

# Konzeption, Projektierung und Inbetriebnahme eines mehrachsigen Positioniersystems

---

Bachelorarbeit

Name des Studiengangs

Elektrotechnik

Fachbereich 1

vorgelegt von

Aaron Zielstorff

Datum:  
Berlin, 20.10.2021

Erstgutachter\_in: Herr Prof. Dr. Stephan Schäfer  
Zweitgutachter\_in: Herr Dipl.-Ing. Dirk Schöttke

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Problemstellung . . . . .	1
1.3 Zielsetzung und Erkenntnisse . . . . .	2
1.4 Forschungsstand und theoretische Grundlage . . . . .	3
1.5 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Konzeption</b>	<b>4</b>
2.1 Anforderungsanalyse . . . . .	4
2.1.1 Funktionale Anforderungen . . . . .	6
2.1.2 Nicht-funktionale Anforderungen . . . . .	20
2.2 Identifikation der Stakeholder . . . . .	35
2.3 Vorstellung der Laboranlage . . . . .	37
2.3.1 Aufbau des Positioniersystems . . . . .	37
2.3.2 Betriebsumgebung . . . . .	38
2.3.3 Vernetzung des Systems . . . . .	40
2.3.4 Betriebsmodi . . . . .	40
2.4 Bedienkonzept . . . . .	45
2.4.1 Bedienung über Hardwarekomponenten . . . . .	45
2.4.2 Bedienung per GUI . . . . .	46
<b>3 Projektierung</b>	<b>49</b>
3.1 Kontextanalyse . . . . .	49
3.2 Anwendungsfallspezifikation . . . . .	54
3.2.1 Entwicklung der Systemprozesse . . . . .	54
3.2.2 Präzisierung der Systemprozesse . . . . .	55
3.3 Verhaltensspezifikation . . . . .	63
3.4 Partitionierung . . . . .	68
3.4.1 Erster Partitionierungsschritt . . . . .	68
3.4.2 Zweiter Partitionierungsschritt . . . . .	70
3.4.3 Dritter Partitionierungsschritt . . . . .	71
3.5 Testspezifikation . . . . .	76

3.6	Stromlaufplan . . . . .	90
3.7	Datenmodell . . . . .	94
3.8	Funktionale Sicherheit . . . . .	99
<b>4</b>	<b>Inbetriebnahme</b>	<b>102</b>
4.1	Implementationsphase . . . . .	102
4.1.1	Hardware-Implementation . . . . .	103
4.1.2	Software-Implementation . . . . .	107
4.2	Verifizierung der Testspezifikation . . . . .	123
4.2.1	Sichtprüfung . . . . .	124
4.2.2	Prüfung der Elektrik . . . . .	125
4.2.3	Prüfung der Geräteparametrierung . . . . .	127
4.2.4	Prüfung der Programmfunctionen . . . . .	128
4.3	Korrekturen und Verbesserungen . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>136</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>138</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>140</b>
Bücher . . . . .		140
Artikel . . . . .		142
<b>Anhang</b>		<b>143</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung</b>		<b>158</b>

Fachbereich 1 Ingenieurwissenschaften - Energie und Information

## **Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit**

**Name, Vorname:** Zielstorff, Aaron

**Matrikel-Nr.:** 567183

**Studiengang:** ET (B)

**Semester:** SoSe 2021

### **Thema der Bachelorarbeit:**

Konzeption, Projektierung und Inbetriebnahme eines mehrachsigen Positioniersystems

1. Prüfer/in:	Schäfer, Stephan (Prof.)
Bearbeitungsbeginn:	16.6.2021
Bearbeitungsende:	25.8.2021

Die Prüfungskommission besteht aus:	
1. Prüfer/in:	Schäfer, Stephan (Prof.)
2. Prüfer/in:	Schöttke, Dirk
Vorsitzende/r:	Schäfer, Stephan (Prof.)

### **Anmerkungen:**

Bitte beachten Sie, dass eine Rückmeldung für das nächste Semester zwingend erforderlich ist, wenn Ihre Abschlussarbeit nicht mehr im laufenden Semester abgegeben wird.

Fällt das Ende der Bearbeitungszeit auf einen Sonnabend, Sonntag oder einen gesetzlichen Feiertag, ist die Abschlussarbeit am darauffolgenden Werktag abzugeben.

Bitte beachten Sie aus aktuellem Anlass die Änderungen hinsichtlich der Abgabe Ihrer Abschlussarbeit auf den [FAQ-Seiten](#) (klickbarer Link) zum Thema „Corona-Virus“

# Abbildungsverzeichnis

1	Analysephasen	5
2	Konfigurator	37
3	Laborraum	39
4	Netzwerkstruktur	40
5	Bedienpanel	46
6	Visualisierung zur Bedienung	47
7	GUI zur Bedienung	47
8	Logische Kontextabgrenzung	51
9	Physikalische Kontextabgrenzung	52
10	Anwendungsfalldiagramm	55
11	Zustandsdiagramm Automatikmodus	64
12	Zustandsdiagramm Handmodus	65
13	Zustandsdiagramm Programmänderungen	66
14	Zustandsdiagramm Prozessdaten	67
15	Erster Partitionierungsschritt	69
16	Zweiter Partitionierungsschritt	70
17	Dritter Partitionierungsschritt	71
18	Netzteilverdrahtung	90
19	Steuerkreis Servoregler	92
20	Lastkreis Servoregler	93
21	Risikograph	100
22	Anlagengerüst	103
23	Steuerungsinstallation	104
24	Aktuator- und Sensorinstallation	105
25	Schalschrank	106
26	Geräteaddressierung	108
27	Globale Variablenliste	109
28	Zuweisung der digitalen Eingänge des TM5SDI16D Moduls	110
29	Zuweisung der digitalen Ausgänge des TM5SDO16T Moduls	110
30	Zuweisung der sicheren digitalen Eingänge des TM5SDI4DFS Moduls	111
31	Zuweisung der sicheren digitalen Ausgänge des TM5SDO4TFS Moduls	111
32	Zuweisung der analogen Eingänge des TM5SAI4L Moduls	112
33	Zuweisung der analogen Ausgänge des TM5SAO4L Moduls	112
34	Zuweisung der Variablen für den Datentransfer vom SLC zum LMC	113
35	Zuweisung der Variablen für den Datentransfer vom LMC zum SLC	113
36	Einstellen der Bewegungsparameter für langsame manuelle Testfahrt	114
37	Parametrierung des Motors für die x-Achse	114
38	Parametrierung der Mechanik für die x-Achse	114
39	Einbinden der Endlagesensoren	115

40	Konfiguration des Netzteils . . . . .	116
41	Deaktivierung der Netzüberwachung . . . . .	116
42	I/O-Konfiguration des SLC . . . . .	117
43	Hardwareprüfung der sicheren E/A-Module . . . . .	118
44	Sicherer SF_Antivalent Funktionsbaustein für die Verarbeitung der Not-Halt-Auslösung . . . . .	119
45	Verarbeitung des Not-Halt-Signals und der Lichtvorhangssignale . . . . .	119
46	Zuweisung der Not-Halt-Variable im LMC . . . . .	121
47	Prüfablauf . . . . .	123

# Tabellenverzeichnis

1	FA - EIN-Schalter . . . . .	8
2	FA - Wahlschalter Betriebsmodus . . . . .	9
3	FA - START-Taster . . . . .	10
4	FA - Bewegungssteuerung im Handmodus . . . . .	11
5	FA - Greifen von Transportobjekten im Handmodus . . . . .	12
6	FA - RESET-Taster . . . . .	13
7	FA - Regulierung der Fahrgeschwindigkeit . . . . .	14
8	FA - Abarbeitung Automatikmodus . . . . .	15
9	FA - Anpassung des Fahrverhaltens . . . . .	16
10	FA - Positionieren auf zwei Achsen . . . . .	17
11	FA - Bremsen der Achsbewegungen . . . . .	18
12	FA - Nutzung induktiver Endlagesensoren . . . . .	19
13	FA - Entschleunigung in Endlagenähe . . . . .	20
14	NFA - Reaktionszeit des Lichtvorhangs . . . . .	22
15	NFA - Abschaltzeit des Servoreglers . . . . .	23
16	NFA - Bremsdauer der Achsen . . . . .	24
17	NFA - Ausfallhäufigkeit . . . . .	25
18	NFA - Programmierschnittstelle . . . . .	25
19	NFA - OPC UA Schnittstelle . . . . .	26
20	NFA - Sicherheit für Leib und Leben . . . . .	27
21	NFA - Signalisierung Gefahrensituation . . . . .	28
22	NFA - Verhinderung von Schäden an der Anlage . . . . .	29
23	NFA - Gehäuseaufbau . . . . .	30
24	NFA - Kabelmitführung . . . . .	31
25	NFA - Betriebsstrommessung . . . . .	32
26	NFA - räumliche Vorgabe . . . . .	33
27	NFA - Hardwarevorgaben . . . . .	34
28	Stakeholder . . . . .	36
29	Systemprozess - Positionieren . . . . .	58
30	Systemprozess - manuelle Funktionsausführung . . . . .	59
31	Systemprozess - Programmänderungen vornehmen . . . . .	61
32	Systemprozess - Prozessdaten bereitstellen . . . . .	62
33	Knotenpunktbeschreibung - Anlagenteil . . . . .	73
34	Knotenpunktbeschreibung - Hardware . . . . .	74
35	Knotenpunktbeschreibung - Software . . . . .	75
36	TF - Vollständigkeitsprüfung . . . . .	77
37	TF - Verdrahtungsprüfung . . . . .	78
38	TF - Hardwarekonfigurationsprüfung . . . . .	79
39	TF - Handmodus . . . . .	81

40	TF - Automatikmodus . . . . .	82
41	TF - Geschwindigkeitsvorgabe . . . . .	83
42	TF - Endlagenfunktion . . . . .	84
43	TF - Funktionale Sicherheit . . . . .	85
44	TF - Reset-Funktion . . . . .	86
45	TF - Programmierschnittstelle . . . . .	87
46	TF - OPC UA Kommunikation . . . . .	88
47	TF - Signalampel . . . . .	89
48	Datenmodell digitale Eingänge . . . . .	95
49	Datenmodell digitale Ausgänge . . . . .	96
50	Datenmodell Analoge Eingänge . . . . .	96
51	Datenmodell Analoge Ausgänge . . . . .	96
52	Datenmodell sichere digitale Eingänge . . . . .	97
53	Datenmodell sichere digitale Ausgänge . . . . .	97
54	Datenmodell interne Variablen SLC2LMC . . . . .	98
55	Sichtprüfung . . . . .	125
56	Prüfung der Elektrik . . . . .	127
57	Prüfung der Geräteparametrierung . . . . .	128
58	Prüfung Handmodus . . . . .	129
59	Prüfung Automatikmodus . . . . .	129
60	Prüfung Geschwindigkeitsvorgabe . . . . .	130
61	Prüfung Endlagenfunktionalität . . . . .	130
62	Prüfung funktionale Sicherheit . . . . .	131
63	Prüfung Reset-Funktion . . . . .	131
64	Prüfung Programmierschnittstelle . . . . .	132
65	Prüfung OPC Kommunikation . . . . .	132
66	Prüfung Signalampel . . . . .	133

# **Abkürzungsverzeichnis**

**FA** Funktionale Anforderung

**NFA** Nicht-Funktionale Anforderung

**AR** Augmented Reality

**VR** Virtual Reality

**HMI** Human Machine Interface

**MMS** Mensch-Maschine-Schnittstelle

**LMC** Logic Motion Controller

**LXM** Lexium

**OPC** Open Plattform Communications

**UA** Unified Architecture

**ID** Identifikationsnummer

**SPS** speicherprogrammierbare Steuerung

**HTW** Hochschule für Technik und Wirtschaft

**UML** Unified Modeling Language

**RE** Requirements Engineering

**BMK** Betriebsmittelkennung

**E/A** Eingang/Ausgang

**TA** Taster

**Rtg.** Richtungsgeber

**NA** nicht angeschlossen

**Poti** Potentiometer

**SLC** Safety Logic Controller

**GUI** Graphical User Interface

**TF** Testfall

**KI** künstliche Intelligenz

---

# 1 Einleitung

Die heutige Zeit ist geprägt durch die Digitalisierung der Industrie und die Automatisierung sowohl industrieller als auch alltäglicher Prozesse. Geleitet durch die Automatisierungs-technik, die in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts aufkam, beeinflussen technische Systeme mittlerweile Großteile unseres Lebens [Abo16, Seite 10].

Mit der Erfindung des Transistors in den 60er-Jahren kam es zum Boom der Computertechnik. So auch wurde die wichtigste Komponente für moderne Industrieanlagen zur Realität. Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), ein programmierbares Steuerelement, ermöglichte es zu jedem Zeitpunkt das Verhalten eines Prozesses vorzugeben. Bislang waren verbindungsprogrammierbare Steuerungen (VPSen), die fest verdrahtet waren, Stand der Entwicklung. Nunmehr konnten ganze Fabriken mit der gleichen Steuerung betrieben werden [HLG19, Seite 326].

Durch den Einzug der SPS in die Industrie wurde es erforderlich, Computerprogramme zu schreiben, um Prozesse zu automatisieren. Für die Entwicklung der Software solcher Systeme wurde die Norm IEC 61131 verabschiedet, die als Richtlinie zur SPS Programmierung zu verstehen ist [Com98].

## 1.1 Motivation

Die erfolgreiche Entwicklung von Automatisierungssystemen im industriellen als auch privaten Sektor stellt die Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg im Konkurrenzkampf der großen Industrienationen dar. Sowohl die Qualität des Endprodukts als auch die Effektivität des Prozesses ist entscheidend für den Mehrwert eines Systems. Somit sollte bereits in der technischen Ausbildung zukünftiger Ingenieure das Vorgehen zum anforderungsorientierten Entwickeln von Systemen und deren Software im Mittelpunkt stehen [And17, Seite V].

Trotz der Erkenntnis, dass Top-Down Design durch Objekt-orientiertes Design zu ersetzen gilt, haben vor allem Unternehmen, deren Wurzeln im Hardwareentwurf liegen, Probleme beim Softwareengineering in der Automatisierungstechnik. Besonders die Projektanfangsphase, welche im englischen als Requirements Engineering bezeichnet wird, ist entscheidend für den Erfolg der Umsetzung eines solchen Systems [Lap14, Seite 1].

## 1.2 Problemstellung

Im Rahmen eines Praktikums an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (im Folgenden abgekürzt mit HTW) ist über einen Zeitraum von einem Jahr ein Positioniersystem in einem Laborraum der Hochschule konstruiert worden. Dieses besteht aus zwei Achsen und soll über einen Motioncontroller gesteuert werden.

Die Arbeit befasst sich mit der Konzeption des Automatisierungssystems, mit dessen Projektierung und der Inbetriebnahme. Dabei soll die Anlage anforderungsorientiert konzipiert

werden.

### 1.3 Zielsetzung und Erkenntnisse

Ziel der Arbeit ist es, ein Positioniersystem zu entwickeln, welches von jedem Laborplatz aus genutzt werden kann, um verschiedenste anlagenspezifische Testszenarien zu erproben, wie beispielsweise das Fahren von Trajektorien. Dabei sollen aus dem Prozessablauf Daten generiert werden können. Das bedeutet konkret, dass über einen oder mehrere Kommunikationskanäle von der Anlage aus Daten zur Verfügung gestellt werden, um diese anschließend extern weiterzuverwenden.

#### Ziele der Arbeit:

- Analyse der Anforderungen an das Positioniersystem
- Aufstellen von Testkriterien für die ermittelten Anforderungen
- Entwickeln eines Konzeptes nach Handlungsempfehlungen bezüglich des Requirements Engineering
- Darstellen der Anlagenprojektierung unter Nutzung von Modellen (UML)
- Implementieren der Modelle als Automatisierungssoftware mit dem „MachineExpert LogicBuilder“ unter Beachtung der Norm DIN/EN 61131
- Inbetriebnahme des Systems unter Prüfung der festgelegten Testkriterien
- Bereitstellen von Prozess- und Maschinendaten für die Weiterverarbeitung
- Bereitstellen von Schnittstellen für die Bedienung und Programmierung von jedem Laborplatz

Es wird erwartet, dass die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass mithilfe des Requirements Engineering und der Anlagenprojektierung erfolgreich ein Positioniersystem entwickelt werden kann, dass die Anforderungen an Selbiges erfüllt.

Dabei werden die Zugriffsmöglichkeit auf die Anlage von jedem Laborplatz und das Generieren sowie Bereitstellen von anlagenspezifischen Daten als die grundlegenden Anforderungen ermittelt.

Die Inbetriebnahme am Ende der Arbeitsphase beinhaltet das erfolgreiche Verifizieren der Testkriterien nach eventuellen Verbesserungen der implementierten Modelle aus der Projektierungsphase.

## 1.4 Forschungsstand und theoretische Grundlage

Die Thematik Requirements Engineering wurde in der Literatur bereits behandelt und es existieren einige Quellen, die Handlungsempfehlungen zur Anwendung der Thematik beinhalten. Dennoch wird das Requirements Engineering noch zu selten angewendet, trotz der bekannten monetären und zeitlichen Vorteile [Lap14, Seite xvii]. Die Methodik gilt als erfolgreiches Mittel, um mögliche Nachbearbeitungen von Software zu vermindern und die Kosteneffizienz zu verbessern [Lap14, Seite 1].

Grundlegend kann die Vorgehensweise in zwei Schritte unterteilt werden, die „Artificial Development Sequence“ (künstliche Entwicklungssequenz) und die „Engineering Activity Sequence“ (Aktivitätsentwicklungssequenz). Erste beschäftigt sich mit dem Aufstellen der Nutzer- und Systemanforderungen sowie mit den Systemdesign-Spezifikationen. Letztere beinhaltet das Testen der Anforderungen nach der Systementwicklung [Lap14, Seite 6]. Auch die Anlagenprojektierung ist in der Literatur bereits thematisiert worden und es existieren Empfehlungen für die Umsetzung dieser. Die Projektierung ist die Gesamtheit aller Entwurfs-, Planungs- und Koordinierungsmaßnahmen, mit denen die Umsetzung eines Automatisierungsprojektes vorbereitet wird [Tho17, Seite 8].

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in drei Teile unterteilt.

- Konzeption
- Projektierung
- Inbetriebnahme

Die Konzeption beinhaltet die Aufstellung der Systemintentionen aus den Anforderungen von den für das System relevanten Personen (Stakeholder). Die Dokumentation und Kategorisierung der Anforderungen findet in der Anforderungsanalyse statt.

In der Projektierung wird die Modellierung des Systemverhaltens vorgenommen. Dabei steht vor allem die Entwicklung der Systemsoftware im Mittelpunkt.

Die Inbetriebnahme ist der letzte Schritt in der Realisierung des Systems. Es gilt die Modelle aus der Projektierungsphase zu implementieren und die Erfüllung der Anforderungen unter Nutzung von Testkriterien zu verifizieren.

---

## 2 Konzeption

Dieses Kapitel unterteilt sich in vier Abschnitte. Die Konzeptionierung der Laboranlage erfolgt nach dem Requirements-Engineering, welches als Grundlage im vorhergegangenen Kapitel bereits kurz behandelt wurde.

Im ersten Unterkapitel wird die Anforderungsanalyse durchgeführt. Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf dem Software- und Systementwicklungsprozess.

Der Entwicklungsprozess unter dem Gesichtspunkt der Konzeption des Systems umfasst dabei zwei Kernabschnitte, welche sich in die Anforderungsphase des Entwicklungsprozesses eingliedern. Bei den Kernabschnitten handelt es sich um folgende Analyseschwerpunkte.

- **Anforderungsanalyse:** Es wird unterschieden zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das System.
- **Identifikation der Stakeholder:** Ermittlung aller an der Systementwicklung und Systemnutzung beteiligten Personen zur Feststellung von Randbedingungen an die Anforderungen.

Der dritte Abschnitt dient zum Grobentwurf des Hardwareaufbaus des Positioniersystems. Dazu wird eine Konzeptgrafik entwickelt, die als Konfigurator zu verstehen ist. Weiterhin werden die geplanten Betriebsmodi beschrieben, die in der Projektierung dieser Arbeit zu modellieren sind.

Der letzte Abschnitt der Konzeptionsphase beinhaltet die Erstellung eines Bedienkonzeptes für die Laboranlage. Dabei wird sowohl auf die Bedienung über Eingabetaster an der Anlage selbst eingegangen, als auch eine dezentralisierte Bedienung über netzwerkfähige Endgeräte, wie unter anderem die Laborcomputer, die sich im selben Raum wie das Positioniersystem befinden.

### 2.1 Anforderungsanalyse

In der Analysephase der Systementwicklung werden die Kundenanforderungen zusammengetragen und untersucht. Dabei stellt die Anforderungsanalysephase den ersten Schritt zum Aufstellen der initialen Dokumente für den Prozess dar [Rud99, Seite 333]. In weiteren Iterationen liegen der Anforderungsanalyse zusätzlich zu der ursprünglichen Aufgabenstellung noch die Ergebnisse der Tests und die erkannten Analysefehler ebenfalls als Quelle vor.

