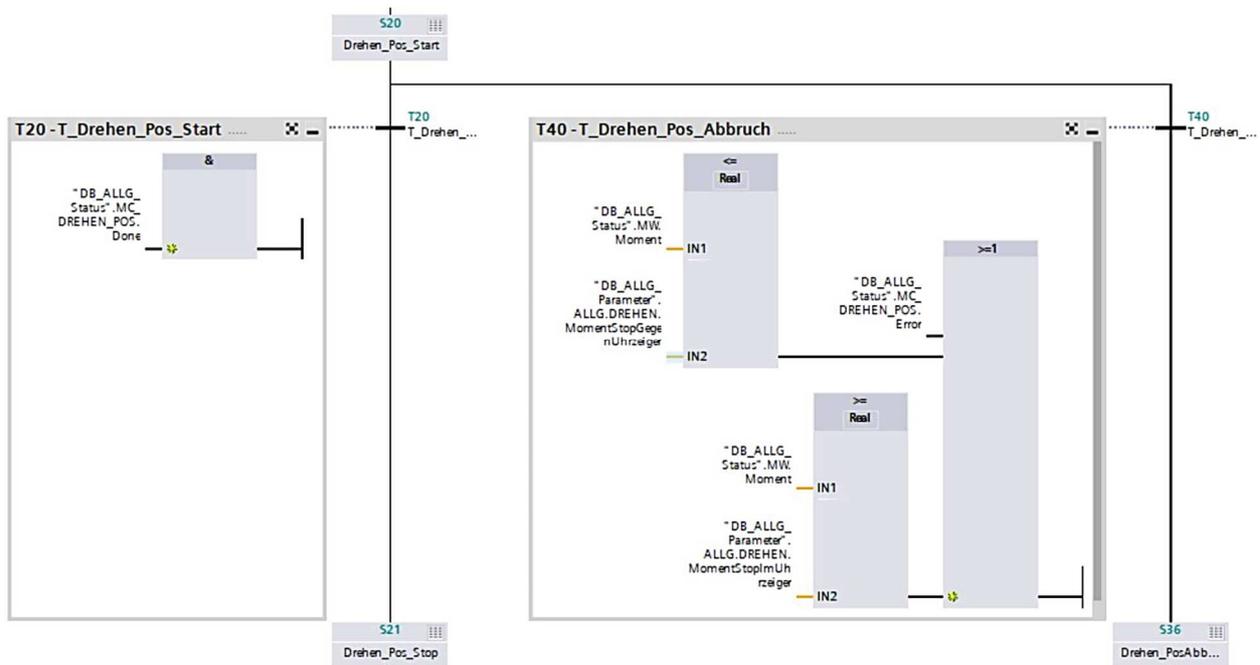


Abb. 66: Ablaufkette Drehen aus Arretierungsposition, Quelle: Eigene Darstellung.

Sobald die Relativbewegung abgeschlossen ist, wird die Freigabe des Motors weggenommen. Kommt es zu einer Momentüberschreitung, wird ebenfalls die Freigabe weggenommen und damit das Haltemoment entfernt. Dadurch kommt es zur Entspannung und es wird wieder zum Anfang dieses Abschnittes gesprungen. Dasselbe geschieht, wenn am verwendeten MOVERELATIVE-Baustein ein Error auftritt.

7.6.2.2 Stufenschalter zwischen zwei Stufen ablegen

In diesem Programmteil befindet sich der Stufenschalter bereits zwischen zwei Arretierungspositionen. In Abb. 67 ist der Ablege-Vorgang realisiert. Der Schalter wird nach unten bewegt, bis das Spiel auf eine bestimmte Position eingefahren ist. Da das Spiel durch eine Federkraft ausfährt, steigt der Druck auf den Stufenschalter je weiter das Spiel eingefahren wird. Versuche zeigen, dass dies bei der grauen Bauform hilfreich ist, da dadurch ein zuverlässiges Arretieren gewährleistet ist. Bei der grünen Bauform ist dies jedoch kontraproduktiv. Dieser Stufenschalter hat selbst schon eine sehr starke Federkraft, wodurch das Arretieren keine Probleme bereitet. Allerdings ist der grüne Stufenschalter viel schwergängiger als der Graue. Die Federkraft des Spiels wirkt in die entgegengesetzte Richtung zur Haltekraft der Magnete, wodurch auch deren Haltemoment abnimmt. Das kann bei dieser schwergängigen Bauform zu Problemen führen. Um beide Bauarten zuverlässig bedienen zu können, sind verschiedene Spielpositionen als Stop-Bedingung konfiguriert. Sobald der jeweilige Schalter erkannt wird, holt sich das Programm selbstständig die dazugehörigen Werte aus dem Datenbaustein.

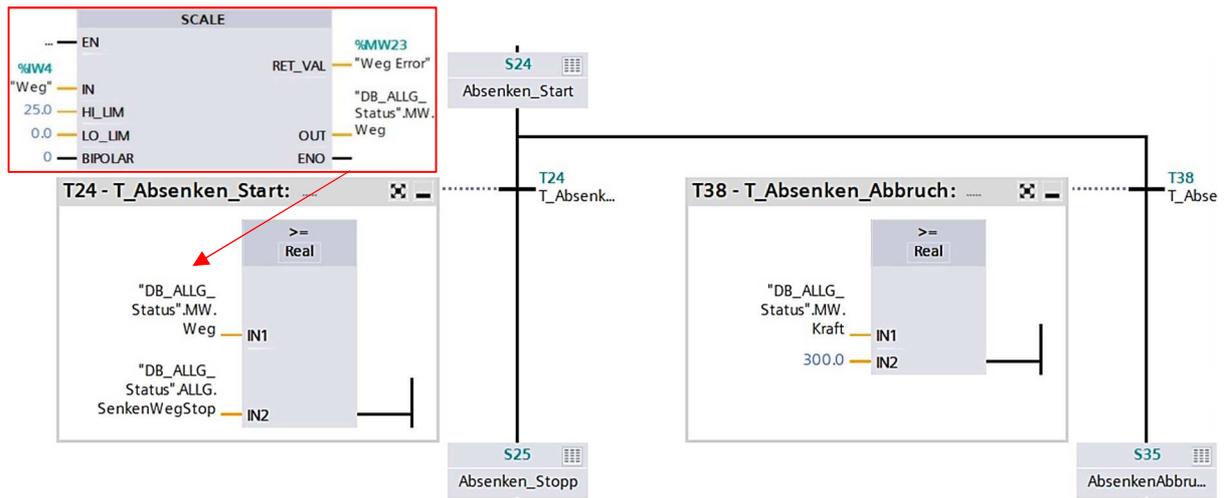


Abb. 67: Ablaufkette Ablegen zwischen zwei Stufenpositionen, Quelle: Eigene Darstellung.