Die ermittelten Anforderungen werden untergliedert in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen (kurz **FAs** und **NFAs**) [Rud99, Seite 337]. Diese Unterteilung findet in der Arbeit in separaten Unterabschnitten statt, die sich nachfolgend anschließen. Die Identifikation der Stakeholder ist grundsätzlich der Anforderungsanalyse zugehörig, wird jedoch in einem gesonderten, sich der Anforderungsanalyse anschließenden, Unterkapitel behandelt,

da es sich im Kontext des Konzeptionsteils dieser Arbeit um einen Kernabschnitt handelt. Zur übersichtlichen Einordnung des jeweiligen Analyseschrittes wird die Grafik Analysephase eingeführt, an der sich die folgenden Kapitel entlangbewegen. Die Anforderungsanalyse kann auf der linken Seite der Grafik identifiziert werden und untergliedert sich in die bereits erwähnten drei Unterpunkte.

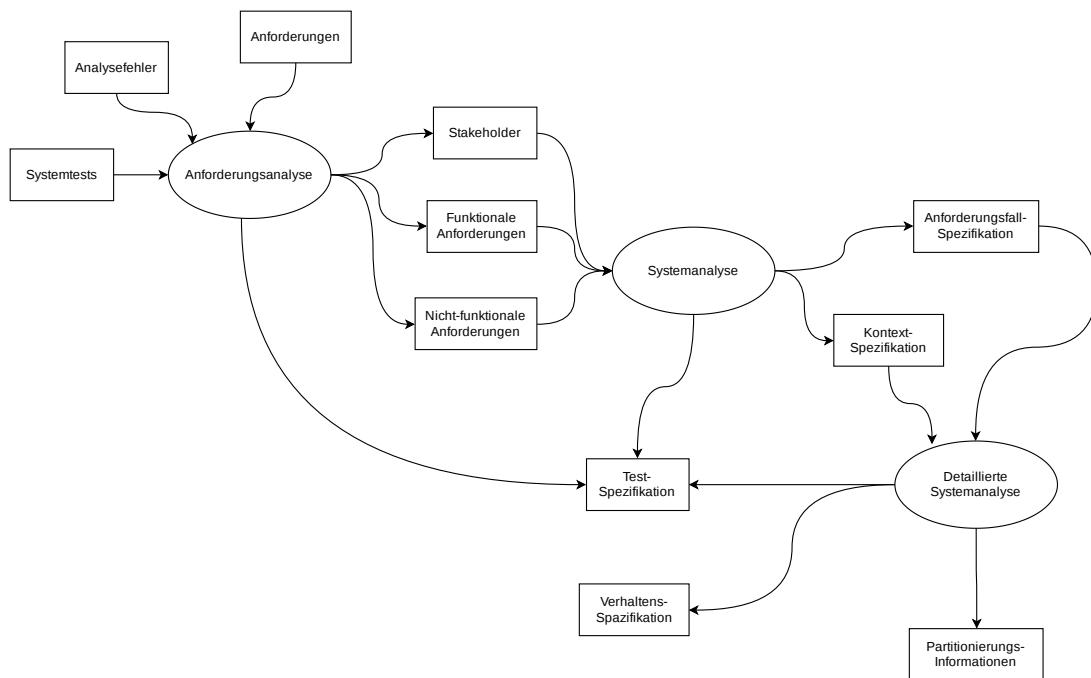


Abbildung 1: Diagramm - Analysephasen des Systementwicklungsprozesses [Wal05, Seite 42]

Die folgenden Abschnitte betrachten die Erstellung einer konkreten Anforderungsspezifikation, die zum Startbeginn des Entwicklungsprozesses vorliegen muss. In den Unterabschnitten zu den Funktionale Anforderungen (FAs) und Nicht-Funktionale Anforderungen (NFAs) werden die notwendigen Anforderungen für die Entwicklung der Laboranlage vorgestellt.

Aus der theoretischen Grundlagen bereits erkenntlich, bestehen Anforderungen aus Zielen, die im Rahmen der Entwicklung erreicht werden sollen. Dabei handelt es sich um einfachen Text, der nach Absprachen mit dem Kunden dokumentiert wird. Konkret geht es im Fall dieser Arbeit um die definierten Aufgaben und Ziele, welche durch Professoren/innen und Laboringenieure/innen bzw. Mitarbeiter/innen des Fachbereiches aufgestellt wurden. Auch selbstaufgerlegte Aufgaben (Anforderungen des Systementwicklers) werden mit aufgeführt. Im ersten Schritt ist es notwendig die Menge aller Aufgaben zu konkretisieren, um überflüssige und irrelevante Lösungen diese betreffend zu vermeiden.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des mehrachsigen Positioniersystems sind folgende

Kernanforderungen bzw. Ziele. Es wird gefordert, eine Laboranlage zu entwickeln, die simple Transportgüter sicher von einer Aufnahmeposition zu einem Ablageort transportieren kann. Dies soll über zunächst zwei Achsen geschehen, die es ermöglichen Bewegungen in horizontale Richtung (x-Achse) und vertikale Richtung (z-Achse) durchzuführen. Dabei ist es relevant, dass verschiedene Trajektorien von der Anlage gefahren werden können, welche durch den Nutzer programmatisch vorgegeben werden. Die Bewegung der Achsen erfolgt über zwei getrennt ansteuerbare Servomotoren, die über einen Servoregler mit einer Industriesteuerung verbunden sind. Die Steuerungskomponenten sind bereits vorhanden und müssen verwendet werden. Konkret handelt es sich um den LMC400c (Logic Motion Controller) von Schneider Electric, das LXM 62P Netzgerät (engl. Powersupply, ebenfalls von Schneider Electric) und den LXM 62D Doppelantrieb (engl. Double Drive). Zusätzlich soll eine PFC200 Steuerung von Wago zum Einsatz kommen, mit der Betriebsströme gemessen und für die Weiterverarbeitung bereitgestellt werden können. Weiterhin sollen auch ausgewählte Prozessdaten aus dem Systemablauf für die externe Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Es ist vorgegeben, dass diese Daten per Open Platform Communications (OPC) Unified Architecture (UA) Schnittstelle ausgelesen werden können. Kernziel bei der Entwicklung des Laborsystems ist es die Möglichkeit bereitzustellen, dass die Positioniereinheit von jedem Laborplatz programmiert und als Testsystem für den Lehrzweck eingesetzt werden kann. Für den Betrieb der Anlage sind zwei Betriebsmodi vorgesehen. Ersterer, der Automatikbetrieb soll einen vollautomatischen Prozessablauf ermöglichen, bei welchem eine konkrete Positionieraufgabe zyklisch durchgeführt wird. Zweiterer, der Handbetrieb, nimmt manuelle Steuerbefehle vom Nutzer entgegen, bei welchen über Tastereingaben an der Laboranlage, Fahrbewegungen entlang der beiden Achsen durchgeführt werden können. Die Auswahl bzw. ein Wechsel zwischen den Betriebsmodi, ist über einen Wahltafel zu implementieren. Außerdem ist ein Schutz für die Anlage und deren Nutzer, sowie sich um das Positioniersystem befindende Personen zu implementieren. Der Schutz ist manuell auslösbar über Not-Halt Taster an der Laboranlage und durch einen Lichtvorhang vor dem Fahrbereich der beiden Achsen. Abschließend wird gefordert, dass es zu einem späteren Zeitpunkt noch möglich ist, das System um weitere Achsen und Peripheriegeräte wie bspw. Förderbänder zu erweitern.

### 2.1.1 Funktionale Anforderungen

Der erste Unterabschnitt der Anforderungsanalyse behandelt die Modellierung der funktionalen Anforderungen des Prozesses. Im Requirements Engineering beschreiben funktionale Anforderungen gewünschte Funktionalitäten des Systems. Konkret steht im Mittelpunkt der Analyse, welche Fähigkeiten das System besitzen soll bzw. was es umgangssprachlich formuliert tun kann. Die Auflistung der Anforderungen ist eine Sammlung von systemspezifischen Daten, sowie eine grundlegende Beschreibung des Systemverhaltens [Rud99, Seite 338].

Die Dokumentation der funktionalen Anforderungen erfolgt typischerweise in Tabellenform.

Bereits in den Anforderungen wird ein Abnahmekriterium für diese formuliert, um bei der Inbetriebnahme des Systems die Erfüllung der Anforderung bestätigen oder widerlegen zu können [Kle13, Seite 55].

Die Nachfolgenden Tabellen zu den funktionalen Anforderungen sind wie folgt strukturiert. Der erste Eintrag, die **Identifikationsnummer** (kurz ID) dient zum späteren Referenzieren und leichterem Nachschlagen einer Anforderung. Sie ist hilfreich, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden und eine eindeutige Identifizierung sicherzustellen. Im nächsten Punkt, der **Beschreibung**, wird zunächst in kurzer Textform die Anforderung an das System formuliert. Der Eintrag **Begründung** enthält Informationen zur Relevanz der Anforderung, die in der Tabelle beschrieben wird. Dem Punkt **Abhängigkeit** unterliegt eine besondere Wichtigkeit, da hier alle Anforderungen aufgelistet sind, die auf der in der Tabelle beschriebenen Anforderung basieren bzw. in direkter Abhängigkeit zu dieser stehen. Im nächsten Punkt, dem **Abnahmekriterium** findet eine Erklärung zur Überprüfung der Umsetzung behandelter Anforderung statt. Die Tabellenzeile **Quelle** verweist auf einen oder mehrere Einträge in der Stakeholdertabelle, welche im Unterabschnitt 2.2 vorgestellt wird. Bei Nachfragen zu der jeweils behandelten funktionalen Anforderung ist die Tabelle zur Klärung durch den Prozessentwickler heranzuziehen [Kle13, Seite 56].

Die nachfolgenden Tabellen folgen dem beschriebenen Muster und beinhalten alle funktionalen Anforderungen des mehrachsigen Positioniersystems.

Begonnen wird mit funktionalen Anforderungen die Steuerung und Bedienung das System betreffend. Dabei steht im Zentrum der Anforderungsanalyse zunächst die Interaktion des Nutzers mit dem Positioniersystem. Die ersten sieben Anforderungen beschreiben die Hardwareelemente am Schaltschrank und die Reaktionen des Systems nach Betätigung der Bedienelemente.

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_01
<b>Beschreibung</b>	Das Positioniersystem soll über einen dedizierten Einschalter unter Spannung gesetzt werden können.
<b>Begründung</b>	Es wird verlangt, bei Nichtnutzung des Systems dieses zu deaktivieren um das Gefahrenrisiko zu minimieren.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Auswahl des Betriebsmodus (siehe Tabelle 2 FA_02).</li><li>• Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 NFA_07 und Tabelle 22 NFA_09).</li></ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Die Steuerungskomponenten fahren hoch, was über das Aufleuchten der <i>Power-LED</i> am LMC bestätigt werden kann. Weiterhin leuchtet der rote <i>STOP-Taster</i> (Signalisiert den gestoppten Zustand des Systems).
<b>Quelle</b>	Laborpersonal siehe Stakeholderliste

Tabelle 1: Funktionale Anforderung - Ein-Schalter

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_02
<b>Beschreibung</b>	Über einen Wahlschalter soll der Betriebsmodus des mehrachsigen Positioniersystems vorgegeben werden können.
<b>Begründung</b>	Es ist hilfreich die Auswahl zwischen dem Normalbetrieb (Automatikbetrieb) und einem sogenannten Handbetrieb zu haben, in dem das System einfacher kalibriert und auf seine Funktionalität geprüft werden kann.
<b>Abhängigkeit</b>	Auswahlbestätigung des Betriebsmodus über <i>START-Taster</i> (siehe Tabelle 3 FA_03)
<b>Abnahmekriterium</b>	Auswahl des Handmodus wird über das Aufleuchten der weißen Taster am Schaltschrank indiziert. Die Visualisierung zeigt den aktuellen Betriebsmodus als grün hinterlegt.
<b>Quelle</b>	Prozessentwickler siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 2: Funktionale Anforderung - Wahlschalter Betriebsmodus

---

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_03
<b>Beschreibung</b>	Über einen grünen <i>START-Taster</i> soll der ausgewählte Betriebsmodus bestätigt bzw. ausgeführt werden. Der <i>START-Taster</i> dient gleichzeitig auch als <i>RESET-Taster</i> , um nach einem Not-Halt-Ereignis das System wieder zu reaktivieren (resetten).
<b>Begründung</b>	Über die Auswahlbestätigung des Modus kann sicher gestellt werden, dass nicht versehentlich der Modus gewechselt wurde (zweistufige Bestätigung). Das Reaktivieren des Positioniersystems nach einem Fehler erfolgt über den gleichen Taster (gleiche Funktionalität).
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resetten des Systems nach Not-Halt (siehe Tabelle 6 FA_06).</li> <li>• Abarbeitung des Automatikmodus (siehe Tabelle 8 FA_08).</li> <li>• Betriebsbereitschaft im Handmodus (Erwarten von Eingabebefehlen siehe Tabelle 4 FA_04 und Tabelle 5 FA_05)</li> </ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	<i>START-Taster</i> leuchtet grün auf und roter <i>STOP-Taster</i> erlischt. Falls die Auswahl des Automatikmodus bestätigt wurde, beginnt die Abarbeitung der einzelnen Schritte des Normalbetriebs. Wurde der Handmodus ausgewählt, können nun über die vier schwarzen Richtungsgeber-Taster oder die zwei weiß leuchtenden Taster am Schaltschrank manuell Anlagenfunktionen aktiviert bzw. ausgeführt werden.
<b>Quelle</b>	Studenten siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 3: Funktionale Anforderung - START-Taster

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_04
<b>Beschreibung</b>	Über Tastereingaben an einem Vier-Wege-Richtungsgeber soll es möglich sein die beiden Achsen im Handmodus zu bewegen (joggen).
<b>Begründung</b>	Der Handmodus erfordert manuelle Nutzereingaben. Dieser erfolgen über die besagten Richtungsgeber-Taster. Alternativ kann die selbe Funktionalität auch über die Visualisierung ausgeführt werden.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Bewegung der Achsen erfolgt innerhalb des durch die Endlagesensoren abgesteckten Fahrbereiches (siehe Tabelle 12 FA_12).</li> <li>• Die Bewegung der Achsen ist verlangsamt in Endlagen Nähe (geringere Beschleunigung und Geschwindigkeit) (siehe Tabelle 13 FA_13).</li> </ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Tasteingaben auf dem Vier-Wege-Richtungsgeber führen im bestätigten Handbetrieb zu Bewegungen der jeweils angesteuerten Achse.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

Tabelle 4: Funktionale Anforderung - Bewegungssteuerung im Handmodus

---

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_05
<b>Beschreibung</b>	Über die Betätigung von zwei weißen Tastern am Schaltschrank soll zum Einen ein auf der z-Achse befestigter Greifarm umgeschwenkt werden können, zum anderen soll ein Greifer geöffnet und geschlossen werden, um Transportobjekte aufzunehmen/abzulegen.
<b>Begründung</b>	Der Handmodus erfordert manuelle Nutzereingaben. Dieser erfolgen über besagte zwei weiße Taster zur Steuerung des Greifens. Alternativ kann die selbe Funktionalität auch über die Visualisierung ausgeführt werden.
<b>Abhängigkeit</b>	Ablage von Transportobjekten auf Ablagepositionen oder Weitergabe von Transportobjekten an z. B. ein Förderband (spätere Erweiterung)
<b>Abnahmekriterium</b>	Es können sowohl Objekte links als auch rechts von der Positioniereinheit gegriffen und abgelegt werden.
<b>Quelle</b>	Prozessentwickler siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 5: Funktionale Anforderung - Greifen von Transportobjekten im Handmodus

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_06
<b>Beschreibung</b>	Durch Betätigung des <i>RESET-Tasters</i> (gleichzeitig auch der grüne <i>START-Taster</i> ) soll das System nach einem Not-Halt wieder reaktiviert werden, um anschließend normal genutzt werden zu können.
<b>Begründung</b>	Die Wiederaufnahme der Abarbeitung der Anlagenfunktionen sollte erst nach manueller Bestätigung, dass der Fehler bzw. die Notsituation beseitigt ist, stattfinden.
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren(siehe Tabelle 20 <i>NFA_07</i> und Tabelle 22 <i>NFA_09</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Es können sowohl Objekte links als auch rechts von der Positioniereinheit gegriffen und abgelegt werden.
<b>Quelle</b>	Studenten siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 6: Funktionale Anforderung - RESET-Taster

---

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_07
<b>Beschreibung</b>	Die Geschwindigkeit der beiden Achsen soll jeweils durch ein Potentiometer am Schaltschrank vorgegeben werden.
<b>Begründung</b>	Das Regulieren der Fahrgeschwindigkeit erleichtert auf der einen Seite die Identifikation von Fehlern (lang-sames Fahren), auf der anderen Seite kann die Dauer von Positionieraufgaben verringert werden (schnelleres Fahren).
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Das Einstellen von Geschwindigkeiten über die Potentiometer an der Schaltschrankfront führt zur Änderung der Fahrgeschwindigkeit der jeweiligen Achse.
<b>Quelle</b>	Prozessentwickler siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 7: Funktionale Anforderung - Regulierung der Fahrgeschwindigkeit

Anschließend an die funktionalen Anforderungen die Systembedienung betreffend, folgt nun die Anforderung zur Funktionalität des Systems im Automatikmodus, welcher den Normalbetrieb des Systems darstellen soll. Bei dieser Anforderung handelt es sich um eine der Kernanforderungen an das System. Erweitert wird diese um die Anforderung, dass der Fahrweg bzw. die Trajektorie der Achsenbewegungen programmatisch vorgegeben werden kann.

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_08
<b>Beschreibung</b>	Nach bestätigter Auswahl des Automatikmodus soll das System vollautomatisch Positionier- und Greifaufgaben durchführen. Es sollten beispielsweise Koordinatenpunkte angefahren werden, um dort Greifaktionen auszuführen.
<b>Begründung</b>	Im Automatikmodus soll das System selbstständig ohne Erfordernis von Nutzereingaben ein vorgegebenes Programm abarbeiten.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Die Bewegung der Achsen erfolgt innerhalb des durch die Endlagesensoren abgesteckten Fahrbereiches (siehe Tabelle 12 FA_12).</li><li>• Die Bewegung der Achsen ist verlangsamt in Endlagen Nähe (geringere Beschleunigung und Geschwindigkeit) (siehe Tabelle 13 FA_13).</li><li>• Kollisionen mit virtuellen Hindernissen sollen verhindert und der Fahrweg somit angepasst werden (siehe Tabelle 9 FA_09).</li></ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Die beiden Achsen des Systems können absolut positioniert werden. Die Positionierung der Achsen erfolgt ohne Nutzereingaben.
<b>Quelle</b>	Prozessentwickler, Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 8: Funktionale Anforderung - Abarbeitung des Automatikmodus

---

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_09
<b>Beschreibung</b>	Durch programmatisches Eingreifen soll das Fahrverhalten (z.B. Trajektorien) vorgegeben bzw. angepasst werden können.
<b>Begründung</b>	Durch die Möglichkeit Fahrparameter und somit auch Trajektorien anpassen zu können, wird es möglich verschiedene Bewegungsparameter zu testen und diese miteinander zu vergleichen. Dadurch ergibt sich ein Optimierungspotenzial der Laboranlage. Weiterhin kann somit eine Umsetzung zur Kollisionsvermeidung von virtuellen Hindernissen umgesetzt werden.
<b>Abhängigkeit</b>	Programmierschnittstelle zu den Laborcomputern (siehe Tabelle 18 <i>NFA_05</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Der Fahrweg zwischen einem Start- und Endpunkt wurde erfolgreich angepasst und das System führt abweichende Bewegungsmuster aus.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 9: Funktionale Anforderung - Anpassung des Fahrverhaltens

Die letzten vier funktionalen Anforderungen beinhalten allgemeine Informationen das Systemverhalten betreffend und gelten als grundlegende Voraussetzung für die Funktionalität des Positioniersystems. Es ist dabei nicht relevant, ob die Anlage im Hand- oder Automatikmodus betrieben wird.