Da beim Prototyp das Spiel noch fixiert werden kann, ist eine zusätzliche Abbruchs-Verzweigung notwendig. Diese Transition schaltet durch sobald der Druck auf über 300 N ansteigt. Dies bedeutet, dass das Spiel fixiert und deshalb kein Anhalten über die Wegsensordaten möglich ist. Sobald die Spielfixierung wegfällt, kann darauf verzichtet werden, weshalb dieser Programmabschnitt auch nicht im Ablaufdiagramm in Abb. 65 vorkommt.

7.6.2.3 Drehen bis zur Arretierung

Im letzten Abschnitt wird der abgelegte Stufenschalter so lange weitergedreht bis er in der nächsten Stufe einrastet. Die Abbruchsbedingung dieser Drehbewegung ist in Abb. 68 dargestellt.

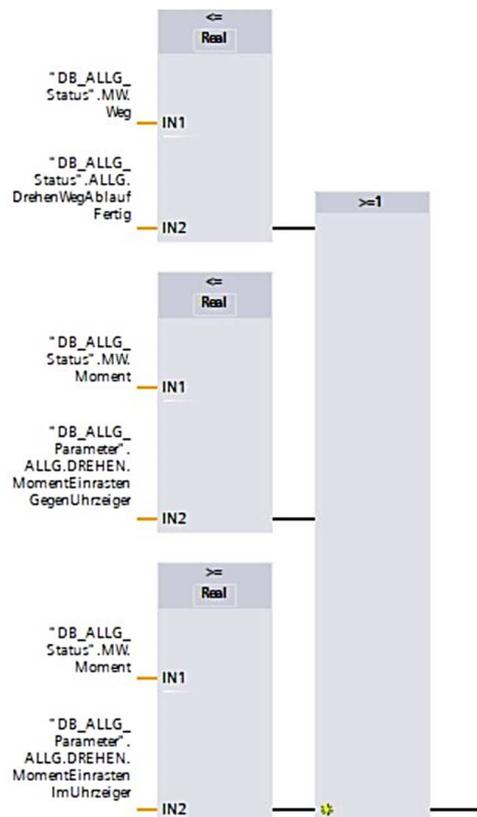


Abb. 68: Abbruchsfunktion Drehbewegung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abbruchsbedingung für die Drehbewegung beinhaltet eine bestimmte Ausfahrposition des Spiels (Wegsensor) oder einen Anstieg des Drehmoments. Diese Spielposition wird wieder für die zwei Bauformen separat konfiguriert, da sich diese im benötigten Vertikal-Hub unterscheiden. Die Versuche im Handbetrieb aus Kapitel 7.5 zeigen, dass der Stufenschalter in den meisten Fällen nicht vollständig einrastet. Die Arretierung reicht aber aus, um ein Überschalten der Stufe zu verhindern. Aus diesem Grund wird die Drehbewegung meistens durch eine Momentüberschreitung gestoppt. Beim Stoppen der Drehbewegung wird auch die Motor-Freigabe weggenommen und dadurch auch dessen Haltemoment. Daraus folgend kommt es zur Entspannung und zu der vollständigen Arretierung. Ob die Schalthandlung erfolgreich abgeschlossen ist, lässt sich jedoch eindeutig nur an der Spielposition erkennen. Deshalb wird in Abb. 69 nochmals eine Kontrolle durchgeführt, ob das Spiel weit genug ausgefahren ist.

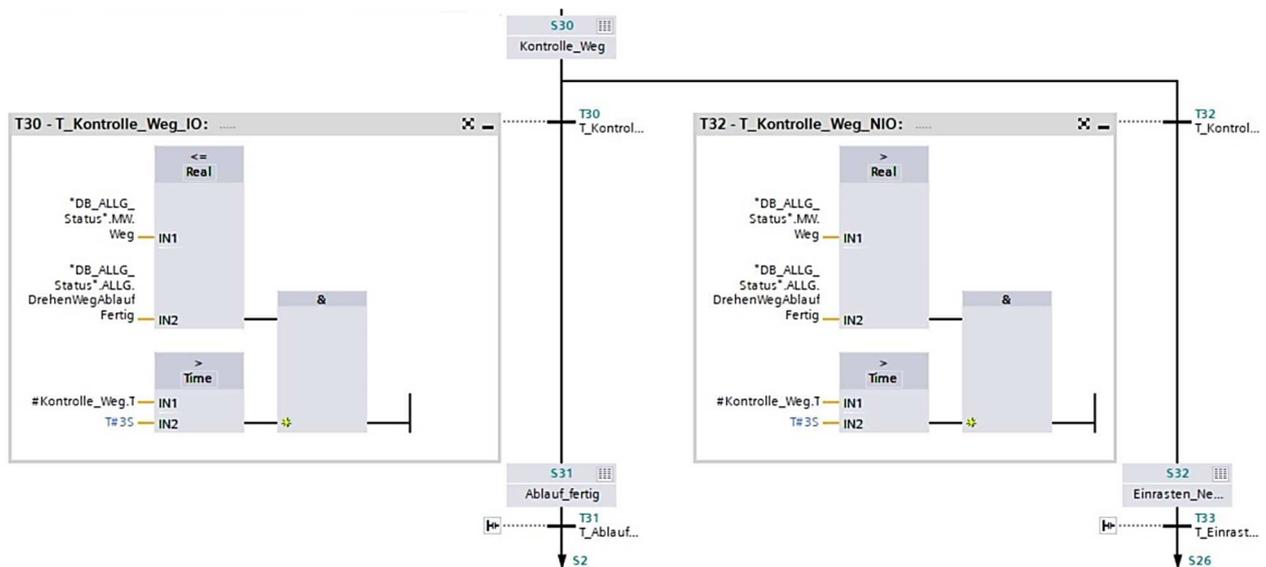


Abb. 69: Ablaufkette Kontrolle Spielposition, Quelle: Eigene Darstellung.

Sobald das Spiel über einen bestimmten Grenzwert ausfährt (Weg sinkt), ist die Schalthandlung abgeschlossen und ein Feedback-Signal wird ausgegeben. Sollte dieser Grenzwert innerhalb von 3 Sekunden nicht erreicht werden, wird wieder gedreht bis die Abbruchsfunktion aus Abb. 68 erfüllt ist und die Kontrolle der Spielposition wiederholt. Das integrierte Zeitglied ist ebenfalls eine Erkenntnis aus den Versuchen. Diese zeigen, dass nach der Wegnahme der Motor-Freigabe die Arretierung häufig verzögert eintritt.

7.6.3 Programm-Test in Feldversuchen

Im Versuchsaufbau aus Abb. 54 wird das Programm nun getestet. Die Schaltversuche können dadurch an drei verschiedenen Stufenschaltern durchgeführt werden. Diese unterscheiden sich im Kraft- und Momentbedarf, sowie im Schaltwinkel und benötigten Vertikal-Hub zum Entsperrern. Ebenfalls variiert deren Schaltrichtung. Deshalb bieten sie optimale Voraussetzungen für Versuche unter Realbedingungen. Die für die Feldversuche in Abb. 70 verwendeten Stufenschalter sind außerdem die meistverwendeten Typen bei Siemens Weiz. Es handelt sich um zwei graue Typen und eine grüne Bauform.

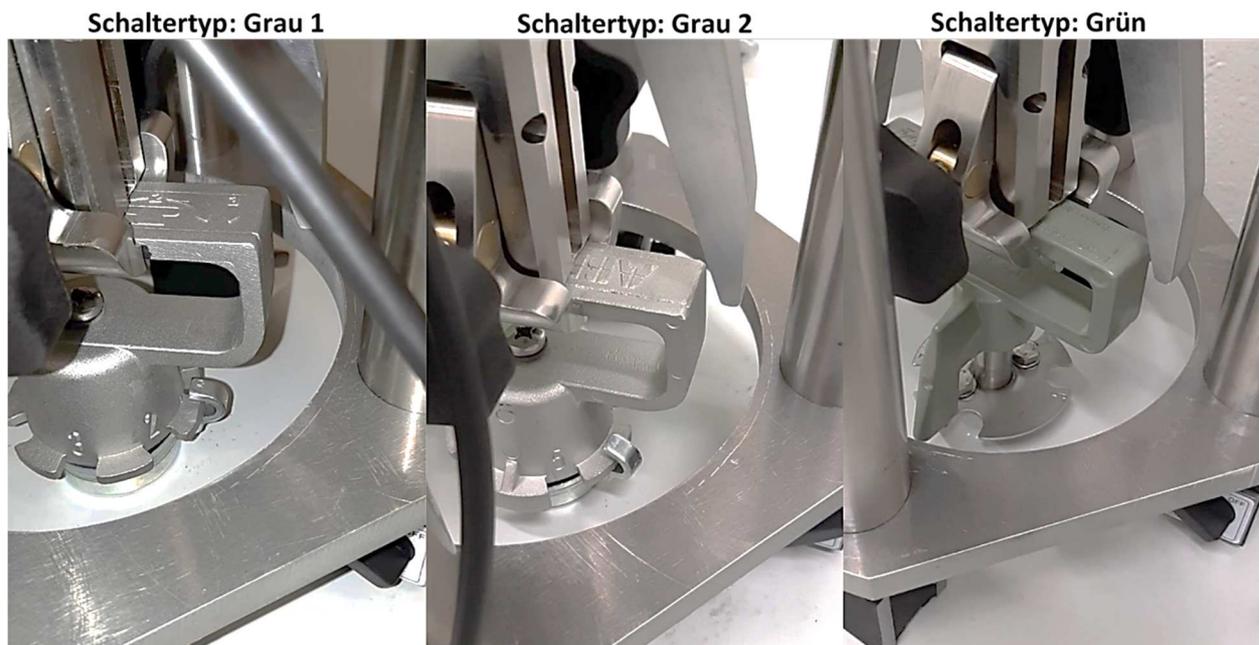


Abb. 70: Schaltversuche mit unterschiedlichen Stufenschalter-Bauformen, Quelle: Eigene Darstellung.

Insgesamt besteht die Versuchsreihe aus über 100 Schalthandlungen an unterschiedlichen Bauformen. Diese inkludieren auch die Identifikation der verschiedenen Schaltertypen. Es kann festgestellt werden, dass besonders beim Arretierdrehen eine geringe Geschwindigkeit ein sauberes Einrasten gewährleistet. Das Positionsdrehen nach dem Anheben kann hingegen mit einer höheren Geschwindigkeit durchgeführt werden. Dadurch kann der Zeitbedarf für eine Schalthandlung bei dem ersten grauen und den grünen Schaltertypen auf unter eine Minute gesenkt werden. Der zweite graue Typ benötigt wegen des größeren Schaltwinkels etwas länger. Da es sich hierbei jedoch um eine autonome Umschaltvorrichtung handelt, ist deren Zeitbedarf nicht sehr relevant. Darum besteht hier kein weiterer Optimierungsbedarf.

Der wichtigste Faktor ist die Betriebssicherheit der Anlage und hierbei kann die Umschaltvorrichtung während der Versuche überzeugen. Nachdem die Parameter nach Abb. 58 angepasst sind, ist keine fehlerhafte Schalthandlung mehr zu beobachten. Auch die Identifikation der Stufenschalter und die dadurch realisierte Parameter-Anpassung funktioniert einwandfrei.

Das Konzept einer auf Sensordaten basierenden Bewegungssteuerung erweist sich als äußerst effektiv. Besonders die Arretierungserkennung über das Spiel aus Kapitel 6.1.2 ist für die Anwendung sehr wertvoll, da dadurch der erfolgreiche Abschluss einer Schalthandlung sicher detektiert werden kann. Die Versuche zeigen außerdem, dass durch diese Methode keine hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit mehr gestellt werden.

7.7 Momentmessung über Motorstrom

In Kapitel 5.2.2 werden die theoretischen Grundlagen einer Möglichkeit der Kraft- und Momentmessung ohne entsprechende Sensorik behandelt. Dies soll über eine Motorstrommessung an Cosed-Loop-fähigen Schrittmotoren erfolgen. Dafür notwendig sind Inkrementalgeber, die in den verwendeten Schrittmotoren bereits integriert sind. Diese werden an den Igus D1 Schrittmotor-Treibern angeschlossen. Danach kann eine Closed-Loop Regelung an der D1 konfiguriert werden.

Die D1 hat auch zwei Analog-Eingänge on Board, über die das Sensorsignal der Kraftmessdose eingelesen wird. Das integrierte Oszilloskop ermöglicht dann, die gleichzeitige Betrachtung von Motorstrom und Sensordaten über einen bestimmten Zeitraum. Die Daten werden von der D1 aufgezeichnet und als .csv-Datei bereitgestellt. Die analogen Eingänge der D1 können jedoch nur Spannungssignale verarbeiten. Die gewählten Messverstärker aus Kapitel 5.1.4 liefern hingegen Stromsignale. Um die Sensordaten in die D1 einlesen zu können, müssen diese zuerst über die SPS aufbereitet und über einen analogen Spannungsausgang bereitgestellt werden. Dafür werden die beiden Analogausgänge QW0 und QW2 als 0-10 V Spannungsausgänge konfiguriert. Über den Baustein UNSCALE werden die skalierten Sensordaten wieder in einen Integer-Wert umgewandelt und als Spannungssignal am entsprechenden Ausgang bereitgestellt.

In Abb. 71 fällt auf, dass beim Deskalieren andere Grenzwerte für den unteren Bereich (LO_LIM) festgelegt sind. Dies hat den Grund, dass beim Versuch nur die Zugkraft (negativer Bereich) und das Drehmoment in eine Richtung (gegen Uhrzeigersinn = positiver Bereich) relevant sind. Der andere Bereich wird ausgeblendet, wodurch eine höhere Auflösung des relevanten Bereiches erreicht wird.