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_10
<b>Beschreibung</b>	Das Positioniersystem soll zwei bewegbare Achsen besitzen, die sich getrennt steuerbar horizontal und vertikal auf ihrem jeweiligen Profil bewegen können.
<b>Begründung</b>	Um Positionieraufgaben durchführen zu können, sollen Linearachsen zum Einsatz kommen, auf denen bzw. durch welche Bewegungen durchgeführt werden können.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bewegung der beiden Achsen im Handmodus (siehe Tabelle 4 <i>FA_04</i>).</li><li>• Abarbeitung des Automatikmodus (siehe Tabelle 8 <i>FA_08</i>).</li><li>• Anpassung des Fahrweges bzw. der Trajektorie (siehe Tabelle 9 <i>FA_09</i>).</li></ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Das System besitzt zwei Achsen mit jeweils einem Servoantrieb pro Achse (Sichtprüfung).
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

Tabelle 10: Funktionale Anforderung - Positionieren auf zwei Achsen

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_11
<b>Beschreibung</b>	Bewegungen auf den zwei Linearachsen sollen gebremst werden können.
<b>Begründung</b>	Bewegungen entlang der Achsen müssen auch wieder gestoppt werden können. Weiterhin sollten keine Bewegungen verursacht durch das Gewicht des Systems selbst oder von Transportobjekten auftreten.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Es sollen Endlagesensoren eingesetzt werden (siehe Tabelle 12 FA_12).</li><li>• Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 NFA_07 und Tabelle 22 NFA_09).</li></ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Sowohl ein Erreichen von Endlagepositionen, sowie Start- und Zielpositionen, die Nichtbetätigung von Bewegungstastern im Handmodus und das Auslösen des Not-Halts führen zu einem Bremsvorgang und abschließendem Halten der Achsen. Im gestoppten Zustand befindet sich die Anlage im Stillstand und kann nicht bewegt werden.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 11: Funktionale Anforderung - Bremsen der Achsbewegungen

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_12
<b>Beschreibung</b>	Es sollen induktive Endlagesensoren (Öffner) verbaut werden, die Bewegungen nach Erreichen der Enden der jeweiligen Achse verhindern.
<b>Begründung</b>	Damit es nicht zu Beschädigungen der Anlage kommt, muss verhindert werden, dass sich die Schlitten auf den Profilen der Achsen über den maximalen Fahrtweg hinaus bewegen können.
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 <i>NFA_07</i> und Tabelle 22 <i>NFA_09</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Bei Erreichen einer Endlage bewegt sich der jeweilige Schlitten nicht mehr weiter (über die Endlage hinaus), auch dann nicht, wenn die Eingabe für eine Bewegung in diese Richtung erfolgt. Das Vorhandensein der Sensorik wird per Sichtprüfung bestätigt.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 12: Funktionale Anforderung - Nutzung induktiver Endlagesensoren

---

<b>Identifikationsnummer</b>	FA_13
<b>Beschreibung</b>	Sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung der Achsen sollte in Endlagennähe verringert werden.
<b>Begründung</b>	Ein zu langer Bremsweg aufgrund einer zu großen Geschwindigkeit könnte in Endlagennähe zur Beschädigung der Anlage führen.
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 <i>NFA_07</i> und Tabelle 22 <i>NFA_09</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Die Bewegung der beiden Achsen ist in Nähe der Endlagen ersichtlich langsamer.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 13: Funktionale Anforderung - Entschleunigung in Endlagenähe

### 2.1.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Dieses Unterkapitel behandelt die Modellierung der nicht-funktionalen Anforderungen in der Anforderungsanalyse. Nicht-funktionale Anforderungen sind Forderungen an die Qualität, in welcher Funktionalitäten zu erbringen sind. Auch Randbedingungen für das System bzw. den Prozess werden mit bei den nicht-funktionalen Anforderungen berücksichtigt [Rud99, Seite 337].

Die **Qualitätsanforderungen** gliedern sich in Zeitanforderungen, Sicherheit für Leib und Leben und Zuverlässigkeit sowie Verfügbarkeit. Bei *Zeitanforderungen* handelt es sich meist um Reaktionszeiten eines Systems. Dabei wird unterschieden zwischen harten und weichen Zeitanforderungen. Der Verstoß gegen harte Zeitanforderungen kann mitunter sehr gravierend sein, wohingegen das Nichteinhalten von weichen Zeitanforderungen meist nur als Störfaktor gesehen werden kann. Zeitanforderungen finden sich im Entwicklungsprozess überwiegend in der Beschreibung von Systemprozessen oder in Aktivitäten des Zustandsdiagrammes wieder.

Anforderungen bezüglich *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit* treten in der Modellierung in den Knoten des Verteilungsdiagrammes oder fließen in die Systembeschreibung ein.

In die Klasse der Anforderungen bezüglich *Sicherheit für Leib und Leben* fällt die Risikovermeidung von Schäden an Menschen, Produkten und die Umwelt.

Abschließend werden die **Randbedingungen** das System betreffend als Sonderklasse der

nicht-funktionalen Anforderungen betrachtet. Man unterteilt diese in zwei Kategorien. Es wird unterschieden zwischen Bedingungen, die sich auf das System und Bedingungen, die sich auf den Entwicklungsprozess auswirken.

Erstere sind Technologievorgaben, physikalische Anforderungen, Umweltanforderungen und Vorgaben für die Einbettung und Verteilung des Systems. Sowohl Technologievorgaben als auch Vorgaben an die Einbettung und Verteilung fließen direkt in die Modellierung ein. So werden bspw. Nachbarsysteme im Kontextdiagramm und Forderungen nach bestimmter Hardware im Verteilungsdiagramm aufgeführt. Zu den physikalischen Anforderungen zählen z. B. Aussagen über das Gehäuse bzw. die Räumlichkeit, in die das Produkt am Ende der Entwicklung passen muss. Unter Umweltanforderungen versteht man bspw. klimatische Bedingungen, unter denen das System arbeiten muss.

Randbedingungen für den (Entwicklungs-) Prozess basieren auf Vorschriften und Traditionen. Dabei meinen Traditionen Vorschriften, die sich aus bereits früheren Entwicklungen einer Firma ergeben haben [Wal05, Seite 46].

Zuletzt soll an dieser Stelle noch eine entscheidende Problematik, die durch die Modellierung nicht-funktionaler Anforderungen auftritt, Erwähnung finden. Es besteht die Möglichkeit, dass nicht-funktionale Anforderungen entgegensätzliche Dinge verlangen. Um diese Problematik zu beseitigen oder zumindest zu minimieren, hat sich in der Praxis die Vergabe von Prioritäten bewährt. So kann in Tabellenform eine Prioritätsreihenfolge erstellt werden. Diese hilft dem Entwickler zu entscheiden, wie er sich beim Auftreten eines Konfliktes verhält [Lap14, Seite 33].

Da nun auch die theoretische Grundlage zu den nicht-funktionalen Anforderungen ausreichend beleuchtet ist, folgt die tabellarische Auflistung aller nicht-funktionalen Anforderungen des mehrachsigen Positioniersystems.

Zunächst werden die Qualitätsanforderungen an das System aufgelistet. Begonnen wird dabei mit den Zeitanforderungen an das Positioniersystem.

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_01
<b>Beschreibung</b>	Das Durchbrechen des Lichtvorhangs sollte zu einer Bremsauslösung nach spätestens 50ms führen
<b>Begründung</b>	Damit eine zum Positioniersystem sprintende Person nicht durch die Bewegungen der Achsen verletzt wird, muss ein Bremsvorgang getriggert durch das Eintreten in den Positionierbereich ausgelöst werden.
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 NFA_07 und Tabelle 22 NFA_09).
<b>Abnahmekriterium</b>	Der Bremsvorgang wird nach weniger als 50ms eingeleitet (Bestätigung durch Aufnahme des Zeitlichen Verlaufes und Überprüfung der Parametrierung der sicheren Eingangsklemmen für den Lichtvorhang).
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 14: Nicht-Funktionale Anforderung - Reaktionszeit des Lichtvorhangs

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_02
<b>Beschreibung</b>	Die Auslösung eines Not-Halts sollte nach spätestens 250ms zum Abschalten des Servoreglers führen.
<b>Begründung</b>	Die Abschaltung des Servoreglers verhindert das Weiterfahren der Servomotoren und versetzt diese in einen sicheren Haltezustand.
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 <i>NFA_07</i> und Tabelle 22 <i>NFA_09</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Der Servoreglers ist nach weniger als 250ms abgeschaltet (Bestätigung durch Aufnahme des zeitlichen Verlaufes und Überprüfung der Programmierung des Sicherheitsprogrammes).
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

Tabelle 15: Nicht-Funktionale Anforderung - Abschaltzeit des Servoreglers

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_03
<b>Beschreibung</b>	Die Auslösung eines Not-Halts oder einer Endlage-detektierung sollte nach spätestens 200ms zu einem vollständigen Abbremsen jeglicher Bewegungen der jeweiligen Achse(n) führen (Bewegung ist gestoppt).
<b>Begründung</b>	Ein zu langer Bremsvorgang könnte zu Personen- oder Anlagenschäden führen
<b>Abhängigkeit</b>	Es sind Schutzmaßnahmen für Anwender und Anlage umzusetzen, um das Gefahrenrisiko zu minimieren (siehe Tabelle 20 NFA_07 und Tabelle 22 NFA_09).
<b>Abnahmekriterium</b>	Es findet keine Bewegung mehr nach spätestens 200ms nach Auslösung des Halt-Ereignisses statt. Die Bestätigung erfolgt über die Messung des zurückgelegten Weges nach Ablauf von 200ms.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 16: Nicht-Funktionale Anforderung - Bremsdauer der Achsen

Anschließend an die Zeitanforderungen folgen nun drei Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems. Abseits der ersten nun folgenden Anforderung handelt es sich um zwei Kernanforderungen an das System, welche im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit der Laboranlage stehen. Diese soll wie bereits im einleitenden Text des Kapitels beschrieben sowohl von jedem Laborplatz aus programmiert werden können, als auch im Labornetzwerk per OPC UA Daten aus dem Prozess bereitstellen.

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_04
<b>Beschreibung</b>	Die Laboranlage sollte maximal einen Systemausfall in 10.000 h haben.
<b>Begründung</b>	Das mehrachsige Positioniersystem muss zuverlässig laufen, um sowohl für den Lehrzweck als auch für die Gewinnung von Systemdaten zur Weiterverarbeitung eingesetzt werden zu können.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Dauertest bei Bedarf. Treten Ausfälle bereits nach kurzer Zeit auf, gilt die Anforderung als nicht erfüllt.
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

Tabelle 17: Nicht-Funktionale Anforderung - Ausfallhäufigkeit

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_05
<b>Beschreibung</b>	Es soll die Möglichkeit bereitgestellt werden von jedem Laborcomputer eine Verbindung zur Anlage herzustellen, um z. B. die Steuerungssoftware anzupassen.
<b>Begründung</b>	Für den Einsatz der Laboranlage im Lehrbetrieb muss die Anlage im Labornetzwerk gefunden werden können, um von den Studierenden als Anwendungsbeispiel genutzt werden zu können.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Sämtliche SPSen des Systems (LMC, SLC und PFC200) können in der Programmierumgebung MachineExpert (LogicBuilder) gefunden und mit Programmen bespielt werden.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

Tabelle 18: Nicht-Funktionale Anforderung - Programmierschnittstelle

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_06
<b>Beschreibung</b>	Der LMC soll zusätzlich als OPC UA Server fungieren, über welchen Prozessdaten aus einer globalen Variablenliste ausgegeben werden. Dazu gehören Positionsdaten der beiden Achsen, sowie deren aktuelle Geschwindigkeit und Beschleunigung. Es kann der Status der Bremsen ausgelesen werden und der Betriebsstrom der gesamten Anlage.
<b>Begründung</b>	Die Laboranlage soll über einen AR Server betrachtet werden können, um schneller und anschaulicher Informationen über die Anlage zu erhalten. Außerdem wird das Positioniersystem als Anwendungsbeispiel im OpenBASYS Projekt der Hochschule eingesetzt, bei dem die Anlage über Verwaltungsschalen genutzt werden soll. Dazu ist es nötig interne Variablen (Prozessdaten) nach außen über die OPC-UA-Schnittstelle zugänglich zu machen.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Über einen OPC UA Client kann eine Verbindung zum als OPC UA Server fungierenden LMC hergestellt werden. Nach Aufbau der Verbindung ist es dann möglich Prozessdaten zu empfangen und auszulesen bzw. weiterzuverarbeiten.
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 19: Nicht-Funktionale Anforderung - OPC UA Schnittstelle

Es folgen nun nicht-funktionale Anforderungen die Sicherheit von Leib und Leben betreffend. Dies schließt Anforderungen zur Vermeidung von Schäden an der Anlage mit ein.

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_07
<b>Beschreibung</b>	Die Gefahr, dass ein Anwender oder eine sich in Anlagentnähe befindende Person durch die Bewegung der Positioniereinheit verletzt wird, soll bestmöglich minimiert werden. Dazu sind Not-Halt Taster vorgesehen, die durch den Anwender betätigt werden können. Zusätzlich ist ein Lichtvorhang verbaut, der die Anlage stoppen soll, falls eine Person oder ein Objekt durch diesen in den Gefahrenbereich eindringt.
<b>Begründung</b>	Die Sicherheit für den Anwender und sich in der Nähe der Anlage befindende Personen hat höchste Priorität. Personenschäden müssen unbedingt verhindert werden.
<b>Abhängigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signalisierung einer Gefahrensituation (siehe Tabelle 21 <i>NFA_08</i>).</li> <li>• Verhinderung von Anlagenschäden (siehe Tabelle 22 <i>NFA_09</i>).</li> <li>• Gehäuseaufbau zum Schutz vor Verletzungen (siehe Tabelle 23 <i>NFA_10</i>).</li> </ul>
<b>Abnahmekriterium</b>	Durch die Simulation einer Notsituation in Form der Betätigung eines einrastenden Not-Halt-Tasters oder nach Durchbrechung des Lichtvorhangs muss die Laboranlage unverzüglich Bremsen und in einen haltenden Zustand übergehen.
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 20: Nicht-Funktionale Anforderung - Sicherheit für Leib und Leben

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_08
<b>Beschreibung</b>	Es soll eine Signalampel verbaut werden, die eine erhöhte Risikosituation signalisiert, wenn das Positioniersystem in Bewegung ist. Die Signalisierung erfolgt durch abwechselndes Blinken der roten und grünen Leuchtelemente.
<b>Begründung</b>	Einer sich in Anlagennähe befindenden Person ersichtliche Signalisierung einer Gefahrensituation minimiert das Risiko der Verletzung durch die Anlage.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Die Signalampel leuchtet entsprechend des aktuellen Systemzustandes.
<b>Quelle</b>	Prozessentwickler siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 21: Nicht-Funktionale Anforderung - Signalisierung von Gefahrensituationen

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_09
<b>Beschreibung</b>	Die Beschädigung der Laboranlage durch die Bewegung der Achsen soll bestmöglich verhindert werden.
<b>Begründung</b>	Die Beschädigung der Positioniereinheit würde sowohl zu Kosten als auch potenziellen Personenschäden führen, was dringlichst vermieden werden muss.
<b>Abhängigkeit</b>	Kabel zu beweglichen Komponenten müssen in E-Ketten untergebracht werden (siehe Tabelle 24 <i>NFA_11</i> ).
<b>Abnahmekriterium</b>	Es wurden alle geforderten Betriebsmittel zu Verhinderung von Schäden durch bewegliche Systemkomponenten verbaut (Endlagesensorik, Puffer zur Minimierung von Auffahrtschäden). Weiterhin existiert eine Not-Halt-Funktionalität.
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 22: Nicht-Funktionale Anforderung - Verhinderung von Schäden an der Anlage

Abschließend werden die Randbedingungen als nicht-funktionale Anforderungen zusammengetragen. Dabei handelt es sich zum einen um Anforderungen an das Gehäuse, die bis jetzt noch nicht unter den Anforderungen für die Sicherheit von Leib- und Leben aufgeführt wurden. Zum anderen werden Hardware- und Softwarevorgaben an dieser Stelle mit aufgeführt.

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_10
<b>Beschreibung</b>	Die rechte und linke Seite der Laboranlage sollen mit Plexiglasscheiben bestückt werden. Die elektrische Verteilung ist in einem Schaltschrank unterzubringen.
<b>Begründung</b>	Weder der Anlagenbereich, in dem Positionieraufgaben durchgeführt werden, noch der Anlagenbereich, in dem das Risiko zur Verletzung durch einen elektrischen Schock bestehen dürfen frei zugänglich sein, um Verletzungen zu vermeiden.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Das Positioniersystem ist von den Seiten mit Plexiglas abgeschirmt und die elektrischen Betriebsmittel bzw. deren Anschlüsse sind in einem Schaltschrank untergebracht (Sichtprüfung).
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 23: Nicht-Funktionale Anforderung - Gehäuse

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_11
<b>Beschreibung</b>	Kabel an den beweglichen Bauteilen der Positionier-einheit müssen sicher mitgeführt werden.
<b>Begründung</b>	Sämtliche Kabel zu beweglichen Systemkomponen-ten müssen beweglich gelagert werden, da diese sonst mit umliegenden Betriebsmitteln interferieren könnten. Weiterhin wird dadurch verhindert, dass Kabel reißen.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Die Laboranlage besitzt für jede bewegliche Achse eine E-Kette in welchen sich die Kabel der Betriebsmittel der jeweiligen Achse befinden (Sichtprüfung).
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 24: Nicht-Funktionale Anforderung - Kabelmitführung

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_12
<b>Beschreibung</b>	Es soll eine zweite SPS verbaut werden, die über eine Energieklemme verfügt, über welche der Betriebsstrom des Systems gemessen werden kann.
<b>Begründung</b>	Über die Bereitstellung des aktuellen Stromverbrauches der Anlage können Rückschlüsse über die Effektivität der Anlage geschlossen werden. Da der Verbrauch des Positioniersystems somit bekannt ist, besteht die Möglichkeit Optimierungen an der Laboranlage durchzuführen. Es könnten beispielsweise Trajektorien verbessert werden, sodass weniger Strom benötigt wird für die Bewegungen.
<b>Abhängigkeit</b>	Der Betriebsstrom bzw. die Leistung, die das System verbraucht soll per OPC UA Client ausgelesen werden (siehe Tabelle 19 NFA_06).
<b>Abnahmekriterium</b>	Über einen OPC-UA-Client kann auch der Betriebstrom ausgelesen werden.
<b>Quelle</b>	Mitarbeiter der Labore siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 25: Nicht-Funktionale Anforderung - Betriebsstrommessung

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_13
<b>Beschreibung</b>	Das mehrachsige Positioniersystem soll im Laborraum G 422 der HTW Berlin an der Rückwand des Raumes aufgebaut und in Betrieb genommen werden.
<b>Begründung</b>	Da das System dem Fachbereich 1 und dem Themengebiet Automatisierungstechnik und industrielle Kommunikation zugeordnet werden kann, bietet es sich an dieses in einem der entsprechenden Laborräume aufzubauen. Aus platztechnischen Gründen und dem Vorhandensein von kompatibler Hardware (zur Simulation des Systems) ist es erforderlich dieses im Raum G 422 zu installieren.
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	System ist sichtbar an der Rückwand des Raumes eingebaut (Sichtprüfung).
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 26: Nicht-Funktionale Anforderung - räumliche Vorgabe

---

<b>Identifikationsnummer</b>	NFA_14
<b>Beschreibung</b>	<p>Die Steuerungskomponenten der Laboranlage sind bereits vorhanden und müssen verbaut werden. Die Hauptsteuerung ist der LMC400c von Schneider Electric. Zusammen mit dem LXM 62P und LXM 62D Modul gehört dieser zur PacDrive 3 Produktserie. So wohl das erwähnte Netzteil (LXM 62P) als auch der Servoregler (LXM 62D) sollen verbaut werden. Aus den Technologievorgaben ergibt sich die Festlegung der Entwicklungsumgebung zur Programmierung des Systems. Die Inbetriebnahme der Anlagensoftware erfolgt über die Software MachineExpert. Die beiden Servomotoren des mehrachsigen Positioniersystems stammen ebenfalls von Schneider Electric. Es handelt sich um SH3 multturn Servos mit Bremse. Auch die SPS für die Strommessung per Energieklemme ist vorgegeben. Es soll eine Wago SPS der PFC200-Serie verbaut werden. Zur Erweiterung der Ein- und Ausgänge des Systems sind Modicon TM5 Module bereitgestellt worden, die sowohl aus digitalen als auch analogen Baugruppen bestehen. Für die Umsetzung der Sicherheitsfunktionen wird der SLC von Schneider Electric mit einem sicheren Eingangsmodul und einem sicheren Ausgangsmodul verwendet. Alle Steuerungskomponenten sollen per SERCOS III Bus miteinander kommunizieren.</p>
<b>Begründung</b>	<p>Die Hardware wurde von besagten Industrieunternehmen gestellt und musste nicht käuflich erworben werden. Da diese somit vorhanden ist und für vergleichbare Systemaufbauten entwickelt wurde, kommt diese im Positioniersystem zur Anwendung.</p>
<b>Abhängigkeit</b>	—
<b>Abnahmekriterium</b>	Vorgegebene Hardware wurde verbaut (Sichtprüfung).
<b>Quelle</b>	Lehrpersonal siehe Stakeholderliste

---

Tabelle 27: Nicht-Funktionale Anforderung - Hardwarevorgaben

## 2.2 Identifikation der Stakeholder

Wie in Grafik 1 zu erkennen ist, gehört die Ermittlung der für das Projekt wichtigen Personen (nachfolgen als Stakeholder bezeichnet) zur Anforderungsanalyse. Als Stakeholder gelten Personen, die an der Systementwicklung beteiligt sind aber auch zukünftige Anwender bzw. Personen, die vom Einsatz des Systems betroffen sind. Die in den vorangegangenen Unterkapiteln aufgenommenen Anforderungen und Randbedingungen haben ihre Grundlage auf den von den Stakeholdern bereitgestellten Informationen. Dabei vertreten die Stakeholder verschiedene Interessen das zu entwickelnde System betreffend [Kle13, Seite 56].

Wie auch schon bei den nicht-funktionalen Anforderungen festgehalten wurde, können unterschiedliche und sogar konträre Bedürfnisse und Ansprüche von den Stakeholdern aufgestellt werden. Um den Entwicklungsprozess durch widersprüchliche Anforderungen von Stakeholdern nicht behindern zu lassen, wird eine tabellarische Auflistung aller für das System relevanten Personen erstellt. Es findet eine Klassifizierung der Stakeholder statt, aus der ersichtlich wird, welche Person bzw. welcher Personenkreis für eine bestimmte Thematik als Ansprechpartner gilt. Anforderungen aus einem bestimmten Themenfeld werden priorisiert, wenn diese von Personen des selben Themenfeldes gestellt wurden. Tabelle 10 zeigt die Auflistung aller Stakeholder des mehrachsigen Positioniersystems. Besonders wichtige Spalten der Tabelle sind zum einen die Rolle des oder der Stakeholder(S), der bzw. die Vertreter und deren Wissensgebiet.