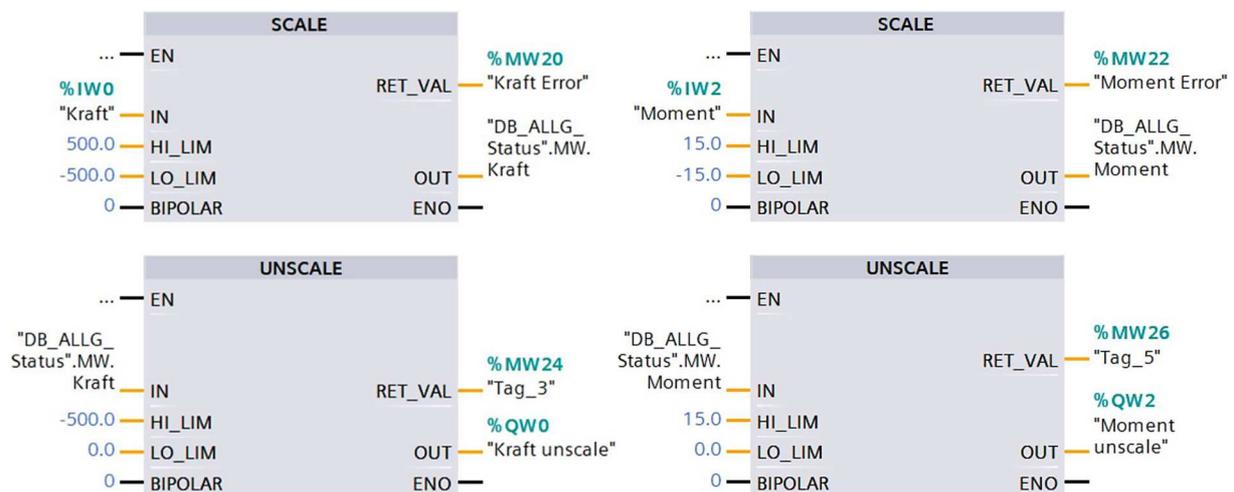


Abb. 71: Konfiguration Analogausgänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Nun können die analogen Ausgänge der SPS in die analogen Eingänge der D1 eingelesen und zusammen mit dem Motorstrom im integrierten Oszilloskop gleichzeitig betrachtet werden. Im Versuch werden die Motoren bei langsamer Geschwindigkeit manuell be- und entlastet. Die dadurch entstehenden Daten werden in Excel wieder skaliert und visualisiert.

Die physikalische Messgröße 0-15 Nm wird als 0-10 V Signal aufgezeichnet. Um dieses Signal wieder als Moment darstellen zu können, ist es notwendig die Spannungswerte mit 1,5 zu multiplizieren. Soll die

physikalische Messgröße 0-500 N dargestellt werden, müssen die Spannungswerte mit 50 multipliziert werden.

Folgende Versuche werden durchgeführt:

- Belastungsversuch Getriebemotor (Drehbewegung)
 - Open-Loop
 - Closed-Loop
- Belastungsversuch Linearantrieb (Vertikal-Hub)
 - Open-Loop
 - Closed-Loop

7.7.1 Belastungsversuch Getriebemotor

Als Antrieb für die Drehbewegung fungiert der NEMA 23XL Schrittmotor von Igus mit einem Planetengetriebe ($i=5$). Mit dieser Untersetzung kann der Antrieb ein Drehmoment von über 15 Nm aufbringen.

7.7.1.1 Open-Loop

Beim Open-Loop-Betrieb ist kein Inkrementalgeber notwendig. In Abb. 72 ist ersichtlich, dass der Motorstrom absolut unabhängig vom anliegenden Moment ist.

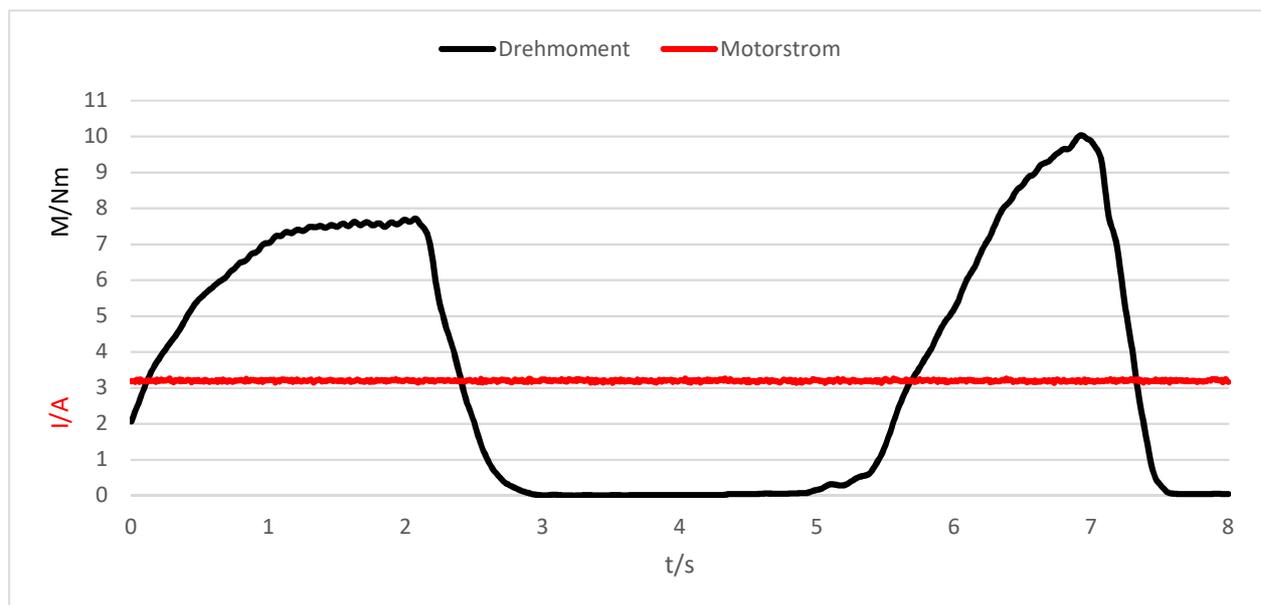


Abb. 72: Strom/Moment-Diagramm Getriebemotor Open-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Leerlauf tritt hierbei derselbe eingepreßte Strom von ca. 3,2 A auf wie bei einer Belastung von über 10 Nm. Wie schon angenommen, ist eine Momentmessung über den Motorstrom bei Schrittmotoren im Open-Loop Betrieb nicht möglich.

7.7.1.2 Closed-Loop

Beim Closed-Loop Betrieb ist ein Inkrementalgeber notwendig und die D1 Steuerung ist entsprechend zu konfigurieren. In Abb. 73 ist die lastabhängige Motorstromregelung der Sinuskommutierung gut ersichtlich.