Rolle der Stakeholder	Beschreibung	Konkrete Vertreter	Wissensgebiet	Begründung
Lehrpersonal der Hochschule	Auftraggeber für den eigentlichen Einsatz des Systems	Herr Prof. Dr. Schäfer Tel.: 5019-3466 E-Mail: Stephan.Schaefer@HTW-Berlin.de	Lehre und Forschung im Gebiet der Automatisierungs-technik	Auftraggeber und Verantwortlicher
Mitarbeiter der Labore für Automatisierung	Geben zusätzliche Anforderungen für die Verwendung vor	Herr Dipl.-Ing. Dirk Schöttke Tel.: 5019-3564 E-Mail: Dirk.Schoettke@HTW-Berlin.de	Ingenieur mit Fachkenntnissen in der Automatisierungstechnik sowie Anlagenprojektierung	Sorgt für die Eingliederung des Systems in übergeordnete Projekte

Studierende der Hochschule	Sind die eigentlichen Benutzer des Systems	keine Vertreter	Arbeiten mit den Laboranlagen des Fachbereiches	Müssen das System im Lehrbetrieb der Hochschule benutzen
Prozessentwickler	Person(en) die für die Entwicklung des Systems verantwortlich ist/sind	Herr Aaron Zielstorff  tel.: +49177/2847470 E-Mail: Aaron.Zielstorff@HTW-Berlin.de	Entwickler des Positioniersystems	Ist verantwortlich für die Realisierung des Systems nach gegebenen Anforderungen

Tabelle 28: Stakeholder des mehrachsigen Positioniersystems

Die Auflistung der Stakeholder ergibt, dass grundsätzlich zwei Interessengebiete und somit auch zwei Interessengemeinschaften existieren, was die Anforderungen und Interessen an das Positioniersystem betrifft. Auf der einen Seite soll die Positioniereinheit im Lehrbetrieb im Labor eingesetzt werden, um vorlesungsbegleitend Studierenden die Möglichkeit zu bieten, praxisnah Industriesteuerungen für Bewegungsaufgaben (Motion Controlling) zu programmieren. Dazu zählt auch die Anforderung von jedem Laborplatz aus Automatisierungssoftware zu entwickeln, die nach Fertigstellung auf die Steuerung des mehrachsigen Positioniersystems übertragen werden kann, um Positionieraufgaben an einem realen System durchzuführen. Ziel soll es sein dadurch nicht nur rein simulativ die Abläufe bei der Inbetriebnahme eines solchen Systems zu erproben, sondern zusätzlich auch reale physikalische Einflüsse mit zu berücksichtigen, die eventuelle Abweichungen zu simulierten Automatisierungsprogrammen aufweisen. Außerdem müssen bei der Nutzung realer Hardware auch die Sicherheit von Mensch und Maschine mit berücksichtigt werden, da Gefahren durch den Betrieb des Systems auftreten können.

Auf der anderen Seite soll das Positioniersystem in Drittprojekten mit eingebettet werden. Dazu ist es von Relevanz, dass wichtige Systemdaten über einen OPC UA Server (diese Rolle wird von der Steuerung übernommen) bereitgestellt werden. Über diese Schnittstelle können Daten aus dem Prozess abgegriffen werden, die in einem externen System bzw. in einem Peripheriesystem weiterverarbeitet oder genutzt werden können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Positioniereinheit Wertschöpfung als Lehrmittel für Studierende und als Quelle für relevante Systemdaten zu diversen Zwecken generieren soll. Dazu ist es unabdinglich, dass sie über ethernetbasierte Schnittstellen (Netzwerkschnittstellen) mit externen Geräten kommunizieren kann.

## 2.3 Vorstellung der Laboranlage

In diesem Unterkapitel wird zunächst die Laboranlage vorgestellt, die im Verlauf der Arbeit unter den Gesichtspunkten des Requirements-Engineerings und der Anlagenprojektierung konzipiert, projektiert und in Betrieb genommen werden soll. Im ersten Abschnitt wird das bereits elektrisch fertiggestellte Positioniersystem dargestellt. Im Mittelpunkt steht hierbei die Erläuterung des Aufbaus und die Beschreibung der Funktionalität der Anlage. Der zweite Abschnitt behandelt die Eingliederung des Systems in seine Arbeitsumgebung. Dabei soll ein erster Überblick zum Einsatz der Positioniereinheit gegeben werden. Zuletzt werden die Betriebsmodi der Laboranlage vorgestellt, wobei genauer auf den Workflow im jeweiligen Modus eingegangen werden soll.

### 2.3.1 Aufbau des Positioniersystems

Wie bereits aus dem Thema der Bachelorthesis erkenntlich ist, handelt es sich bei der behandelten Laboranlage um ein mehrachsiges Positioniersystem. Dieses besitzt zum Zeitpunkt der ersten Inbetriebnahme zwei Achsen (siehe Abbildung 2).

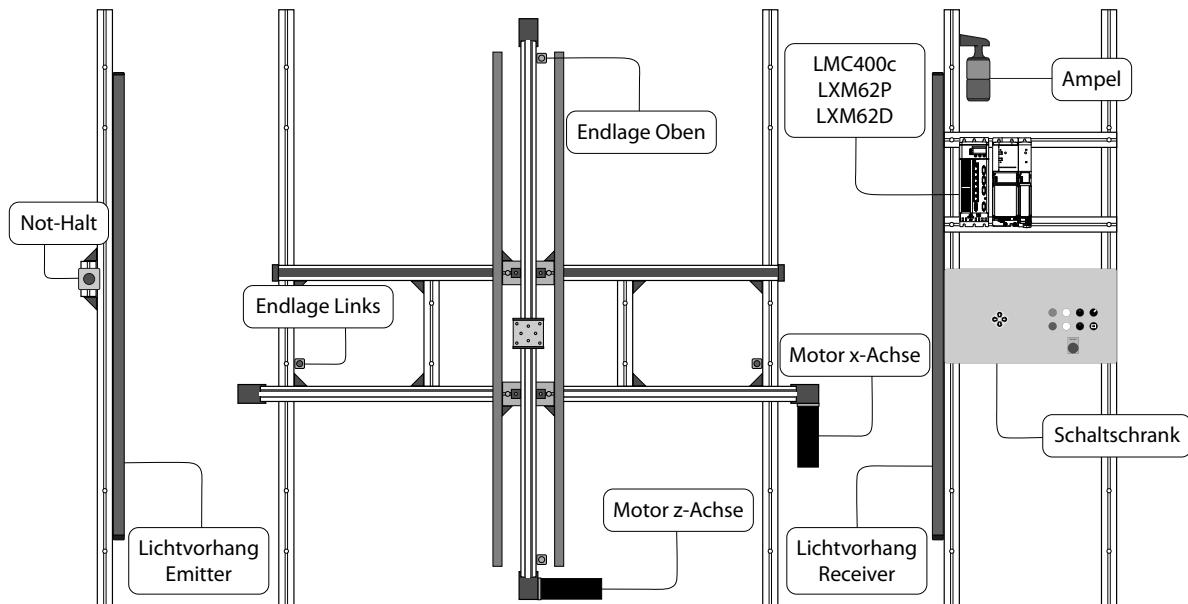


Abbildung 2: Konfiguratorskizze des Positioniersystems

Die horizontale Achse des Systems ist fest an der Wand montiert und hat eine Länge von rund 1600 mm (effektiver Fahrtweg). Vertikal montiert auf dieser befindet sich die beweglich gelagerte zweite Achse der Positioniereinheit. Diese besitzt die Möglichkeit, lineare Bewegungen zwischen den Endlagesensoren der Horizontalachse durchzuführen.

Bei der Befestigung an der waagerechten Achse handelt es sich um ein doppeltes Schlitzen system auf Rollen. Die Bewegung der Achse erfolgt über ein Gummiringen, der fest an der Vertikalachse befestigt ist, und über Umlenkrollen und einen Servomotor an der Horizontalachse bewegt werden kann. Auf der senkrechten Achse befindet sich ein weiterer Schlitten, der ebenso beweglich gelagert ist und sich auf einem Fahrtweg von rund 2000 mm zwischen zwei Endlagen bewegen kann. Auf diesem ist ein simples Greifsystem angebracht, welches horizontale 180 Grad Schwenkbewegungen durchführen kann und in der Lage ist, grundlegende Greifoperationen durchzuführen.

Für die Zuleitungen zu den auf den bewegten Anlagenteilen montierten Aktoren und Sensoren wurden Energieketten verbaut, sodass Kabel prozesssicher mitgeführt und eine dauerhafte Strom- sowie Datenversorgung aller Systemkomponenten gewährleistet werden kann. An den beiden äußersten Profilen (sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite der Anlage) sind Ablagepositionen vorgesehen, von bzw. auf welche simple Transportgüter aufgenommen und abgelegt werden können.

Auf der rechten Seite direkt neben der Positioniereinheit sind der Schaltschrank sowie die speicherprogrammierbare Steuerung (im Folgenden als SPS bezeichnet) an der Wand montiert. Die Kabel der Aktoren und Sensoren des Systems münden an der Unterseite des Schrankes sowie die Stromzuleitung und sämtliche Aus- und Eingangsverbindungen zu bzw. von der SPS und dem sich neben dieser befindenden Servoantrieb. Auf der Vorderseite an der Tür des Schaltschrankes sind Bedienelemente aufgeschraubt, die für die grundlegende Steuerung der Anlage benutzt werden können.

Zur Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Anlage sind am Eingang des Positioniersystems sowohl ein Lichtvorhang als auch Not-Halt Bedienelemente montiert. Stromfrei kann die Anlage über den Hauptschalter an der rechten Seite des Schaltschrankes geschaltet werden.

### 2.3.2 Betriebsumgebung

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt bereits die grundlegenden Funktionen und der Aufbau der Positioniereinheit dargestellt wurden, beschäftigt sich dieses Unterkapitel mit der Darstellung der Eingliederung des Systems in dessen Arbeitsumgebung.

Aufgebaut befindet sich das mehrachsige Positioniersystem im Laborraum G422 der HTW Berlin am Campus Wilhelminenhofstraße. Abbildung 3 zeigt das Gehäuse/Gerüst des Positioniersystems an der Rückwand des Laborraumes. Dort wurde die Laboranlage im Rahmen meines Praktikums errichtet. Nachfolgen ist es Ziel der Bachelorthesis, diese Anlage für den Lehrzweck in Betrieb zu nehmen. Konkret soll die Positioniereinheit für zwei Anwendungen eingesetzt werden.



Abbildung 3: Reale Anlage im Laborraum G422 an der HTW Berlin Campus Wilhelmstraße

Erstere gliedert sich direkt in die Unterrichtseinheiten des Laborbetriebs im späten Bachelor- und das gesamte Masterstudium im Themenfeld Automatisierungstechnik ein. Jeder studentische Laborplatz besitzt die Möglichkeit, sich mit dem System zu verbinden, um es mit Automatisierungssoftware, die in den Lehreinheiten entwickelt wird, zu bespielen und diese an der Anlage zu testen. Es soll die Möglichkeit bestehen, Trajektorien zu fahren, bei denen virtuelle Hindernisse umgangen werden und Objekte von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt transportiert werden können. Die Nutzung der realen Anlage dient dabei als Prüfmöglichkeit der vorher von den Studierenden nur simulativ getesteten Automatisierungssoftware. Ziel ist es, den Laboranten eine Laboranlage zur Verfügung zu stellen, die in der Industrie in ähnlicher Weise aufzufinden ist, um bereits im Studium spätere Arbeitsabläufe aufzuzeigen.

Die zweite Anwendung des mehrachsigen Positioniersystems ist Teil eines laborübergreifenden Projektes, welches nicht in dieser Arbeit behandelt wird. Aus dessen Zielen ergeben sich weitere Anforderungen an die Laboranlage. Es sollen Daten aus dem Prozessablauf bereitgestellt werden, aus denen eine Wertschöpfung für das Projekt generiert werden kann. Die gewonnenen Daten sollen extern weiterverarbeitet werden. Dazu müssen weitere Schnittstellen im System bereitgestellt werden, um generierte Daten mit Peripheriegeräten austauschen zu können.

### 2.3.3 Vernetzung des Systems

Das Positioniersystem ist in das Labornetzwerk des Raumes eingebunden. Im selben Netzwerk befinden sich sämtliche Computer der einzelnen Arbeitsplätze. Verbunden sind das Positioniersystem und die Laborrechner über drei Internetswitches im selben Raum. Das mehrachsige Positioniersystem verfügt intern über einen weiteren Switch, über den die beiden Steuerungen des Systems mit dem Labornetzwerk verbunden sind. Die E/A-Module und die Sicherheitssteuerung im Schaltschrank sind über den SERCOS-III-Bus mit der Hauptsteuerung (LMC400c) des Systems verbunden. Weitere Busteilnehmer sind das Netzteil und der Servoregler. Abbildung 4 zeigt die beschriebene Netzwerkstruktur.

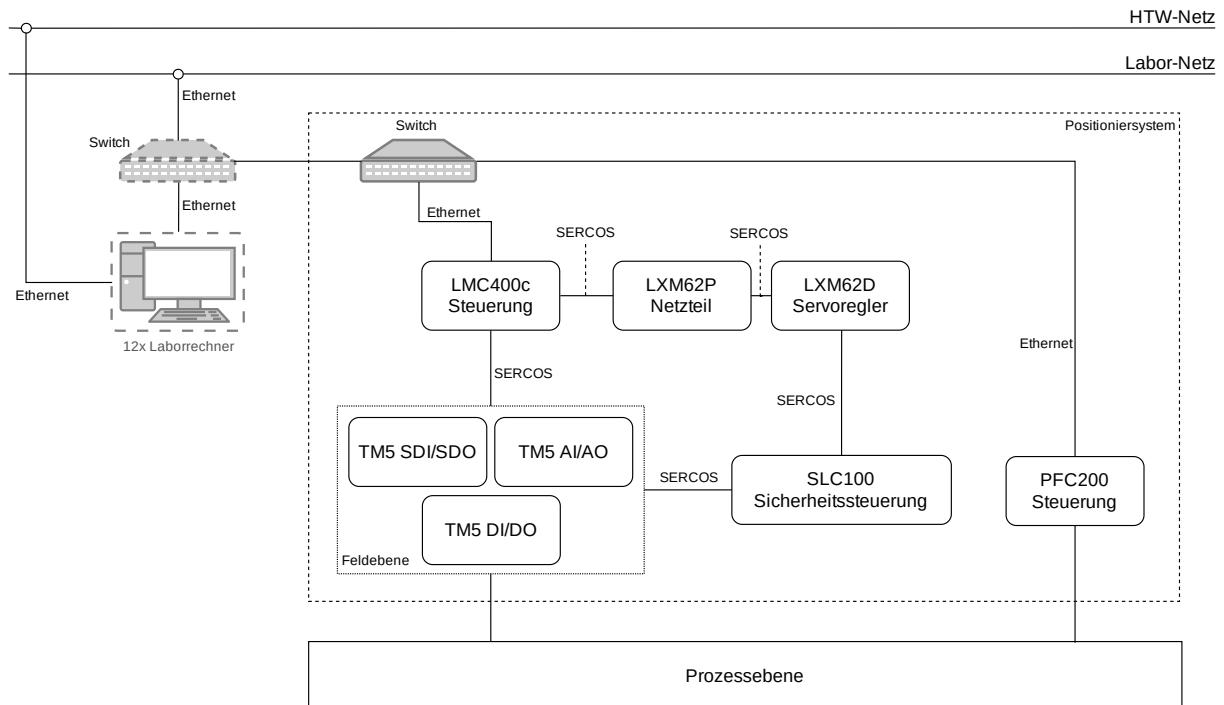


Abbildung 4: Netzwerkdiagramm - Vernetzung des mehrachsigen Positioniersystems

### 2.3.4 Betriebsmodi

Die Nutzung der Laboranlage erfolgt in zwei verschiedenen Betriebsmodi. Um den Produktivbetrieb des Positioniersystems einzuleiten, muss der Nutzer zwischen dem Automatikmodus und dem Handmodus auswählen, die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

**Automatikbetrieb:** Bei dem Automatikmodus handelt es sich um den üblicherweise genutzten Betriebsmodus der Laboranlage. Dieser kann vollautomatisch im Dauerbetrieb eingesetzt werden und erfordert nicht die Anwesenheit vom Nutzer. Der Prozessablauf ist

programmatisch vorgeschrieben und wird zyklisch durchgeführt. Zur erstmaligen Inbetriebnahme sollen einfache Transportaufgaben durchgeführt werden. So könnte beispielsweise von einer Ablageposition A ein Transportobjekt gegriffen und um Hindernisse herum transportiert werden, sodass besagtes Objekt an einer Zielposition B wieder abgesetzt wird. Danach fährt die Anlage wieder zu Position A, um erneut ein Objekt für den Transport aufzunehmen.

Konkret muss das Positioniersystem im ersten Schritt unter Spannung gesetzt, in dem der Hauptschalter (400 V Ebene) betätigt wird. Dieser befindet sich, wie bereits im vorherigen Unterkapitel erwähnt, auf der rechten Seite des Schaltschranks. Darauffolgend muss im zweiten Schritt die Steuerung (LMC400c von Schneider Electric) eingeschalten sowie alle Betriebsmittel auf der 24 V Ebene mit Strom versorgt werden. Dies geschieht über einen Leitungsschutzschalter im Schaltschrank. Der eingeschaltete Zustand ist am grünen Leuchten der Status-LED des LMC zu erkennen. Als Netzteil dient das LXM62 P Powersupply von Schneider Electric, welches 3-phäsig an der Drehstromsteckdose des Laborraumes angeschlossen ist. Dieses versorgt den LXM 62D double Drive aus der gleichen Produktreihe wie das Netzteil. Die 24 V Steuerungsebene wird aus einer separaten Steckdose versorgt. Mit einem Wahlschalter kann nun der Automatikmodus des Systems angewählt werden. Bestätigt wird dieser über den Start-Taster an der Schaltschranktür. Die erfolgreiche Auswahl des Automatikmodus kann an der Signalampel des Systems abgelesen werden (zweifarbiges Blinken). Die Anlage wechselt aus dem Leerlauf in den vollautomatischen Betrieb.

Nach der Wahl des Automatikmodus bewegt das Positioniersystem die auf den beiden Achsen montierte Greifeinrichtung aus der Ausgangsposition des Leerlaufes (auch als Home bezeichnet) zur Ablageposition A. Dazu werden zunächst die Bremsen der beiden Motoren gelöst, welche für die Bewegung der jeweiligen Achse verantwortlich sind. Ist die Position vor der Ablageposition A erreicht, wird im nächsten Schritt ein Schwenkarm mit Greifer so zur Ablageposition A rotiert, dass ein sich darauf befindliches Objekt gegriffen werden kann. Es folgt besagter Greifprozess, um das auf Ablageposition A befindliche Objekt aufzunehmen.

Das Positioniersystem muss nun einen Fahrtweg bewältigen, der mit virtuellen Hindernissen bestückt ist, um Trajektorien zum Transport von Gütern in mit Objekten blockierten Umgebungen zu erproben. Es ist nicht möglich, eine geradlinige Bewegung von Startposition A zur Zielposition, dem Ablageort B, zu fahren. Weiterhin kann auch nicht erst der komplette Fahrtweg in vertikaler Richtung (z-Richtung) bewältigt werden und dann die Bewegung in horizontaler Richtung (x-Richtung), noch eine geradlinige Bewegung, sodass die z- und x-Koordinate des Ziels gleichzeitig erreicht werden. Die Hindernisse werden programmatisch vorgegeben und sind somit der Laboranlage bzw. der Automatisierungssoftware bekannt.

Im nächsten Schritt werden dem Positioniersystem Koordinaten übergeben, die, wenn diese durchfahren werden, den Weg von Startposition A zu Zielposition B ergeben. Da-

bei soll berücksichtigt werden, dass nur an der Start- und Zielposition umfangreichere Beschleunigungen stattfinden sollen, welche die Achsen aus der Ruhe beschleunigen bzw. diese wieder abbremsen, die einzelnen Punkte auf dem Weg werden nur durchfahren. Zur Minimierung von starken Trägheitsmomenten ist es weiterhin notwendig, dass die beiden Achsen zusammen keine gradlinigen Fahrtwege zwischen den Wegpunkten nutzen, sondern in abgerundeten (gedämpften) Trajektorien die einzelnen Koordinatenpunkte abfahren. Die konkrete Parametrierung der Fahrwegabschnitte und der sich daraus ergebenden Trajektoriemuster soll Teil der Testszenarien des mehrachsigen Positioniersystems sein. An der Zielposition angekommen, schwenkt der sich auf der z-Achse befindende Arm um, und das Objekt wird über der Ablageposition vom Greifer losgelassen, sodass es auf der Zielposition verweilt. Die Anlage fährt nun den Weg zur Startposition zurück, um ein weiteres Objekt aufzunehmen und dieses wie bereits beschrieben zu transportieren.

Mögliche spätere Erweiterungen könnten sein, dass der Rückweg anders gewählt wird, da kein Objekt transportiert wird und somit auftretende Trägheitsmomente und Schwingungen keine wichtige Rolle spielen. Alternativ könnte auch auf dem Rückweg ein anderes Objekt von Ablageposition B zu Ablageposition A transportiert werden, welches andere Eigenschaften aufweist, was den Fahrtweg beeinflussen könnte.

Für die vollständige Automatisierung des Prozesses ist eine spätere Erweiterung nötig, bei der auch die Ablageposition(en) automatisch mit neuen Transportobjekten bestückt werden. Es würde sich eine Aufrüstung mit Förderbändern von und zu den Ablagepositionen der Anlage lohnen, sodass steig neue Objekte dem Positioniersystem bereitgestellt und von diesem auch wieder entnommen werden können.

Im letzten Schritt kann die Anlage wieder deaktiviert werden, was über die Abwahl des aktuellen Betriebsmodus geschieht. Es muss der gleiche Taster wie bei der Auswahl des Modus betätigt werden. Dies ist in jedem Moment während der Laufzeit des Automatikmodus möglich. Die letzte Transportaufgabe wird noch vollständig zu Ende durchgeführt. Danach findet das Homing statt, bei dem der sichere Ausgangszustand der Anlage wieder angefahren und die Bremsen der Motoren wieder aktiviert werden. Die Bremsen dienen beim Erreichen des Leerlaufes nicht nur zum Abbremsen der Achsen, sondern sind nötig, damit der Schlitten auf der Vertikalachse nicht bis nach unten fällt. Nach erfolgreicher Abwahl des Betriebsmodus erlischt die Indikatorlampe für den Automatikbetrieb wieder. Nur wenn kein Modus ausgewählt ist, kann die 24 V Ebene wieder spannungsfrei geschalten und die Laboranlage wieder deaktiviert werden. Dies geschieht über den Aus-Taster auf der Front des Schaltschrances. Nach Betätigung des Tasters erlischt die Lampe, welche die Betriebsbereitschaft des Positioniersystems signalisiert.

**Handbetrieb:** Bei dem Handmodus handelt es sich um die zweite Betriebsart der Positioniereinheit. Anders als im Automatikbetrieb dient der Handmodus nicht als Abarbeitungsmodus für Positionieraufgaben, sondern soll als manuelle Bedienmöglichkeit genutzt werden können. Das heißt konkret, dass erst durch das Betätigen von Tastern Bewegungen

und Aktionen durchgeführt werden.

Wie auch schon im Automatikmodus wird die Anlage zunächst unter Spannung gesetzt durch Betätigung des Hauptschalters. Anschließend fahren die Steuerungen hoch. Zur Auswahl des Handbetriebes muss nur der Betriebsmodusschalter auf „HAND“ eingestellt und nachfolgend per Taster bestätigt werden. Die erfolgreiche Auswahl wird durch das Aufleuchten der weißen Taster an der Front des Schaltschranks signalisiert.

Nach der Wahl des Handmodus verbleibt die Anlage zunächst im Ruhezustand. Die beiden Achsen befinden sich an der Ausgangsposition, die im Leerlauf aktuell gegeben ist. Um die Positioniereinheit in Bewegung zu setzen, ist nun eine Nutzereingabe nötig.

An der Frontseite des Schaltschranks befindet sich ein Vierfachtaster mit Pfeilen in x- und z-Richtung. Mittels der Taster kann per Druck die jeweilige Achse bewegt (gejoggt) werden. Dies geschieht so lange, bis der Taster wieder losgelassen wird oder eine der Endlagen erreicht ist. Bei Betätigung eines Tasters fahren die Achsen jedoch nicht mit voller Geschwindigkeit an, sondern beschleunigen erst langsam. Auch die Beschleunigung beim Loslassen bzw. Abbremsen einer Achse ist verringert gegenüber dem Automatikmodus. Über zwei Potentiometer rechts neben den vier Bewegungstastern kann die Fahrtgeschwindigkeit reguliert werden.

Nach manuellem Navigieren zu den Ablagepositionen besteht an diesen die Möglichkeit, den Greifer einzusetzen. Nun muss jedoch jeder einzelne Schritt, also Umschwenken zur Ablage, Greifen und wieder Loslassen eines Transportobjektes per Druckknopf getriggert werden.

Weiterhin ist als Randbedingung im Handbetrieb vorgesehen, dass in den äußeren Bereichen des Positioniersystems zum einen nur geringere Geschwindigkeiten gefahren werden können als auch, dass die Beschleunigung der Achsen in diesen Bereichen gedämpft ist, um zu verhindern, dass die Schlitten auf den jeweiligen Achsen über die Endlagen hinaus Abbremsen und mit den harten Stoppelementen am äußersten Ende der Achsen kollidieren. Im Handmodus sind keine virtuellen Hindernisse vorgesehen auf dem Fahrtweg des Greifers, da kein Mehrwert aus dem manuellen Umfahren gewonnen wird und maximal die Koordination des Nutzers trainiert werden kann. Programmatisch wäre an dieser Stelle kein Mehrwert zu erreichen, falls der Nutzer per Tastendruck Kollisionen mit Hindernissen verhindern sollte.

Nach Wiederabwahl des Handmodus durch den Stop-Taster ist die Anlage wieder im Leerlauf.

**Sicherheitsbezogene Randbedingungen:** Als letzten Unterpunkt in diesem Teilkapitel soll noch ein Überblick zu den Sicherheitsmaßnahmen der Anlage gegeben werden. Für die detaillierte Darstellung und Projektierung des Sicherheitskonzeptes wird an dieser Stelle auf Unterabschnitt 3.8 verwiesen.

Allgemein wird durch jegliche Sicherheitsmaßnahmen an und um die Laboranlage herum sichergestellt, dass weder Mensch noch Maschine Schaden nehmen sollte. Grundlegend muss gewährleistet sein, dass das Positioniersystem nicht außerhalb seiner vorgesehenen

Aufgaben und Abläufe agieren kann. Dazu sind kurz vor jedem Ende der zwei Achsen des Systems induktive Endlagesensoren verbaut. Diese lösen aus, wenn ein Schlitten auf einer Achse das Ende eines Fahrbereiches einer Achse erreicht hat. Ist dies der Fall, wird die betreffende Achse umgehend abgebremst. Diese Sicherheitsmaßnahme ist zum einem im Handbetrieb, aber auch im möglichen Fehlerfall von höchster Relevanz. Dem Anlagennutzer darf zum einen nicht eine Achse im manuellen Betrieb auf einen der Puffer am Ende des befahrbaren Weges auffahren lassen, zum anderen muss die Anlage in egal welcher Situation (was auch den Fehlerfall einschließt) unweigerlich an den Endlagesensoren zum Stillstand abbremsen.

Es können weiterhin aber auch im normalen Betriebsablauf Fehler oder Notfälle entstehen, die dem System nicht durch das Erreichen von einem oder mehreren Endlagepositionen bekannt werden. So muss verhindert werden, dass eine sich im Bereich der Positionier-einheit befindliche Person nicht in den Prozess physisch eingreifen kann. Dazu ist, wie bereits zum Eingang des Unterkapitels erwähnt, ein Lichtvorhang vor dem Positionier-bzw. Fahrbereich der Laboranlage installiert. Wird der Vorhang durchbrochen, löst dies ein Signal aus, welches dazu führt, dass die Anlage schnellstmöglich abbremst und zum Stillstand kommt. Es handelt sich folglich um eine Not-Halt-Funktionalität. Selbige kann auch von einer Person manuell ausgelöst werden, auch ohne dass der Lichtvorhang ein Eindringen in den Positionierprozess detektiert hat. Sowohl auf der Linken als auch auf der rechten Seite des Systems ist ein einrastender Not-Halt Taster montiert. Falls Fehler oder Notfall vorliegt, kann dieser betätigt werden.

Damit das mehrachsige Positioniersystem nach einem Fehler wieder seinen Betrieb aufnehmen kann, muss der Fehler zunächst beseitigt werden und anschließend kann über zweifaches Drücken eines dafür deklarierten Tasters am Schaltschrank die Anlage wieder freigegeben werden. Nach dieser Handlung setzt die Anlage entsprechend ihres aktuell ausgewählten Betriebsmodus ihren ursprünglichen Ablauf fort.

Auch durch visuelle Signale soll die Sicherheit von Menschen, die sich in der Nähe oder an der Maschine befinden, verbessert werden. Dazu wird eine Signalampel genutzt, die bei Bewegung von Achsen blinkt und im Eingeschalteten Zustand des Positioniersystems immer mindestens in einer Farbe leuchtet. Konkrete Umsetzungen werden auch hierzu im Unterabschnitt 3.8 beschrieben.

## 2.4 Bedienkonzept

Der letzte Abschnitt der Anlagenkonzeption behandelt die Erstellung des Bedienkonzeptes. Das Bedienkonzept beschreibt die Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Im Zentrum des Konzeptes steht die Art und Weise, wie der Bediener Befehle an die Maschine übergibt und in welcher Form er Informationen von der Maschine wieder zurückbekommt [Wie12, Seite 170].

Das Bedienkonzept wird in dieser Arbeit in zwei Unterabschnitte unterteilt. An erster Stelle steht die Bedienung der Laboranlage über als Hardware implementierte Bedienelemente. Der zweite Unterabschnitt stellt das Bedienungskonzept über eine Softwarevisualisierung dar. Für die Nutzung des mehrachsigen Positioniersystems selbst ist die Bedienung über eine Bediensoftware von größerer Relevanz. Die Hardwareimplementierung dient lediglich als Ergänzung. Ausnahme stellt die Not-Halt-Funktionalität dar, welche unabdinglich als Hardwarekomponente verbaut werden muss, um eine schnelle Reaktionszeit im Notfall-/Fehlerfall zu gewährleisten (Implementation in Form von einrastenden Not-Halt-Tastern).

### 2.4.1 Bedienung über Hardwarekomponenten

Grundsätzlich erfolgt die Bedienung des Positioniersystems über ein Bedienpanel an der Front des Schaltschrances der Anlage. Nach dem Einschalten über einen Netzschalter an der rechten Seite des Schrankes kann die restliche Bedienung über besagtes Panel vorgenommen werden.

Auf der linken Seite des Bedienfeldes befindet sich wie auch in Abbildung 5 zu erkennen ist ein Vier-Wege-Richtungsgeber, über welchen später durch Tasten der einzelnen Tastelemente die beiden Achsen des Systems im Handmodus joggt werden können.

Rechts an der Schaltschrankfront ist eine Gruppierung von weiteren tast-, schalt- und drehbaren Bedienkomponenten zu erkennen. Im linken Bereich der Gruppierung sind vier weitere Taster zu erkennen. Dabei handelt es sich um den grünen *START/RESET*-Taster, den roten *STOP*-Taster und zwei weiße Taster, die in dieser Arbeit als Trigger für Greifaktionen des Systems genutzt werden. Die beiden Taster können nach Belieben von Anwender umprogrammiert werden, falls ein anderer Anwendungsfall umgesetzt werden soll.

Weiter rechts sind zwei Potentiometer am Schaltschrank angebracht, über die separat die Geschwindigkeit der x- und z-Achse angepasst werden kann. Auf der ganz rechten Seite in Abbildung 5 zu sehen sind oben ein Schalter für den Betriebsmodus (linke Position - Handmodus; rechte Position - Automatikmodus). Darunter ist ein Ethernetport zu erkennen, der als externe Programmierschnittstelle genutzt werden soll und intern mit einem Switch verbunden ist, der alle Steuerungen des Systems miteinander verbindet.

Das letzte Bedienelement auf der Schaltschrankfront ist der *NOT-HALT*-Taster (ganz unten rechts in Abbildung 5).

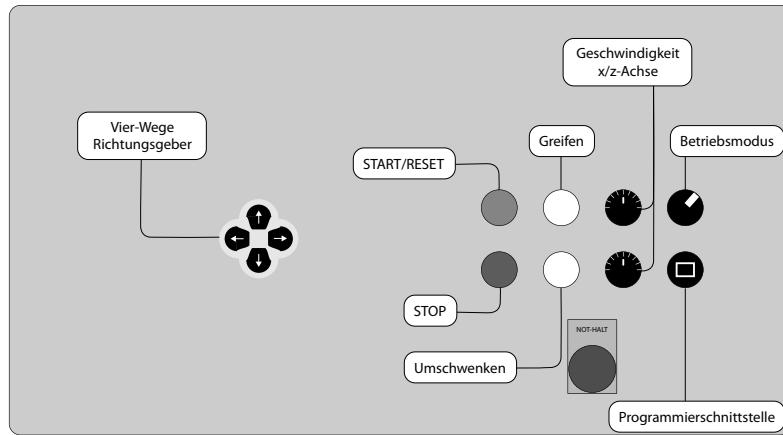


Abbildung 5: Bedienpanel an der Schaltschrankfront des Positioniersystems

Abseits der Bedienelemente am Schaltschrank finden sich noch zwei weitere Komponenten am Gehäuse der Laboranlage selbst wieder. An der äußersten linken Seite an der Front der Anlage ist ein weiterer *NOT-HALT*-Taster vorgesehen. Dieser wird ergänzt durch eine zweifarbige (grün, rot) Ampel oben rechts am Gehäuse. Diese soll den aktuellen Systemzustand signalisieren (Betriebsbereit, gestoppt, in Bewegung).

Bereits aus dem Umfang des durch Hardwarekomponenten umgesetzten Bedienkonzeptes ist eine Notwendigkeit einer ergänzenden Softwarebedienung über eine GUI zu erkennen, um sowohl eine leichtere, als auch vollständige Bedienung nach Anforderungsvorgaben zu erfüllen.

#### 2.4.2 Bedienung per GUI

Die Interaktion mit dem System soll hauptsächlich über ein mobiles Endgerät geschehen (z. B. Smartphone, Tablet). Es würde sich anbieten ein HMI bzw. ein Tablet abnehmbar an das System anzubringen, um es mit diesem steuern zu können. Auf diesem soll dann eine GUI wiederzufinden sein, über welche das mehrachsige Positioniersystem bedient werden kann.

Dazu werden zunächst zwei Iterationen der Umsetzung geplant. Aufgrund des geringeren Entwicklungsaufwandes und somit einer Zeitersparnis könnte für grundlegende Systeminteraktionen eine reine auf Codesys 3.5 basierende Visualisierung genutzt werden. Vorgreifend zur Implementationsphase soll an dieser Stelle das *MotionTemplateFull* Erwähnung finden, welches die Basis für das Steuerungsprogramm des Positioniersystems darstellen wird. Das Template besitzt bereits eine Visualisierung, die genutzt werden kann. Nachfolgende Grafik (Abbildung 6) zeigt die Visualisierung.

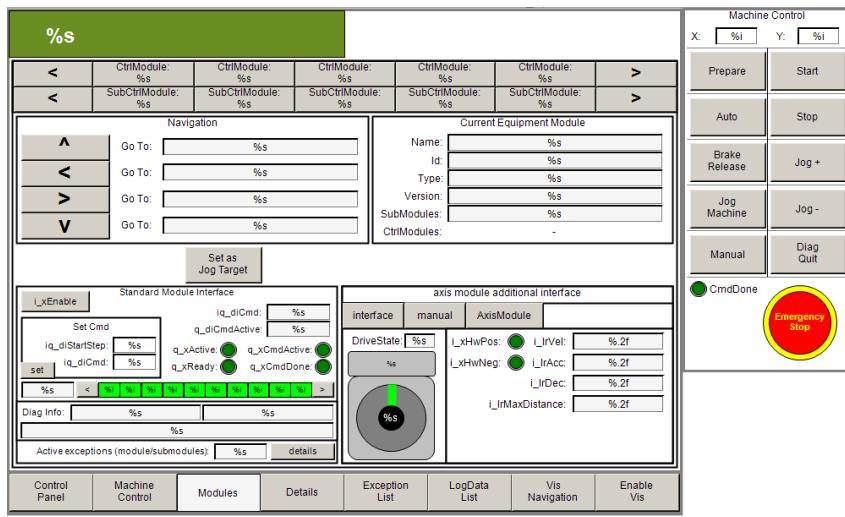


Abbildung 6: Visualisierung zur Bedienung des Positioniersystems

Wie bereits angedeutet soll die Visualisierung in Abbildung 6 im zweiten Iterationsschritt ersetzt werden durch eine GUI. Dabei soll es sich um eine web-basierte Anwendung handeln, die über einen Backend-Service, welcher als OPC UA Client fungiert, mit dem System kommunizieren kann. Der Service (im Folgenden als OPC Gateway bezeichnet) wird programmiert in Python 3. Dabei können zum einen OPC Daten von der Steuerung des Systems (LMC) entgegengenommen werden, welche zum anderen dann über einen Webservice an eine frontend GUI weitergeleitet werden. Der Datenaustausch kann bidirektionalen erfolgen, womit die Möglichkeit besteht über die Webanwendung das System per OPC UA Datenaustausch zu steuern.

Ein grundlegender Entwurf ist in Abbildung 7 dargestellt.

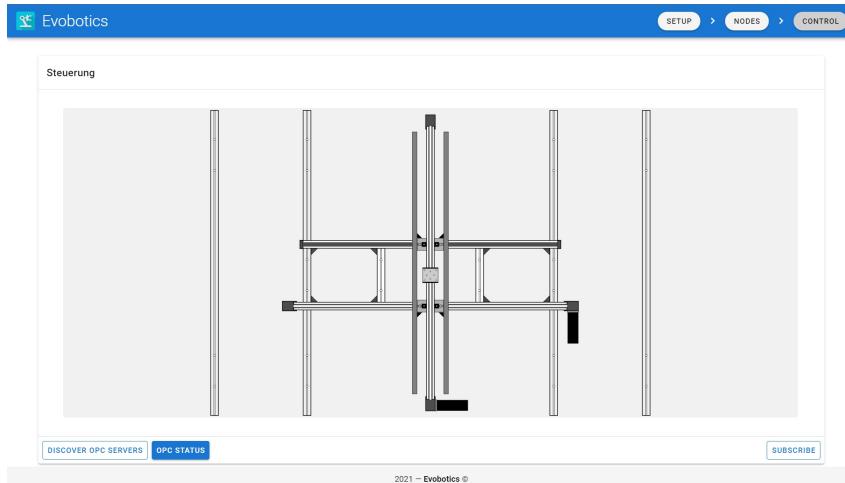


Abbildung 7: GUI zur Bedienung des mehrachsigen Positioniersystems

Der Vorteil der web-basierten Bedienung des Systems liegt auf der einen Seite in den umfangreichen Möglichkeiten der Gestaltung, die die Visualisierungskomponenten von Codesys 3.5 um ein tausendfaches übertreffen. Auf der anderen Seite können neue Bedienungsarten in die Oberfläche integriert werden. Die Anwendung kann nach Fertigstellung Toucheingaben entgegennehmen, um beispielsweise absolute Positionierungsaufgaben simpel zu gestalten. Eine Erweiterung dieser Funktionalität wäre es gleich ganze Wege als Trajektorien mit dem Finger bzw. einem Stift zu zeichnen, die anschließend von der Positioniereinheit abgefahren werden. Die Umsetzung ermöglicht es nach Belieben Erweiterungen hinzuzufügen. Abbildung 7 stellt somit zunächst ein grundlegendes Konzept dar und keinesfalls ein fertiges Produkt.

---

## 3 Projektierung

Nachdem im letzten Kapitel die Anforderungsphase des mehrachsigen Positioniersystems behandelt wurde, schließt sich nun die Design- bzw. Modellierungsphase in diesem Kapitel an.

Der Entwicklungsprozess unter den Gesichtspunkten der Projektierung umfasst folgende fünf Kernabschnitte, die es zu untersuchen gilt:

- **Kontextanalyse:** Finden der Systemgrenzen und Ermittlung von Nachbarsystemen.
- **Anwendungsfallspezifikation:** Identifizierung der Systemprozesse und anschließende Präzisierung.
- **Verhaltensspezifikation:** Modellierung des Systemverhaltens.
- **Partitionierung:** Untergliederung des Systems in logische Sinnesabschnitte zur Verringerung der Komplexität.
- **Testspezifikationen:** Festlegung von Prüfkriterien zur Bestätigung der Anforderungsumsetzung.

Die drei letzten Abschnitte des Kapitels zur Projektierung dienen als direkte Vorbereitung für die Implementationsphase des Positioniersystems. Es wird zum einen kurz die Entwicklung des Stromlaufplanes dargestellt, welcher die Grundlage bildet für die elektrotechnische Inbetriebnahme der Laboranlage. Nachfolgend soll in tabellarischer Form das Datenmodell aufgestellt werden, welches zusammen mit den UML Diagrammen aus dem Entwicklungsprozess die Basis für die Softwareimplementation darstellt.

### 3.1 Kontextanalyse

Ziel der Kontextanalyse ist die Abgrenzung des Kontexts bzw. das Finden von Systemgrenzen. Bei dem mehrachsigen Positioniersystem handelt es sich um ein sogenanntes eingebettetes System (engl. Embedded System). Diese kommunizieren meist stark mit ihrer Umwelt bzw. sind meist stark mit dieser verankert [Mar07, Seite 2]. So auch hat das Positioniersystem Schnittstellen, über die eine Kommunikation mit Nachbarsystemen stattfindet. In der Systemkonzeption muss folglich geklärt werden, wo genau die Systemgrenzen liegen. Weiterhin findet in der Kontextabgrenzung auch die Identifizierung von Nachbarsystemen statt [Wal05, Seite 49].