Der Motorstrom ist nun stark vom anliegenden Moment abhängig. Bei Leerlauf wird er beinahe auf null reduziert und steigt bei Belastung an. Wie angenommen verhält sich der Motorstrom nicht proportional zur Last, jedoch kann eine Ähnlichkeit der beiden Kurven festgestellt werden. Hochgenaue Momentmessungen wie mit den Mehrkomponentensensor sind damit natürlich nicht möglich. Für die spezifische Anwendung werden diese jedoch gar nicht benötigt. Die Abschaltung der Motoren erfolgt hierbei durch das Überschreiten eines Grenzwertes. Dabei ist es unkritisch, ob dieser durch eine ungenaue Messung leicht variiert.

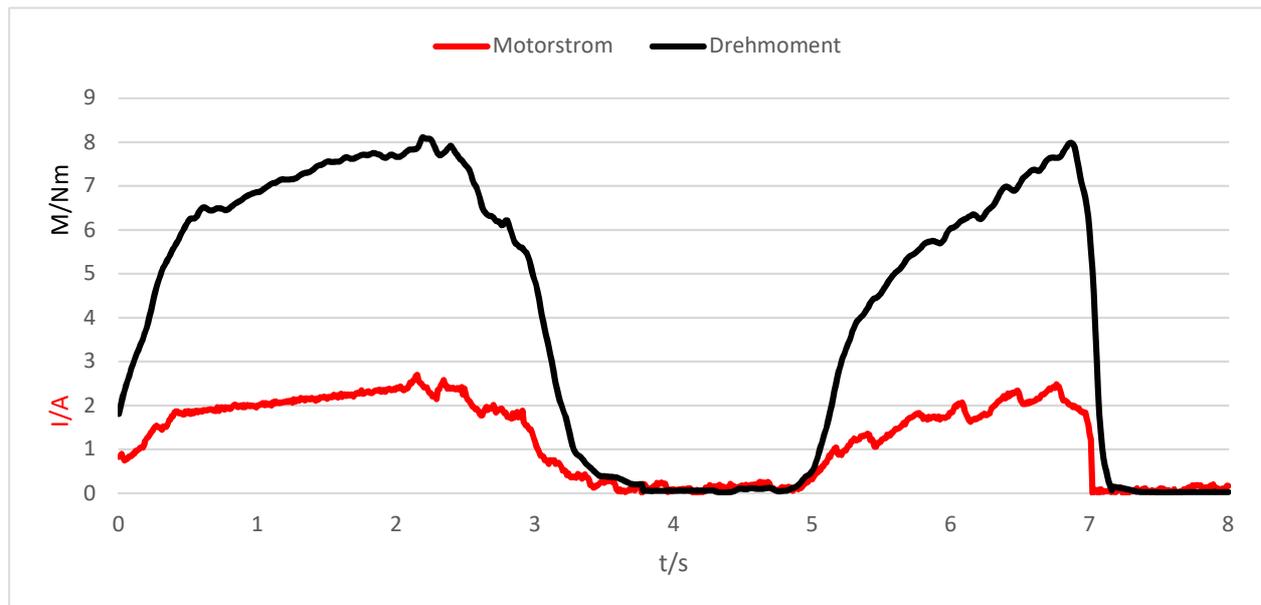


Abb. 73: Strom/Moment-Diagramm Getriebemotor Closed-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.

7.7.2 Belastungsversuch Linearantrieb

Als Antrieb der Linearmodule fungiert je ein NEMA 17 Schrittmotor von Igus. Dieser Motor leistet ein Drehmoment von 0,5 Nm. Bei dem Versuch wird der Motorstrom nur eines Antriebs gemessen. Da die Module starr miteinander verbunden sind, wird derselbe Strom auch beim anderen Motor angenommen. Um Motorstrom und Last in einem Diagramm darstellen zu können, wird der Analogeingang nicht skaliert, sondern als analoges Spannungssignal dargestellt. Um die wahren Zugkräfte zu erhalten, muss dieses mit 50 multipliziert werden. Auf dies wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

7.7.2.1 Open-Loop

Für den Open-Loop Betrieb ist kein Feedback-Signal vom Inkrementalgeber notwendig. Wie schon angenommen, ist der Motorstrom im Open-Loop Betrieb wieder unabhängig von der Belastung. In Abb. 74 ist auch die Selbsthemmung der Linearmodule ersichtlich. In der ersten Sekunde ist der Antrieb noch ausgeschaltet. Trotzdem wird schon eine Last von ca. 45 N ($0,9 \cdot 50$) gehalten. Dies entspricht der Gewichtskraft des Adapters.

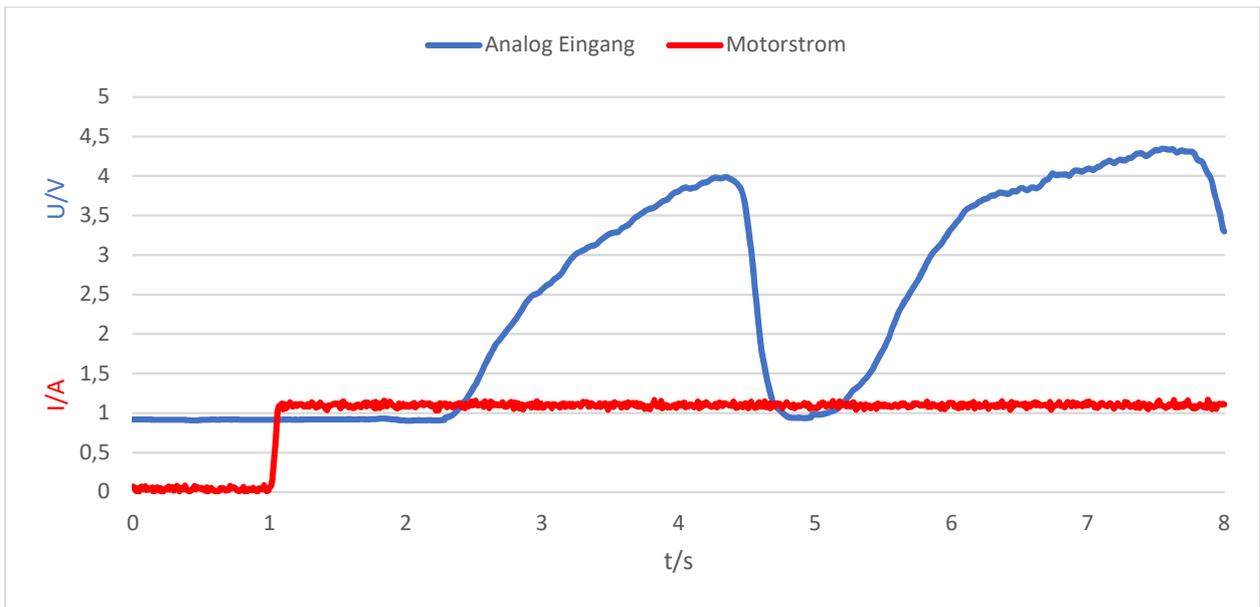


Abb. 74: Strom/Moment-Diagramm Linearantrieb Open-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.

7.7.2.2 Closed-Loop

Beim Closed-Loop Betrieb sind die Signale des Inkrementalgebers wieder als Feedback an die Motorsteuerung D1 zurückzuführen. Dadurch wird der Regelkreis geschlossen und der Motorstrom soll wieder der Last angepasst werden. In Abb. 75 ist jedoch ersichtlich, dass dies nicht der Fall ist. Bis auf einen langsameren Anstieg des Motorstromes beim Einschalten des Antriebes, sind keine Unterschiede zum Open-Loop Betrieb aus Abb. 74 zu erkennen.

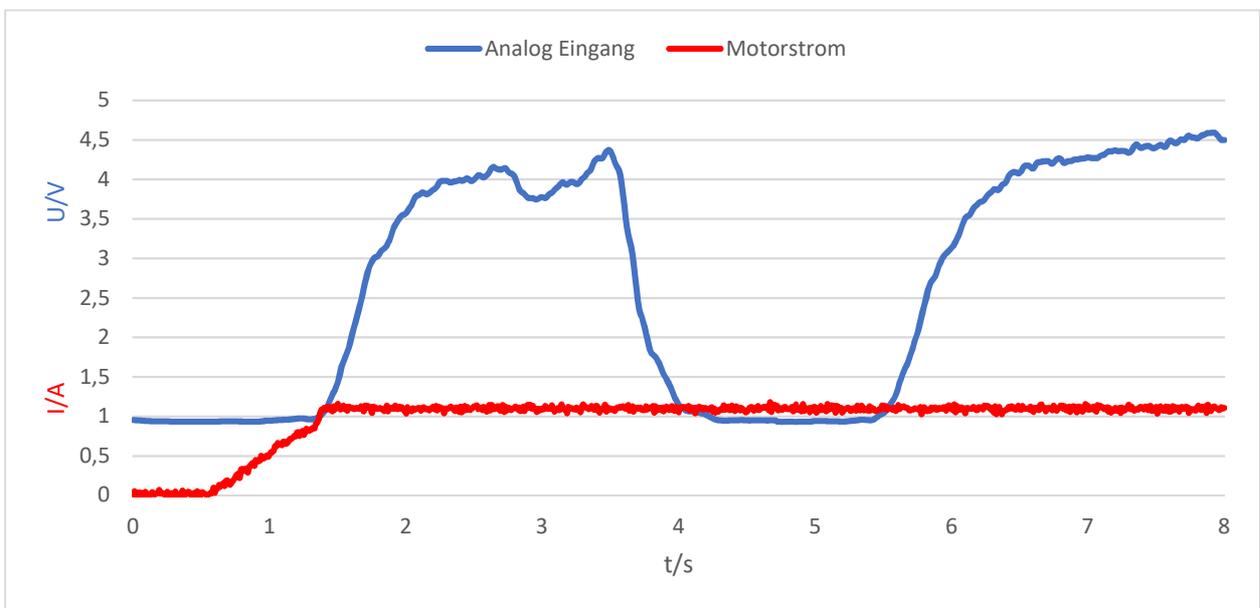


Abb. 75: Strom/Moment-Diagramm Linearantrieb Closed-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Kraftmessung über den Motorstrom ist bei den Linearantrieben also nicht möglich. Als Gründe dafür, dass die lastabhängige Motorstromanpassung der Sinuskommutierung hier, im Gegensatz zum Getriebemotor, nicht funktioniert, werden folgende angenommen:

- Geringer Wirkungsgrad der Linearmodule (Gleitlager)
- Hohes Übersetzungsverhältnis der Linearmodule
- Motorengleichlauf
- Selbsthemmung

Der geringe Wirkungsgrad von 0,2 hat einen großen Offset zur Folge. Dies bedeutet, dass der Motor auch bei einer geringen Belastung am Linearmodul, ein im Verhältnis hohes Drehmoment zu bewältigen hat. Die geringen Geschwindigkeiten bewirken außerdem ein großes Losbrechmoment. Durch das hohe Übersetzungsverhältnis verändert sich der benötigte Motormoment bei steigender Last nur gering. Dieser Effekt wird dadurch zusätzlich verstärkt, da sich die Last zwischen den beiden Linearmodulen aufteilt. Beim Versuch wird jedoch nur an einem Antrieb der Motorstrom gemessen. Ein weiterer Grund ist die Selbsthemmung der Linearmodule. Diese bewirkt, dass die Kraft nur in eine Richtung übertragen werden kann. Aus der Rotation der Motoren wird eine Linearbewegung der Module. Umgekehrt sperren die Module durch die geringe Steigung der Trapezgewindespindel die Bewegung. Im Ruhezustand wirkt deshalb keine Last auf der Motorwelle.

8 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Eine stetige Optimierung des Fertigungsprozesses ist in der Transformatoren-Produktion zwingend notwendig, um den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens nachhaltig zu sichern. Eine der effektivsten Methoden der Prozessoptimierung ist die Automatisierung. Die Vormessung von Transformator-Aktivteilen hat sich als idealer Bereich herausgestellt, um das Automatisierungspotenzial der individuellen Transformatoren-Fertigung zu untersuchen.

Der daraus entstandene Prototyp hat im Versuchsaufbau seine Tauglichkeit bewiesen. In weiterer Folge ist die Integration der Umschaltvorrichtung in die Messzelle geplant, um deren Praxistauglichkeit zu überprüfen. Dadurch können wertvolle Erkenntnisse über die Robustheit des Systems gesammelt und zur Weiterentwicklung von Hard- und Software verwendet werden. Ebenfalls kann dadurch das Einsparungspotenzial genau ermittelt werden. Sollte sich das System technisch und kommerziell auch weiterhin bewähren, ist eine Kleinserie angedacht und die Integration in andere Siemens-Produktionsstandorte von Verteiltransformatoren.

Auf jeden Fall sollte die Momentmessung über den Motorstrom weiterverfolgt werden. Die Versuche sind zumindest bei dem im closed-loop-betriebenen Schrittmotor für die Drehbewegung vielversprechend. Sobald der Motorstrom von der Treibereinheit über eine CAN-Schnittstelle ausgegeben werden kann, sollte die Implementierung im SPS-Programm erfolgen, um dieses Prinzip in Feldtests weiter zu untersuchen. Dadurch kann ein Teil der Sensorik eingespart werden. Es hat sich zwar herausgestellt, dass die Kraftmessung der Linearantriebe nicht über den Motorstrom realisiert werden kann, jedoch wäre ein reiner Kraftsensor leichter zu handeln. Die entsprechende Sensorik könnte dann an einer anderen, nicht rotierenden Position platziert werden. Dies würde die Systemverkabelung vereinfachen und dessen Robustheit gegen industrielle Umwelteinflüsse erhöhen. Da der Großteil der Bewegungsabläufe über die Sensorik gesteuert wird, kann auch über den Einsatz von Gleichstrommotoren anstelle der Schrittmotoren nachgedacht werden. Dies würde die Belastungsmessung über den Motorstrom vereinfachen. Außerdem kann untersucht werden, wie sich der Motorstrom bei durch Gleichstrommotoren angetriebenen Linearmodulen bei Belastung verhält. Im Zusammenhang mit der Arbeit wäre weiterführend auch die Aufzeichnung und Auswertung der Sensordaten interessant. Dadurch kann die Möglichkeit einer auf Sensordaten basierenden Qualitätskontrolle der Stufenschalter untersucht werden.