Zuerst muss geklärt werden, ob die Systemumgebung dynamischer Natur ist, das heißt, dass Nachbarsysteme wechseln bzw. das System nicht umgebungstreu ist. Handelt es sich im Gegensatz dazu um ein System mit stabiler Umgebung, ist die Darstellung von Nachbarsystemen simpel und kann nachfolgend im entsprechenden Diagramm dokumentiert werden. Da das mehrachsige Positioniersystem fest in den Laborraum integriert ist, und alle

Nachbarsysteme bereits bekannt sind, wird in der Analyse von einer statischen Umgebung ausgegangen. Die sich anschließende Liste zeigt alle derzeitigen Nachbarsysteme, in die das mehrachsige Positioniersystem eingebettet ist.

- Laborcomputer
- Ablageschale/Aufnahmeschale (Ablagepositionen)
- Externe Industriesteuerungen
- Augmented Reality Server
- Verwaltungsschalen (Digitaler Zwilling)
- Mögliche spätere Erweiterung: Förderbänder
- Mögliche spätere Erweiterung: Vorratslager (statt Aufnahmeschale)
- Mögliche spätere Erweiterung: Lagermagazin(e) (statt Ablageschale)

Ist die Identifizierung der Nachbarsysteme abgeschlossen, kann mit der Kontextanalyse begonnen werden. Der Kontext unterteilt sich in den logischen Kontext und den physikalischen Kontext. Der **logische Kontext** betrachtet die Kommunikation mit den Nachbarsystemen, wohingegen der **physikalische Kontext** auf die Kommunikationshardware fokussiert ist [Man21, Seite 45].

Für die Dokumentation der logischen Kontextabgrenzung bietet sich das Anwendungsfalldiagramm der Unified Modeling Language (UML) an. Dabei handelt es sich um die allgemein gängige Form für diese Aufgabe. Das Anwendungsfalldiagramm ist geeignet an dieser Stelle für die Modellierung, da für die Darstellung noch keine detaillierten Entscheidungen über die Schnittstellen getroffen werden müssen. Es besitzt die Fähigkeit das zu modellierende System und seine Nachbarsysteme in Beziehung darzustellen und deren Kommunikation grundlegend anzudeuten. Abbildung 8 zeigt die logische Kontextabgrenzung des mehrachsigen Positioniersystems zu den bereits aufgezählten Nachbarsystemen mittels des Anwendungsfalldiagramms.

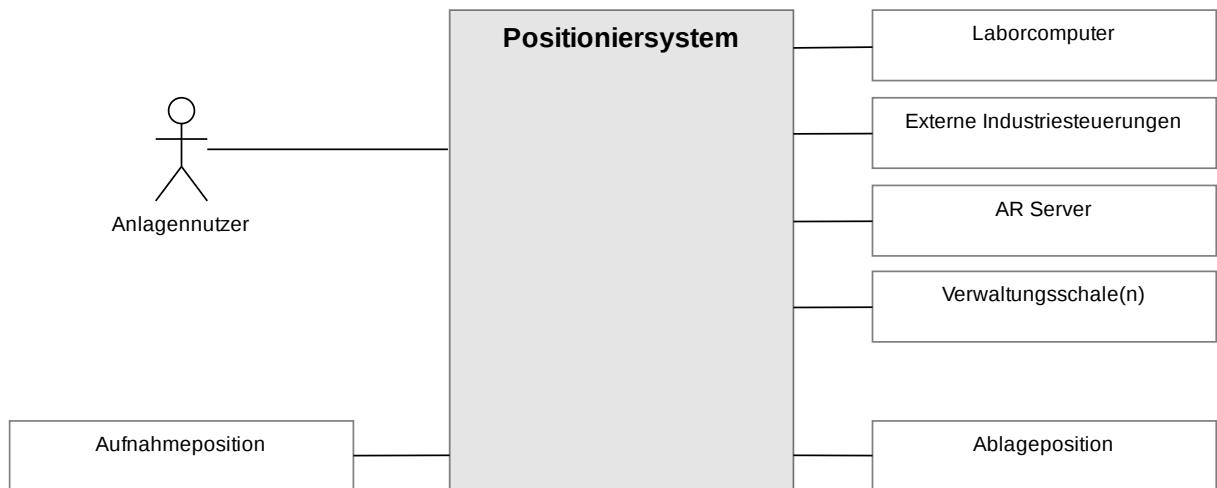


Abbildung 8: Logische Kontextabgrenzung des mehrachsigen Positioniersystems als Anwendungsfalldiagramm

Noch nicht erwähnt waren bisher die Akteure des Positioniersystems. Akteure eines eingebetteten Systems sind Sensoren, E/A-Geräte, Nachbarsysteme und die Zeit. Sie befinden sich grundsätzlich außerhalb des Systems [Tab06, Seite 262].

Die zu modellierende Laboranlage besitzt folglich mehrere Nachbarsysteme, die als Akteure bezeichnet werden können. Weiterhin sind Menschen, die in Kontakt mit dem System stehen, relevant. Diese gelten auch als Akteure und werden als Strichfigur im Anwendungsfalldiagramm aufgenommen. Der Anlagennutzer des Positioniersystems ist als Akteur auf der linken Seite der Abbildung 8 aufgeführt. Die Nachbarsysteme auf der rechten oberen Seite besitzen wiederum Akteure, die an dieser Stelle jedoch nicht dargestellt sind, da diese mit dem mehrachsigen Positioniersystem nur indirekt über die Nachbarsysteme kommunizieren. Abbildung 8 besitzt somit einen einzigen Akteur (als Strichmännchen dargestellt) und mehrere Nachbarsysteme (Als Rechtecke dargestellt). Da bei der Kontextabgrenzung noch keine Anwendungsfälle dokumentiert werden bleibt das Anwendungsfalldiagramm des mehrachsigen Positioniersystems noch leer. Das Anwendungsfalldiagramm wird über den Verlauf der folgenden Analyseschritte entwickelt.

Es kann abschließend festgehalten werden, dass der logische Kontext beantwortet, welche Akteure für das System existieren. Es besteht die Notwendigkeit nach diesen zu suchen, und sie in Form des Anwendungsfalldiagrammes im Bezug zum Positioniersystem darzustellen. Nach der Aufstellung des logischen Kontexts der Laboranlage wird nun darauf aufbauend fortgesetzt mit der physikalischen Kontextabgrenzung. Im Unterschied zum logischen Kontext wird die Fragestellung erweitert um die konkreten Einflüsse der Akteure auf das System. Es gilt zu untersuchen, wie die Kommunikation zwischen den Akteuren und dem mehrachsigen Positioniersystem aufgebaut ist. Dazu bietet es sich an das Verteilungsdiagramm der UML zu nutzen. Wie auch schon bei der logischen Kontextabgrenzung wird das

Positioniersystem im Zentrum zwischen den Akteuren als zentraler Knoten dargestellt. Die Nachbarsysteme werden ringsherum als eigenständige Knoten aufgeführt. In Abbildung 9 zur physikalischen Kontextabgrenzung wird auch der Anlagennutzer als Nachbarsystem betrachtet, um mehr Freiräume in der Darstellung der Schnittstelle zwischen diesem und dem Positioniersystem zu ermöglichen. Abbildung 9 zeigt das Verteilungsdiagramm der Positioniereinheit und seiner Nachbarsysteme zur Beantwortung der Frage nach dem physikalischen Kontext.

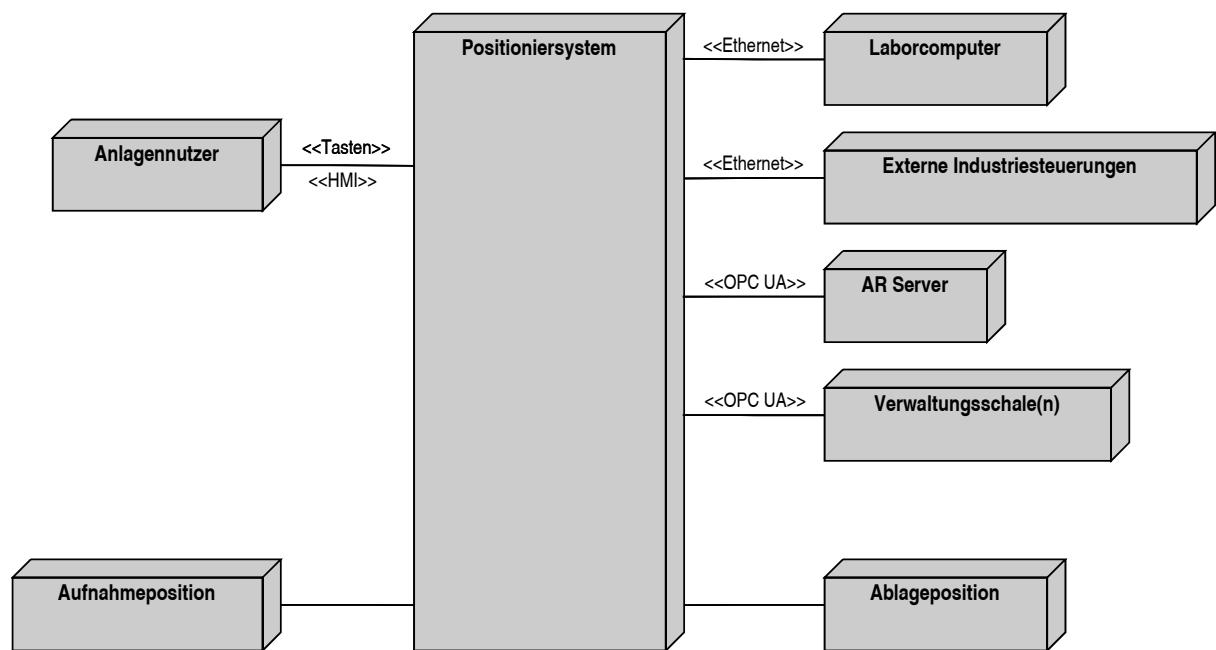


Abbildung 9: Physikalische Kontextabgrenzung des mehrachsigen Positioniersystems als Verteilungsdiagramm

Im Unterschied zu Abbildung 8 werden nun an den Verbindungen zwischen den Systemen Stereotypen mit aufgeführt, falls die Hardware und Kommunikation der untersuchten Systeme bereits bekannt ist. Mithilfe des Verteilungsdiagrammes wird die Frage beantwortet, wie die Akteure auf das Positioniersystem Einfluss nehmen. Es kann hier bereits aus den Anforderungen entnommen werden, wie der Anlagennutzer mit dem System interagiert und wie Datenaustausch zwischen der internen Steuerung und externen Industriesteuerungen stattfindet. Auch die Programmierschnittstelle ist bereits vorgegeben. Aus den Anforderungen der Labormitarbeiter geht weiterhin hervor, dass für Verwaltungsschalen aber auch den Augmented Reality (AR) Server Prozessdaten via OPC UA Schnittstelle bereitgestellt werden sollen.

Die Stereotypen für z. B. den Anlagennutzer als Akteur sind somit „Tasten“ und „HMI“

„, da dieser auf diesem weg mit der Laboranlage kommuniziert bzw. interagiert. Human Machine Interface (HMI) ist zu deutsch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS). Für die Interaktion mit dem Positioniersystem ist zum Einen die grundlegende Steuerung über Taster an der Front des Schaltschranks geplant, weiterhin soll diese erweitert werden um eine Kommunikationsschnittstelle, die auf touch-basierten Displays beruht. Dabei handelt es sich um ein Industrietablet, welches am System angebracht werden kann. Aus den Anforderungen geht zusätzlich hervor, dass die Steuerung auch per Smartphone oder Tablet erfolgen kann.

Wie auch schon beim Anwendungsfalldiagramm bleibt das Verteildiagramm zunächst leer. Im Verlauf der Analysephase wird das Diagramm komplettiert.

In diesem Unterkapitel ist die Kontextabgrenzung des mehrachsigen Positioniersystems analysiert worden. Dabei wurde unterschieden zwischen der logischen- und der physikalischen Kontextabgrenzung. Dazu mussten zunächst die Nachbarsysteme ermittelt werden, die auch als Akteure bezeichnet werden. Der wesentliche Unterschied zwischen dem logischen und dem physikalischen Kontext besteht im Detailgrad der Analyse, welcher sich auch in der Darstellung wiederfindet. Für die logische Kontextabgrenzung empfiehlt sich das Anwendungsfalldiagramm der UML. Die physikalische Kontextabgrenzung erfolgte über das Verteilungsdiagramm. Weiteres betrachtet dabei als Erweiterung auch die Hardware und Art der Kommunikation über die eingezeichneten Schnittstellen. Dies wird als Stereotyp bezeichnet, welcher zwischen den Systemen, die auch als Knotenpunkte bezeichnet werden, dargestellt ist.

## 3.2 Anwendungsfallspezifikation

Nach dem Abschließen der Festlegung des Kontextes des mehrachsigen Positioniersystems folgt nun die Identifizierung von Systemprozessen. Der Findungsprozess erfolgt über die Anwendungsfallanalyse. Dabei wird ein System als Black-Box betrachtet, um möglichst gute Systemprozesse zu finden, ohne sich von internen Gegebenheiten des Systems beeinflussen zu lassen [Gol11, Seite 401].

Die Anwendungsfallspezifikation wird in dieser Arbeit in zwei Unterkapitel eingeteilt. Ersteres beschäftigt sich mit dem Finden und Entwickeln von Systemprozessen. Das zweite Unterkapitel hat zum Ziel die Systemprozesse zu präzisieren und diese dann übersichtlich darzustellen.

### 3.2.1 Entwicklung der Systemprozesse

Die Anwendungsfallanalyse baut auf dem Anwendungsfalldiagramm auf Abbildung 8. Dabei findet auch an dieser Stelle eine Unterteilung in zwei Abschnitte statt. Im ersten Schritt werden die Akteure aus den Diagrammen des Unterabschnitt 3.1 geprüft und um eventuelle Akteure ergänzt, die bis zu diesem Zeitpunkt nicht erkannt wurden. Diese werden zunächst in die Kontextabgrenzung mit aufgenommen, bevor im folgenden Abschnitt die Anwendungsfallanalyse beginnt.

Im zweiten Schritt werden die Erwartungen der Akteure an das System untersucht. Aus der Analyse erfolgt die Ableitung von möglichen Systemprozessen. Dieser Abschnitt hat es folglich als Ziel, die Frage nach den durch die Akteure geforderten Voraussetzungen zu beantworten.

Für die Entwicklung der Systemprozesse wird somit auf den logischen Kontext zurückgegriffen, da dieser die Akteure des Systems bereits im Anwendungsfalldiagramm (siehe Abbildung 8) zeigt. Da es nur um die Frage nach den Akteuren und ihren Erwartungen geht und dabei die Hardware und die Ausprägung der Kommunikation des Positioniersystems nicht relevant ist, spielen der physikalische Kontext und dessen Ergebnisse keine Rolle.

Die Abbildung 10 zeigt die Systemprozesse, die aus der Anlagenbeschreibung modelliert werden. Es ist ersichtlich, dass gezeigtes Anwendungsfalldiagramm eine Erweiterung der Abbildung 8 aus dem vorhergegangenen Unterabschnitt ist.

Neu dazugekommen sind die Anwendungsfälle, die durch den Anlagennutzer ausgelöst werden können. Konkret handelt es sich also um die zwei auswählbaren Betriebsmodi und den Not-Halt. Weiterhin ist der Transport von Gegenständen im Anwendungsfalldiagramm aufgeführt. Der grundsätzliche Nutzen des Positioniersystems ist somit das Positionieren. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass dieser Anwendungsfall von den vorher genannten drei Anwendungsfällen/Betriebszuständen abhängig ist. Zuletzt findet sich noch die Bereitstellung von Prozessdaten im Diagramm wieder.

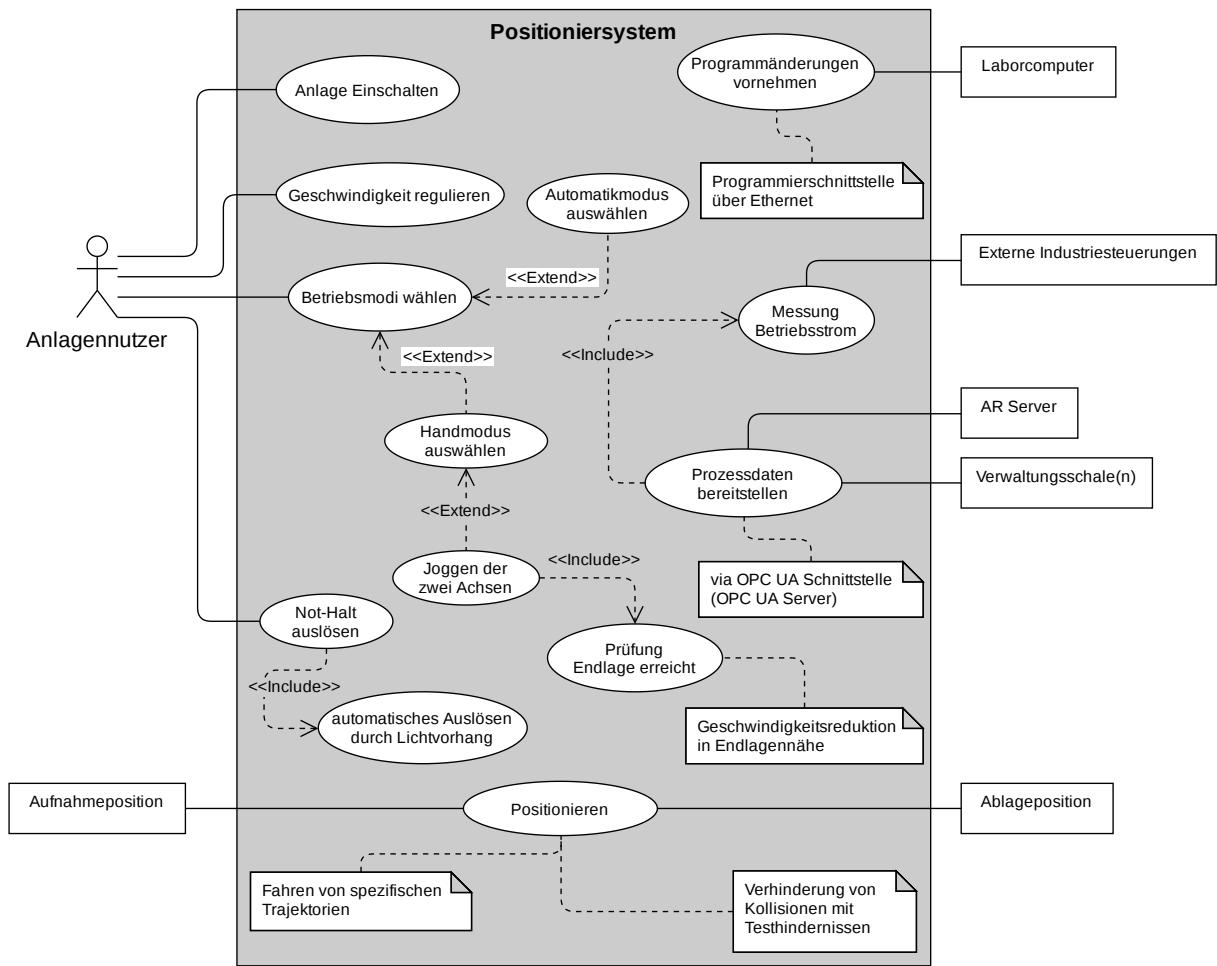


Abbildung 10: Anwendungsfalldiagramm des Positioniersystems

### 3.2.2 Präzisierung der Systemprozesse

Dieser Unterabschnitt greift die Systemprozesse aus der Anwendungfallanalyse des vorhergegangenen Unterabschnittes noch einmal auf und verfeinert diese. Im Folgenden wird zunächst die genutzte Methodik zur Spezifizierung der Systemprozesse vorgestellt.

Für die Spezifikation von Systemprozessen empfiehlt es sich die Anwendungfallbeschreibung als Mittel zur Dokumentation zu nutzen. Diese sollte in Form von Tabellen erfolgen. Dabei wird jeder einzelne Akteur in seiner eigenen Tabelle dargestellt. Bei den relevanten Tabelleneinträgen handelt es sich um die Zeilen Name, Akteur, auslösendes Ereignis, Kurzbeschreibung, Vorbedingungen, essenzielle Schritte, Ausnahmefälle, Nachbedingungen, Zeitverhalten, Verfügbarkeit und Kommentare/Fragen [Man21, Seite 227].