Diese Arbeit zeigt, dass Automatisierung nicht nur in standardisierten Bereichen möglich ist, sondern auch in Branchen mit individueller Fertigung. Mit Hilfe von mechatronischen Anlagen lassen sich bestimmte Tätigkeiten auch hier erfolgreich autonom durchführen. Dies kann zu einem enormen Wettbewerbsvorteil führen. Der Erfolg dieses Unterfangens hängt jedoch nicht allein von der Automatisierungstechnik ab, sondern beginnt schon bei der Produktentwicklung. Um den Automatisierungsgrad der Produktion zu steigern, ist dies schon beim Produktdesign zu berücksichtigen. In diesem spezifischen Bereich wäre dies z.B. die Reduktion der an den Transformatoren verbauten Stufenschalter-Typen. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass bestimmte Stufenschalter-Bauformen über einen anderen Schaltmechanismus verfügen und deshalb nicht mit derselben Umschaltvorrichtung bedient werden können. Bei einem auch nach diesen Aspekten entwickelten Produkt lassen sich die autonomen Fertigungsschritte mit geringerem technischem Aufwand und dadurch kosteneffizienter realisieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (21)

Kraaij, Schemel, Wegscheider (1983): Die Prüfung von Leistungstransformatoren, Buchverlag Elektrotechnik, Aarau.

Winders (2002): Power Transformers Principles and Applications, Marcel Dekker Inc., New York.

Carlson, Fuhr, Schemel, Wegscheider (2003): Testing of Power Transformers, 1. Auflage, Pro Print GmbH, Düsseldorf.

HAEFELY TEST AG (Hrsg.) (2011): Operating 2293 Winding Analyser, Tettex, Switzerland.

ELMEK A.S. (Hrsg.) (2011): Type KDF threephase tap changer, Istanbul.

Müller, Ponick (2006): Grundlagen elektrischer Maschinen, 9. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KG, Weinheim.

Fischer (2004): Elektrische Maschinen, 12. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Schröder (2013): Elektrische Antriebe - Grundlagen, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Bolte (2011): Elektrische Maschinen, Springer, Heidelberg.

Büchi (2012): Brushless-Motoren und -Regler, Verlag für Technik und Handwerk, Norderstedt.

Bergmann (2008): Elektrische Messtechnik, 6. Auflage, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden.

Basler (2015): Encoder und Motor-Feedback-Systeme, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Athani (1997): Stepper Motors: Fundamentals, Applications and Design, New Age International Ltd., New Delhi.

Igus GmbH (Hrsg.) (2019): Produktdatenblatt SLW-BB-1040-06-90, Köln.

Igus GmbH (Hrsg.) (2019): Handbuch V1.1 dryve D1 ST-, DC-, EC-Motorsteuerung, Köln.

Schrüfer (2006): Elektronische Messtechnik, 9. Auflage, Carl Hanser Verlag, München.

Keil (2016): Dehnungsmessstreifen, 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Spring (2009): Elektrische Maschinen, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Parthier (2007): Messtechnik, 4. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2011) DIN EN 50191 Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen, Berlin.

Siemens (Hrsg.) (2017) Systemhandbuch S7-1500/ET 200MP, Nürnberg.

Online-Quellen (4)

Igus (Hrsg.) (2019): Technisches Datenblatt drylin® E bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC), Köln.
https://www.igus.at/contentData/Products/Downloads/MOT-EC-x_EN.pdf [Stand: 13.09.2019]

Igus (Hrsg.) (2019): Technisches Datenblatt drylin® Schrittmotoren MOT-AN-S-EN, Köln.
<https://www.igus.at/contentData/Products/Downloads/MOT-AN-S-EN.pdf> [Stand: 13.09.2019]

ME-Meßsysteme GmbH (Hrsg.) (2019): Einführung in die Dehnungsmessstreifen-Technik, Hennigsdorf.
<https://www.me-systeme.de/docs/grundlagen/kb-straingage.pdf> [Stand: 29.09.2019]

Lorenz Messtechnik GmbH (Hrsg.) (2019): Datenblatt Mehrkomponentensensor M-2396, Alfdorf.
https://www.lorenz-messtechnik.de/pdfdatbl/mehrkomp/080590e_m-2396.pdf [Stand: 05.10.2019]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Bestehende Prüfzelle in der Fertigungslinie, Quelle: Eigene Darstellung.	3
Abb. 2: Kelvin-Thomas-Brücke, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.34.	5
Abb. 3: Verschiedene Schaltgruppen bei Dreiphasentransformatoren, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.43.	6
Abb. 4: Schaltgruppen Bestimmung mit einem Voltmeter, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.43.	7
Abb. 5: Übersetzungsmessung mit zwei Voltmetern, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.44.	8
Abb. 6: Digitale Übersetzungsmessbrücke, Quelle: Carlson/Fuhr/Schemel/Wegscheider (2003), S.46.	9
Abb. 7: Steuerung der Umschalteinrichtung, Quelle: HAEFELY TEST AG (2014), S. 170.	10
Abb. 8: Versuchsaufbau Vormessung, Quelle: HAEFELY TEST AG (2014), S. 170 (leicht modifiziert)...	10
Abb. 9: Einbau Stufenschalter bei Drehstromtransformatoren, Quelle: ELMEK A.S. (2011) (leicht modifiziert).	13
Abb. 10: Schematische Funktionsweise eines No-Load Tap-Changers mit 5 Stufen, Quelle: Winders (2002), S. 214 (leicht modifiziert).	13
Abb. 11: Verschiedene Bauformen des Griff-Typs, Quelle: Eigene Darstellung.	14
Abb. 12: Verschiedene Bauformen der Handrad-Typ-Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.	15
Abb. 13: Stufenschalter anderer Bauart, Quelle: Eigene Darstellung.	15
Abb. 14: Versuchsaufbau Vertikal-Kraft-Messung, Quelle: Eigene Darstellung.	17
Abb. 15: Versuchsaufbau Drehmomentmessung, Quelle: Eigene Darstellung.	18
Abb. 16: Einbauposition eines Stufenschalters, Quelle: Eigene Darstellung.	20
Abb. 17: Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 285.	21
Abb. 18: Erregungsarten der Gleichstrommaschine, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 291.	22
Abb. 19: Ankerstromumkehr mit Schütz, Quelle: Schröder (2013), S. 251.	23
Abb. 20: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie Drehzahlstellen durch Vorwiderstand, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 325.	23
Abb. 21: Drehzahlstellen durch Spannungsänderung - Kennlinie, Quelle: Müller/Ponick (2005), S. 333.	24
Abb. 22: Schaltwinkel Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.	24
Abb. 23: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie DC-Motor, Quelle: Igus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].	25
Abb. 24: Funktionsweise BLDC-Motor, Quelle: Büchi (2012), S. 16.	26