Sowohl der **Name** als auch der **Akteur** wird dabei aus dem Anwendungsfalldiagramm aus Abbildung 10 übernommen. Es sind am Ende alle Akteure aus dem Anwendungsfal-

diagramm tabellarisch aufgenommen. Das Feld **auslösendes Ereignis** beschreibt den Initiator des Anwendungsfalls. Der nächste Eintrag, die **Kurzbeschreibung** ist eine in zwei bis vier Sätzen dokumentierte wörtliche Beschreibung des Prozesses und dient zur Darstellung seines Kerns. Das Feld **Vorbedingungen** enthält zusammengefasst alle Voraussetzungen, die für die Ausführung des Anwendungsfalls nötig sind. Der nächste Eintrag stellt den wichtigsten Schritt in der Dokumentation des Anwendungsfalls dar. Dieser wird unterteilt in zwei weitere Felder, die im direkten Bezug zueinander stehen. Es werden auf der einen Seite Ereignisse aufgenommen, die während der Standardausführung des Prozesses auftreten bzw. auftreten können und auf der anderen Seite die Reaktionen des Systems auf diese Ereignisse. Das Feld **Ausnahmefälle** betrachtet alle Fehler und Ausnahmesituationen, die abweichend von der Standardausführung auftreten können. Die **Nachbedingungen** sind analog zu den Vorbedingungen zu dokumentieren und beschreiben den Endzustand des Prozesses nach einer Standardausführung. In den Punkten **Zeitverhalten** und **Verfügbarkeit** können NFAs des Anwendungsfalls festgehalten werden. Zuletzt, im Feld **Kommentare/Fragen**, können Anmerkungen und Probleme aufgenommen werden, falls diese existieren. Es gilt diese bis zur Fertigstellung des Systems zu eliminieren, sodass dieses Feld leer bleiben kann. Es handelt sich folglich um ein temporäres Hilsmittel.

Es bietet sich im Normalfall an zwei Abstraktionsebenen in der Darstellung der Systemprozesse zu nutzen. Dazu gehört eine detaillierte Dokumentation für die Prozessentwickler und ein abstrakter Überblick für Manager und weniger stark involvierte Personen. Auf besagten Überblick wird jedoch an dieser Stelle verzichtet, da alle für das System relevanten Personen und Stakeholder ausreichend mit der Positioniereinheit und der Umsetzung eines solchen Systems vertraut sind. Im Anhang kann jedoch trotzdem zu jedem Akteur auch ein Überblick gefunden werden.

Es folgen nun die tabellarischen Darstellungen zu den Anwendungsfällen nach beschriebinem Muster.

<b>Name</b>	Positionieren
<b>Akteur</b>	Aufnahmeposition
<b>Auslösendes Ereignis</b>	Auswahl des Automatikmodus wurde bestätigt
<b>Kurzbeschreibung</b>	Ein Transportobjekt wird mit dem Greifer von der Aufnahmeposition angehoben. Anschließend führt das System seine eigentlichen Positionieraufgaben durch (z. B. Fahren einer hindernisausweichenden Trajektorie). Auf der Ablageposition wird das Transportobjekt wieder losgelassen.

<b>Vorbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage wurde eingeschaltet</li> <li>• der Automatikmodus wurde ausgewählt</li> <li>• Starbedingung des Automatikprogrammes erfüllt (z. B. Aufnahmeposition ist mit Transportobjekt bestückt)</li> </ul>	
<b>Schritte</b>	<b>Intention der Systemumgebung</b>	<b>Reaktion des Systems</b>
	Positioniereinheit soll vollautomatisch Transportgüter von der Aufnahmeposition zur Ablageposition befördert	Laboranlage beginnt Objekte von der Aufnahmeposition zu greifen und zu transportieren
	Not-Halt wird aufgrund einer Gefahrensituation ausgelöst	Die Laboranlage bremst bis zum Stillstand ab und erwartet eine Bestätigung, dass die Gefahren- bzw. Fehlersituation beseitigt ist
	Bewegungsgeschwindigkeit des Systems wird angepasst	Die Achsen des Systems bewegen sich entsprechend der analogen Nutzereingabe schneller bzw. langsamer
	Laboranlage soll durch Anlagenutzer gestoppt werden	Der Automatikbetrieb beendet seinen aktiven Zyklus und wird dann abgewählt, woraufhin die Anlage stoppt
<b>Ausnahmefälle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defektbedingte Abschaltung der Anlage</li> </ul>	
<b>Nachbedingungen</b>	Der Automatikmodus ist beendet und die Anlage kann abgeschaltet werden.	
<b>Zeitverhalten</b>	schnell und effizient	

<b>Verfügbarkeit</b>	maximal ein Systemausfall in 10.000 h
<b>Kommentare/Fragen</b>	---

Tabelle 29: Anwendungsfallbeschreibung - Systemprozess: Positionieren im Automatikmodus

<b>Name</b>	manuelle Funktionsausführung							
<b>Akteur</b>	Anlagennutzer							
<b>Auslösendes Ereignis</b>	Der Vierwegetaster oder die Greifertaster an der Schaltschrankfront werden betätigt							
<b>Kurzbeschreibung</b>	Die dem betätigten Taster zugehörige Achse bewegt sich entsprechend der angezeigten Richtung auf diesem Taster. Wird einer der dem Greifer zugehörigen Taster gedrückt, schwenkt der Greifarm um bzw. der Greifer öffnet/schließt							
<b>Vorbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage wurde eingeschaltet</li> <li>• der Handmodus wurde ausgewählt</li> <li>• mindestens einer der vier Richtungstaster auf dem vierfach Drucktaster wird gedrückt oder einer der beiden dem Greifer zugehörigen Taster</li> </ul>							
<b>Schritte</b>	<table border="1"> <tr> <th>Intention der Systemumgebung</th> <th>Reaktion des Systems</th> </tr> <tr> <td>System soll in horizontaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen</td> <td>Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der x-Achse führt</td> </tr> <tr> <td>System soll in vertikaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen</td> <td>Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der z-Achse führt</td> </tr> </table>	Intention der Systemumgebung	Reaktion des Systems	System soll in horizontaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der x-Achse führt	System soll in vertikaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der z-Achse führt	
Intention der Systemumgebung	Reaktion des Systems							
System soll in horizontaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der x-Achse führt							
System soll in vertikaler Richtung manuelle Positionieraufgaben durchführen	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Joggen der z-Achse führt							

	Greifarm soll um 180° geschwenkt werden	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Schwenken des Greifarms führt
	TTransportobjekt soll gegriffen bzw. losgelassen werden	Das Positioniersystem erwartet Tastereingabe, die zum Öffnen bzw. Schließen des Greifers führt
	Not-Halt wird aufgrund einer Gefahrensituation ausgelöst	Die Laboranlage bremst bis zum Stillstand ab und erwartet eine Bestätigung, dass die Gefahren- bzw. Fehlersituation beseitigt ist
	Bewegungsgeschwindigkeit des Systems wird angepasst	Die Achsen des Systems bewegen sich entsprechend der analogen Nutzereingabe schneller bzw. langsamer
	Laboranlage soll durch Anlagenutzer gestoppt werden	Die Anlage ist gestoppt und der Handmodus wird abgewählt
<b>Ausnahmefälle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defektbedingte Abschaltung der Anlage</li> </ul>	
<b>Nachbedingungen</b>	Anlage ist abgeschaltet	
<b>Zeitverhalten</b>	Keine Ansprüche an das Zeitverhalten (Handmodus wird nur zu Testzwecken genutzt)	
<b>Verfügbarkeit</b>	Maximal ein Systemausfall in 10.000 h	
<b>Kommentare/Fragen</b>	---	

Tabelle 30: Anwendungsfallbeschreibung - Systemprozess: manuelle Funktionsausführung im Handmodus

<b>Name</b>	Programmänderungen Vornehmen	
<b>Akteur</b>	Laborcomputer	
<b>Auslösendes Ereignis</b>	System wird mit neuem Programmcode bespielt	
<b>Kurzbeschreibung</b>	Über eine Ethernetschnittstelle ist das Positioniersystem mit dem Labornetzwerk verbunden. Von Geräten aus demselben Netzwerk kann auf das System zugegriffen werden bzw. Änderungen an dessen Programmcode vorgenommen werden.	
<b>Vorbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerungskomponenten des Systems sind eingeschalten und im Labornetzwerk findbar</li> <li>Computer des Programmentwicklers befindet sich im selben Netzwerk wie das Positioniersystem</li> </ul>	
<b>Schritte</b>	<b>Intention der Systemumgebung</b>	<b>Reaktion des Systems</b>
	Es soll neuer Programmcode durch den Prozessentwickler auf die Steuerung übertragen werden	In Maschinencode übersetzter Programmcode wird über die Ethernetschnittstelle zur Steuerung übertragen
	Neues Programm soll auf der Steuerung ausgeführt werden	System führt einen Kaltstart
<b>Ausnahmefälle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Labornetzwerk ist ausgefallen oder verhindert die Kommunikation</li> <li>Defektbedingte Abschaltung der Anlage</li> </ul>	
<b>Nachbedingungen</b>	Anlage ist erneut betriebsbereit	
<b>Zeitverhalten</b>	---	
<b>Verfügbarkeit</b>	Das System sollte jederzeit von jedem Computer im selben Netzwerk erreichbar sein	

<b>Kommentare/Fragen</b>	---
--------------------------	-----

Tabelle 31: Anwendungsfallbeschreibung - Systemprozess: Programmänderungen vornehmen

<b>Name</b>	Prozessdaten bereitstellen	
<b>Akteur</b>	OPC UA Server	
<b>Auslösendes Ereignis</b>	System ist aktiv	
<b>Kurzbeschreibung</b>	Die Steuerung des Positioniersystems übernimmt zusätzlich die Aufgabe als OPC UA Server, über welchen per OPC Schnittstelle (ethernetbasiert) Daten aus dem Systemprozess bereitgestellt werden.	
<b>Vorbedingungen</b>	Steuerungskomponenten des Systems sind eingeschalten	
<b>Schritte</b>	<b>Intention der Systemumgebung</b>	<b>Reaktion des Systems</b>
	Es sollen Prozessdaten über die OPC-Schnittstelle ausgelesen werden	Die Steuerung stellt Daten via OPC UA Schnittstelle bereit (ein OPC-Client kann diese entgegennehmen)
	Prozessdaten sollen extern weiterverarbeitet werden	System kommuniziert mit z. B. dem AR Server oder einer Verwaltungsschale, welche als OPC Client Daten entgegennehmen
<b>Ausnahmefälle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Labornetzwerk ist ausgefallen oder verhindert die Kommunikation</li> <li>• Defektbedingte Abschaltung der Anlage</li> </ul>	

<b>Nachbedingungen</b>	System ist weiterhin aktiv
<b>Zeitverhalten</b>	Prozessdaten sollen in Echtzeit abgefragt werden können
<b>Verfügbarkeit</b>	Prozessdaten sollten zu jeder Zeit abgefragt werden können
<b>Kommentare/Fragen</b>	---

Tabelle 32: Anwendungsfallbeschreibung - Systemprozess: Prozessdaten bereitstellen

### 3.3 Verhaltensspezifikation

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der Modellierung des Systemverhaltens. Anschließend an die Systemanalyse, ist die nun folgende Modellierung Teil der detaillierten Systemanalyse. Die Verhaltensspezifikation beinhaltet sämtliche Informationen zum Verhalten des gesamten Systems und dessen Systemprozesse. Als Basis dienen die in Unterabschnitt 3.2.2 dargestellten Anwendungsfallbeschreibungen. Ziel dieses Abschnittes ist es ein bzw. mehrere Zustandsdiagramme aus den Informationen der Anwendungsfallbeschreibungen zu entwickeln. Auf Grundlage der Tabellen aus dem vorhergegangenen Kapitel entsteht eine Verhaltensbeschreibung der zugrunde liegenden Systemprozesse. Zunächst erfolgt eine methodische Erläuterung zur Konstruktion eines solchen Zustandsdiagramms. Die Konstruktion des Zustandsdiagrammes kann in folgende sieben Schritte untergliedert werden [Gol11, Seite 438].

- Zunächst müssen sämtliche Ereignisse bzw. wesentliche Schritte des Prozesses auf Unterbrechbarkeit geprüft werden. Unterbrechbare Elemente werden anschließend als **Aktivitäten** des Zustandsdiagramms modelliert. Ununterbrechbare Elemente sind als **Aktionen** des Zustandsdiagramms zu definieren.
- **Aktivitäten** werden in den Zuständen des Diagrammes abgebildet. Dazu wird eine solche Aktivität hinter dem Schlüsselwort „do“ aufgeschrieben. Es ist hilfreich einen prägnanten Namen zu wählen. (Übergänge, die in den Zustand führen, sind aus dem Ereignis des jeweiligen Anwendungsfalldiagramms zu entnehmen.)
- **Aktionen** werden als Übergänge eingezeichnet und mit einem Ereignis beschriftet. (Am Ende eines Überganges wird die entsprechende Aktion eingezeichnet.)
- Verbleibende freie Enden bzw. Anfänge werden auf potenzielle Start- oder Endzustände untersucht. Bei der Ermittlung eines solchen Zustands muss dieser entsprechend der Symbolik des Zustandsdiagramms mit dargestellt werden.
- Falls dennoch frei Übergangsenden verbleiben, müssen Zustände gefunden werden, auf welche diese verweisen. Zunächst sollten existierende Zustände geprüft werden. (Ein Ereignis kann auch an mehreren Zuständen hängen.) Wird kein Zustand gefunden, muss ein neuer Zustand erfunden werden.
- Es besteht die Möglichkeit Regionen oder auch zusammengesetzte Zustände zu definieren, um die Lesbarkeit zu erhöhen.
- Den letzten Schritt der Konstruktion stellt die Anreicherung der Übergänge mit NFAs dar. Dazu gehört unter anderem auch das Zeitverhalten aus den Anwendungsfallbeschreibungen.

Die nun folgenden Grafiken zeigen die Zustandsdiagramme zu den ermittelten Systemprozessen. Die Modellierung dieser folgt der zuvor beschriebenen Methodik. Aufgrund der starken Abweichungen des Systemverhaltens im Automatikmodus und im Handmodus, werden beide Betriebsmodi in getrennten Diagrammen dargestellt, auch wenn der zugrunde liegende Prozess gleich ist. Das Zeichen „/“ vor einem Text zeigt die Ausführung einer Aktion durch die Anlage an. Die Notation „do /“ beschreibt eine Aktion des Positioniersystems in einem Zustand.

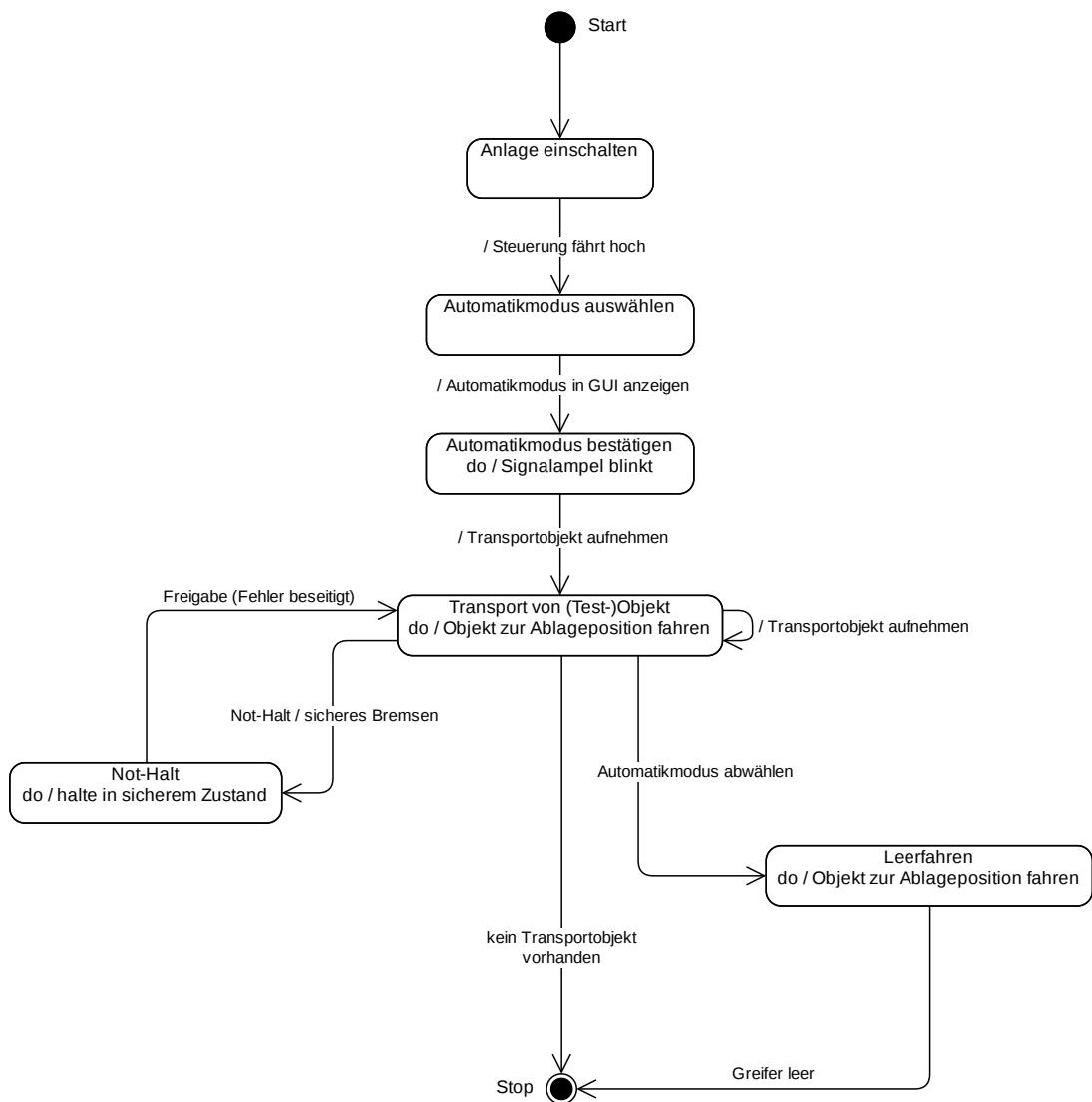


Abbildung 11: Zustandsdiagramm - Systemprozess: Objekttransport im Automatikmodus