Abb. 25: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie BLDC, Quelle: Igus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].	26
Abb. 26: Funktion Hybrid-Schrittmotor, Quelle: Schörlin (1996), S.25.....	28
Abb. 27: Ansteuern eines Schrittmotors, Quelle: Athani (2005), S. 34.	29
Abb. 28: Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie Schrittmotor NEMA 23XL, Quelle: Igus (2019) Online-Quelle [Stand 13.09.2019].	29
Abb. 29: Funktionsweise Inkrementalgeber, Quelle: Bergmann (2016), S.325.	30
Abb. 30: Absolut Code, Quelle: Basler (2016), S. 17.	31
Abb. 31: Vertikal-Bewegung Stufenschalter, Quelle: ELMEK A.S. (2011) (leicht modifiziert).	33
Abb. 32: Gewindespindel-Lineartisch, Quelle: Igus (2019), S. 1 (leicht modifiziert).	34
Abb. 33: Lineartisch Momentbelastung, Quelle: Igus (2019), S. 1 (leicht modifiziert).	35
Abb. 34: Gesamtkonstruktion Antriebstechnik, Quelle: Eigene Darstellung.	36
Abb. 35: Dehnungsmessstreifen, Quelle: Keil (2016), S. 15.....	39
Abb. 36: Biegebalken-Kraft-Messaufnehmer, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].....	39
Abb. 37: Vollbrückenschaltung, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].....	40
Abb. 38: Positionierung von Dehnungsmessstreifen bei Momentmessung, ME-Meßsysteme GmbH (2018), Online-Quelle [Stand 29.09.2019].	40
Abb. 39: Mehrkomponentensensor M-2396, Lorenz Messtechnik (2019) Online-Quelle [Stand 05.10.2019].....	41
Abb. 40: Mehrkomponentensensor Einbau, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abb. 41: Motorstrom-/Drehmomentkennlinie Gleichstrommotor, Quelle: Spring (2009), S. 52.	44
Abb. 42: Igus D1 Motorsteuerung, Quelle: Igus (2019), S. 1.	45
Abb. 43: Umschaltung durch Vertikal-Spiel, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abb. 44: Potenziometrischer Wegsensor, Quelle: Parthier (2007), S. 135.	48
Abb. 45: Stufenschalter-Adapter, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Abb. 46: Gesamtkonstruktion Stufenschalter-Aufnahmeeinrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 47: Deckenanbindung-Umschaltvorrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Abb. 48: Deckenanbindung Höhenreduktion, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 49: Vorrichtung-Positionierung am Deckel, Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Abb. 50: Vorrichtung Deckelanbindung, Quelle: Eigene Darstellung.....	57

Abb. 51: Vorrichtung-Bemaßung, Quelle: Eigene Darstellung	58
Abb. 52: Prototyp Stufenschalter-Umschaltvorrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abb. 53: Skizze des Prüfplatzes, Quelle: Eigene Darstellung.....	61
Abb. 54: Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abb. 55: Aufbau Verteilerschrank, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abb. 56: Motion-Control-Bausteine; Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abb. 57: Gleichlauf-Baustein GEARIN, Quelle: Eigene Darstellung.	69
Abb. 58: Datenbaustein Parameter, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abb. 59: Ablaufdiagramm Identifikation Stufenschalter-Bauform, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 60: Ablaufkette Anheben, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Abb. 61: Ablaufkette Entspannung Stufenschalter, Quelle: Eigene Darstellung.....	74
Abb. 62: Ablaufkette Statusabfrage, Quelle: Eigene Darstellung.....	74
Abb. 63: Ablaufkette Identifikation grünen Schalter, Quelle: Eigene Darstellung.	75
Abb. 64: Ablaufkette Identifikation grauer Schalter, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Abb. 65: Ablaufdiagramm Schaltprogramm, Quelle: Eigene Darstellung.	77
Abb. 66: Ablaufkette Drehen aus Arretierungsposition, Quelle: Eigene Darstellung.	78
Abb. 67: Ablaufkette Ablegen zwischen zwei Stufenpositionen, Quelle: Eigene Darstellung.....	79
Abb. 68: Abbruchfunktion Drehbewegung, Quelle: Eigene Darstellung.....	79
Abb. 69: Ablaufkette Kontrolle Spielposition, Quelle: Eigene Darstellung.	80
Abb. 70: Schaltversuche mit unterschiedlichen Stufenschalter-Bauformen, Quelle: Eigene Darstellung.	81
Abb. 71: Konfiguration Analogausgänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Abb. 72: Strom/Moment-Diagramm Getriebemotor Open-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.	83
Abb. 73: Strom/Moment-Diagramm Getriebemotor Closed-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.....	84
Abb. 74: Strom/Moment-Diagramm Linearantrieb Open-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.	85
Abb. 75: Strom/Moment-Diagramm Linearantrieb Closed-Loop, Quelle: Eigene Darstellung.....	85

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Prozessschritte der Aktivteil-Vormessung, Quelle: Eigene Darstellung.	11
Tab. 2: Messergebnisse Kraft und Drehmoment, Quelle: Eigene Darstellung.	19
Tab. 3: Gegenüberstellung Antriebstechnik, Quelle: Eigene Darstellung.	32
Tab. 4: Kalibrierung der Messverstärker, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Tab. 5: Benötigte Analog-Eingänge, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Tab. 6: Benötigte Analog-Ausgänge, Quelle: eigene Darstellung.	63
Tab. 7: Benötigte Digital-Eingänge, Quelle: eigene Darstellung.	63
Tab. 8: Benötigte High-Speed-Counter-Eingänge, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Tab. 9: Benötigte Digital-Ausgänge, Quelle: eigene Darstellung.	64
Tab. 10: Benötigte Pulse-Train-Outputs, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Tab. 11: Kompakt-CPU Systemübersicht, Quelle: Siemens AG (2017), S. 50.	66
Tab. 12: Programmtechnisch relevante Stufenschalter-Bauformen, Quelle: Eigene Darstellung.	71

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor
DC	Gleichstrom
DMS	Dehnmessstreifen
FUP	Funktionsplan
KOP	Kontaktplan
OB1	Organisationsbaustein 1
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TIA	Totally Integrated Automation
NV	Nieder Volt
HV	Hoch Volt
PTO	Pulse Train Output
HSC	High Speed Counter
VR	Variable reluctance stepping motor
PM	Permanent magnet stepping motor
CAN	Controller Area Network