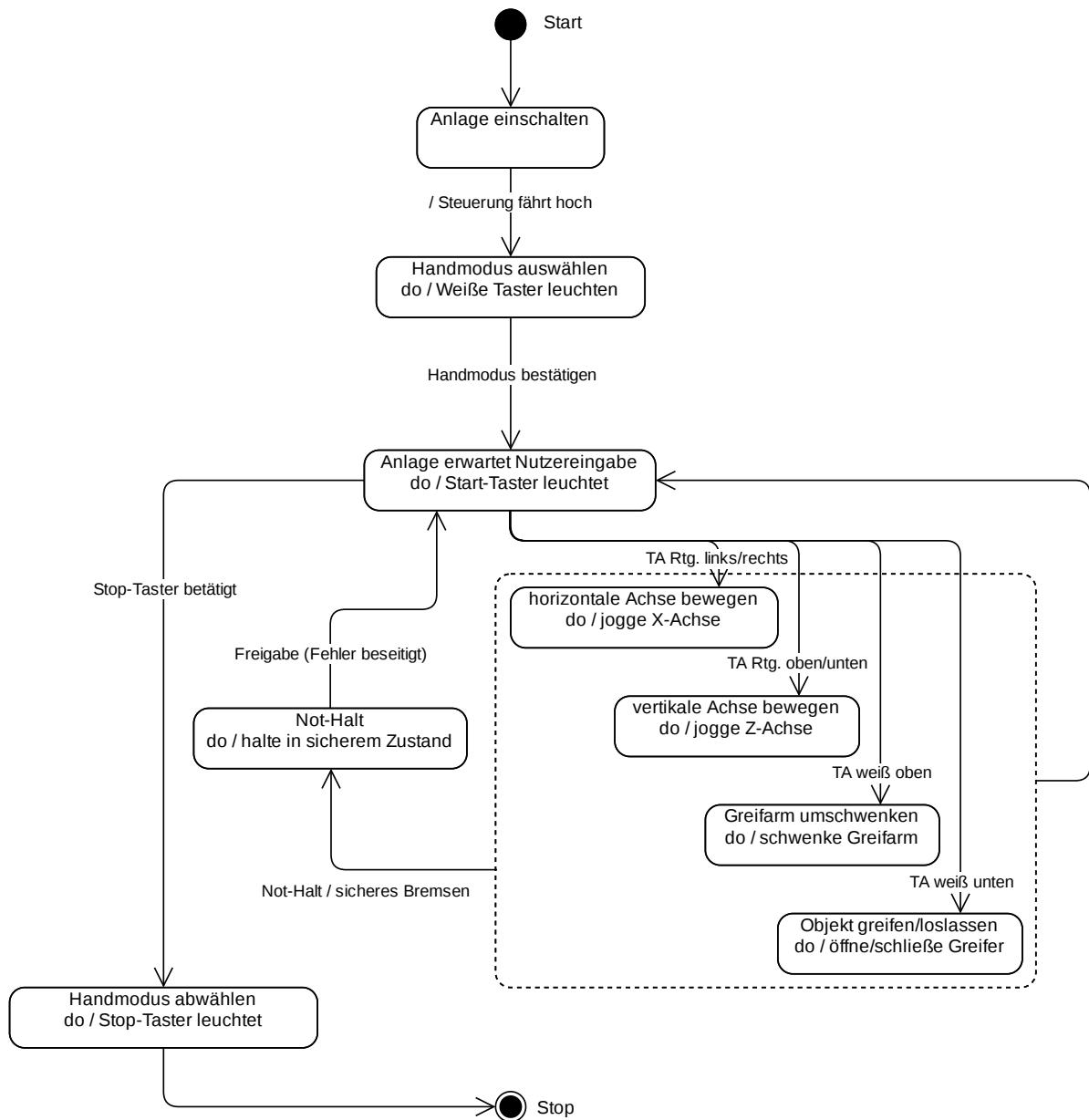


Abbildung 12: Zustandsdiagramm - Verhalten im Handmodus

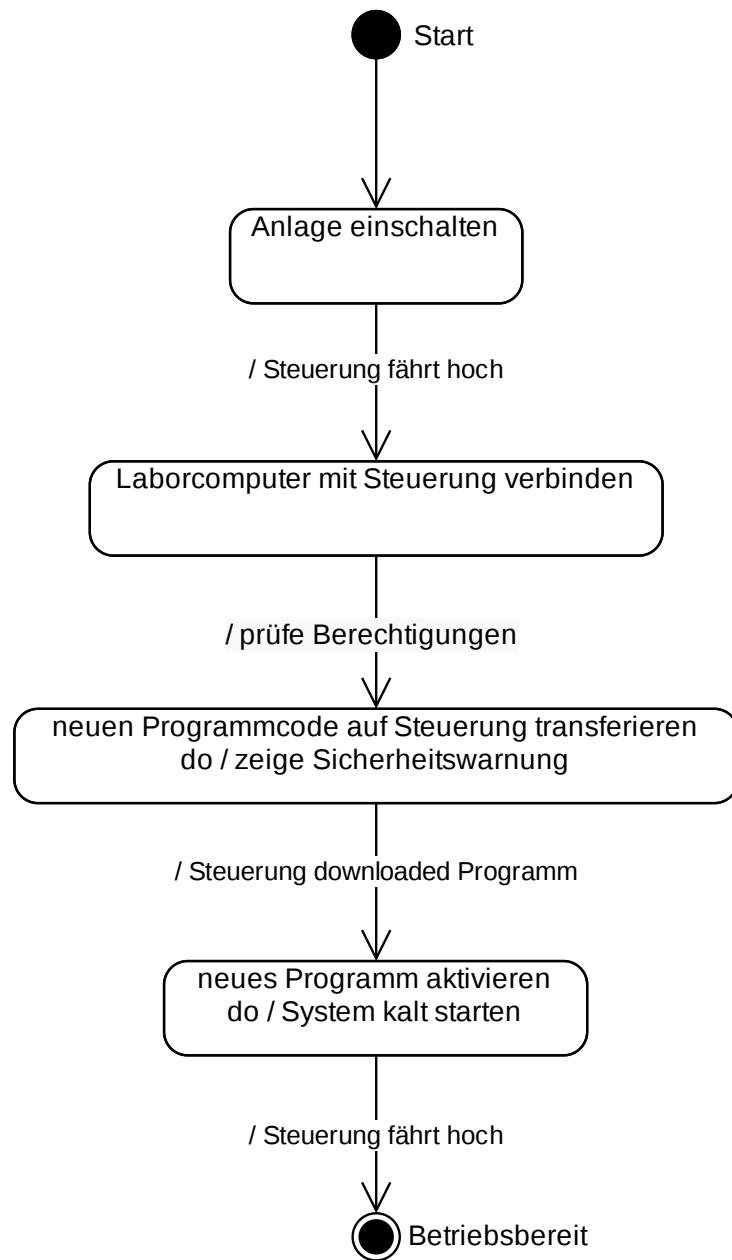


Abbildung 13: Zustandsdiagramm - Programmänderungen vornehmen

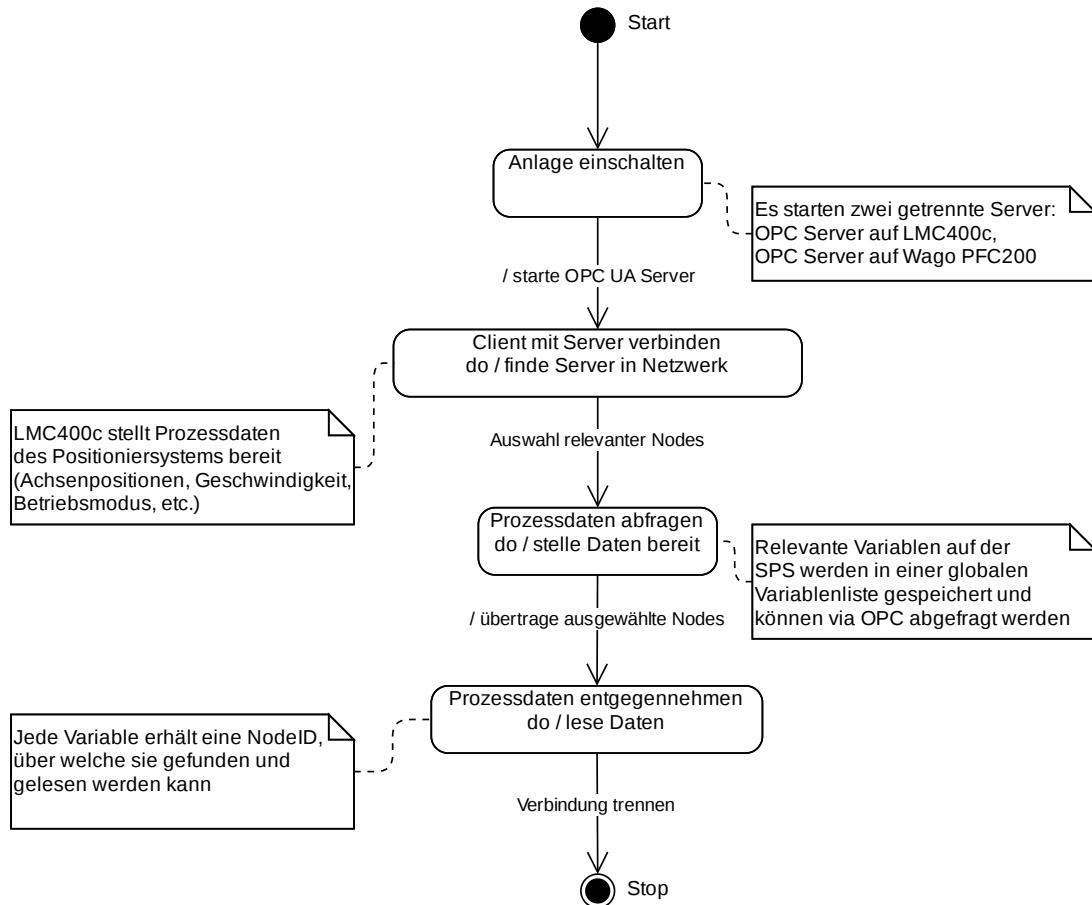


Abbildung 14: Zustandsdiagramm - Prozessdaten bereitstellen

Abbildung 11 zeigt einen beispielhaften Programmablauf im Automatikmodus. Wie in der bisherigen Modellierung wird ein Anwendungsfall für den Transport von Objekten zwischen Aufnahme-/Ablageschalen betrachtet. Grundsätzlich geht es beim Automatikmodus um das absolute Positionieren (über Punkt- oder Trajektorievorgaben), ohne dass Nutzereingaben erforderlich sind. Der Handmodus ist im Gegensatz dazu als Testmodus konzipiert, um Anlagefunktionen zu validieren. Voraussetzung dafür sind sowohl die Fähigkeit des Positioniersystems von jedem Laborrechner programmiert zu werden, als auch eine OPC-Kommunikation im Labornetzwerk zu ermöglichen.

## 3.4 Partitionierung

Die Partitionierung ist der letzte Schritt der detaillierten Systemanalyse und stellt somit auch das Ende der Analysephase dar. Es schließt sich dennoch ein weiteres Unterkapitel nachfolgend an, welches die Testspezifikationen, die im Laufe der Analysephase entstanden sind, zusammenfassend dokumentiert.

Ziel der Partitionierung ist die Unterteilung des Systems in logische Sinnesabschnitte, um die Komplexität der Darstellung und Entwicklung zu verringern. Logische Sinnesabschnitte meint an dieser Stelle jedoch nicht die logische Kontextabgrenzung aus Unterabschnitt 3.1, sondern ganz im Gegenteil, die physikalische Kontextabgrenzung, wie sie in Abbildung 9 als Verteilungsdiagramm dargestellt ist. Das Verteilungsdiagramm dient als Ausgangspunkt für die Partitionierung. Nachfolgend wird die Partitionierung in drei Sinnesabschnitte unterteilt, welche in dieser Arbeit ihren eigenen Unterabschnitt erhalten [Tab06, Seite 274].

### 3.4.1 Erster Partitionierungsschritt

In der bisherigen Betrachtung wurde das zu entwickelnde System als Blackbox dargestellt. Zu erkennen sind bereits die Nachbarsysteme und die Kommunikationspfade zu diesen. In Abbildung 9 sind schon einige Stereotypen an den Kommunikationspfaden zu erkennen. Dabei handelt es sich um konkrete Umsetzungen bzw. Realisierungen der Kommunikation. Aus den Realisierungen der Kommunikationspfade werden in der Partitionierung nun Schnittstellenknoten des Systems definiert. Diese sind im Folgenden in Abbildung 15 zu erkennen. Im bisherigen Stand der Entwicklung sind nur die Stereotypen der Kommunikationspfade spezifiziert und beschreiben die Schnittstelle zu diesem.

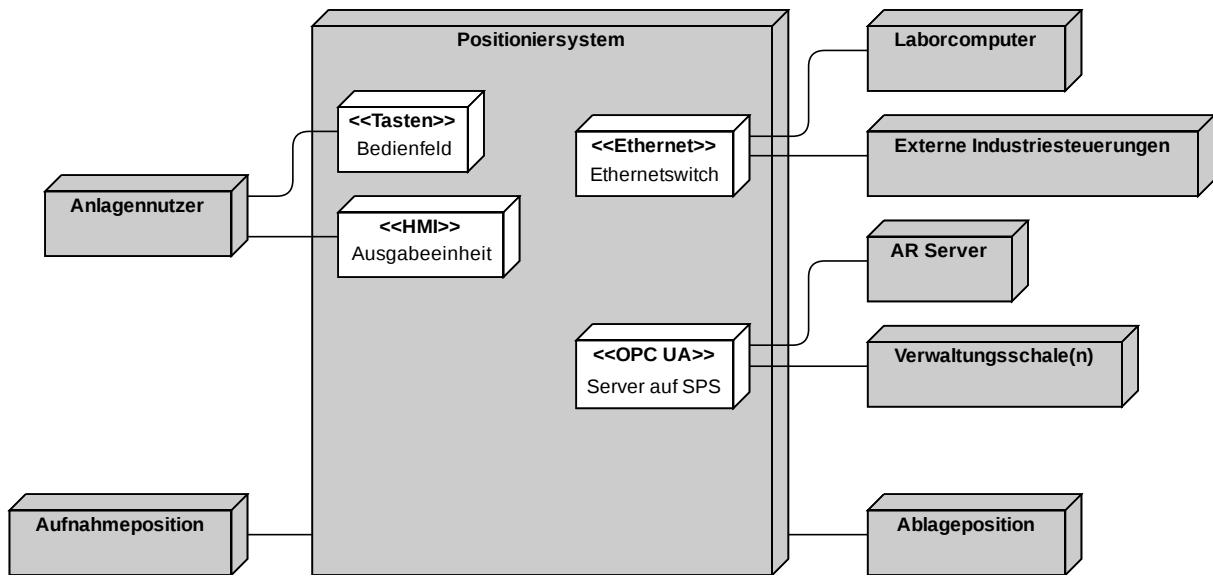


Abbildung 15: Erster Partitionierungsschritt

Abbildung 15 ergänzt zu den bereits bekannten Stereotypen, welche nun in ihren eigenen Knoten aufgeführt werden, die konkreten Knoten als Komponenten des Systems. Wichtig ist hierbei die jeweiligen Anforderungen aus Unterabschnitt 2.1 zu den Knoten zu beachten.

Die Interaktion des Anlagennutzers mit dem mehrachsigen Positioniersystem erfolgt grundätzlich über Taster an der Schaltschrankfront der Anlage. Die Menge aller Taster ist im obigen Diagramm zusammengefasst unter dem Begriff Bedienfeld. Auf diesem befinden sich zusätzlich zu den Tastern auch Statusleuchten (Anzeige des ausgewählten Betriebsmodus). Weiterhin ist auch eine Signalampel am äußeren Profil der Laboranlage montiert, wie aus der Beschreibung des Aufbaus der Anlage im Unterunterabschnitt 2.3.1 hervorgeht. Sowohl die Leuchten als auch die Ampel fallen nicht unter den Stereotyp Tasten, sondern werden dem allgemeineren Begriff Human Machine Interface (HMI) zugeordnet. Es handelt sich bei ihnen um anzeigende Elemente. Dementsprechend ist auch der Knotenbegriff Ausgabeeinheit gewählt.

Das Wort *Interface* suggeriert jedoch einen Datenaustausch in zwei Richtungen. Das HMI im Sinne einer Eingabeeinheit ist in der Industrie meist ein touchfähiges Display, das sowohl Daten anzeigen kann, als auch Befehle entgegennehmen. Im Fall des Positioniersystems ist solch ein HMI in Form eines Tablets oder Smartphones implementiert, welches vom Anlagennutzer entweder selbst mitgebracht wird oder an der Anlage in einer entsprechenden Halterung befestigt ist.

Der Knoten Ethernetswitch beschreibt die Schnittstelle zu Nachbarsystemen über das laborinterne Netzwerk. Dieser wird in der Laboranlage verbaut, um externe Computer und SPSen mit der Steuerung der Positioniereinheit zu verbinden. Ziel ist es eine Schnittstelle

zur Verfügung zu stellen, über die von den Laborcomputern das Automatisierungsprogramm auf die Steuerung des Systems gespielt werden kann.

Der letzte zu erkennende Knoten, betitelt mit Server auf der SPS, meint den OPC UA Server, über welchen Prozessdaten von der Steuerung des Systems (LMC400c) bereitgestellt werden. Diese können dann von einem OPC Client, wie z. B. dem im Diagramm zu erkennenden AR Server entgegengenommen werden, um von diesem anschließend verarbeitet bzw. genutzt zu werden.

### 3.4.2 Zweiter Partitionierungsschritt

Im zweiten Schritt wird die genaue Realisierung der Knoten und der Aufbau des Systems geklärt. Dazu werden die Systemprozessbeschreibungen aus Unterabschnitt 3.2 benötigt. Ziel ist es das System unter funktionalen Gesichtspunkten in Komponenten bzw. Einheiten zu zerlegen. Dabei wird noch nicht festgelegt, wie die Realisierung der Einheiten mit konkreter Hardware und Software umgesetzt wird. Es findet lediglich eine Aufteilung in funktionale Komponenten statt, welche wiederum in Form von Knoten symbolisiert werden.

Abbildung 16 zeigt das entstandene Diagramm nach Anwendung der Systemprozessbeschreibungen auf die im vorherigen Unterabschnitt entwickelte Grafik.

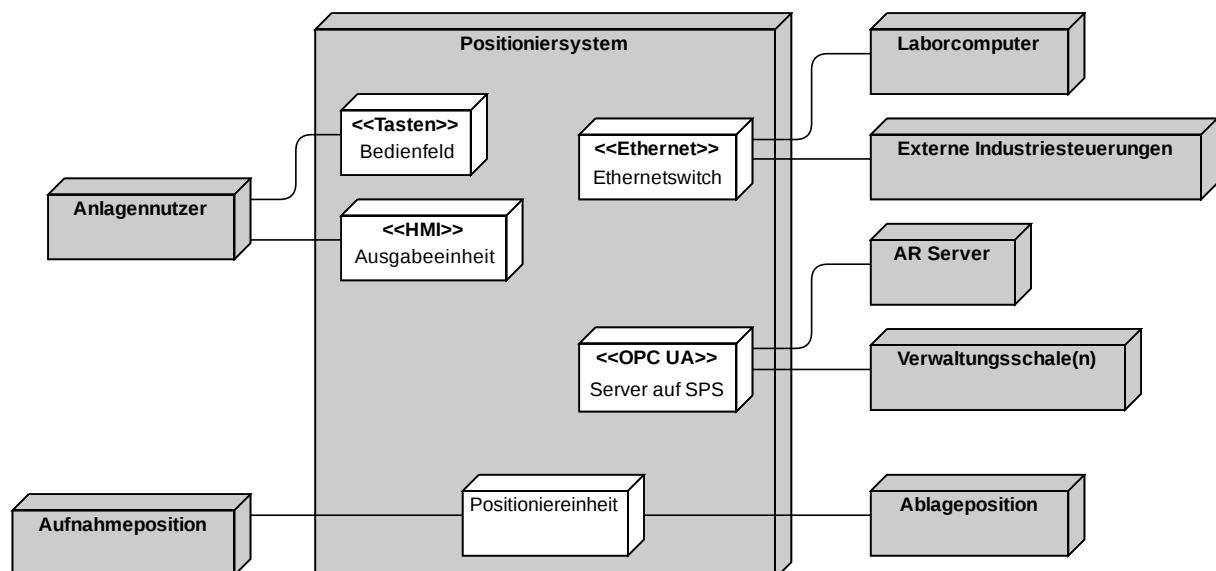


Abbildung 16: Zweiter Partitionierungsschritt

Für diesen Partitionierungsschritt sind die *essenziellen Schritte* und die *Kurzbeschreibung* aus unter anderem Tabelle 29 relevant. Für die Erstellung der kompletten Grafik müssen alle Anwendungsfallbeschreibungen berücksichtigt werden. Es fällt auf, dass im Vergleich zu grundlegenden Anwendungsfallbeschreibung im Anwendungsfalldiagramm

(Abbildung 10), die Betriebsmodi nicht mit aufgenommen wurden. Grund dafür ist, dass bei der Partitionierung nur die normale Arbeitsweise im Vordergrund steht. Erst bei der Realisierung der in diesem Unterabschnitt gefundenen funktionalen Knoten werden diese wieder betrachtet, da sie Eigenschaften dieser Knoten beschreiben.

Da zwischen der Aufnahme eines Transportobjektes von der Aufnahmeposition und der Ablage selbigen Objektes auf der Ablageposition nur der Aufnahmeprozess über einen Greifer und der Transportprozess des Positioniersystems selbst stehen, ist im Diagramm nur ein neuer Knoten wiederzufinden. Dieser ist mit dem Begriff *Positioniereinheit* betitelt. Die Positioniereinheit meint an dieser Stelle nicht das gesamte System, sondern ausschließlich die beweglichen Komponenten des Systems (die beiden Achsen mit dem darauf zu montierendem Greifarm inklusive dem Greifer selbst).

### 3.4.3 Dritter Partitionierungsschritt

Im dritten Schritt der Partitionierung findet eine Aufteilung der Komponenten/Einheiten in Software-, Hardware und Anlagenteil statt. Dabei ist die Aufteilung der Einheit unabhängig von der aktuell betrachteten Einheit. Das heißt, soweit es möglich ist, wird die Unterteilung für jede Komponente bzw. Einheit vorgenommen. Existiert eine der drei Unterteilungen nicht für die betrachtete Einheit, entfällt diese.

Die Abbildung 17 zeigt die prinzipielle Aufteilung der einzelnen Einheiten des Systems.

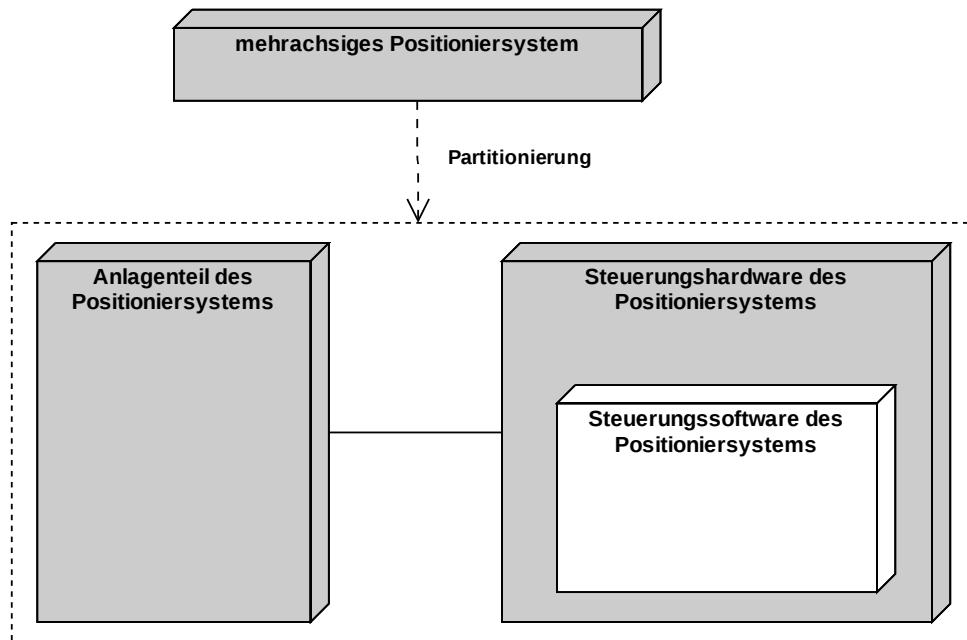


Abbildung 17: Dritter Partitionierungsschritt - Aufteilungsprinzip

Es ist zu erkennen, dass die Grafik aus drei Knoten besteht, die genau die drei Teile

Anlage, Hardware und Software darstellen. Gemeinsam decken sie die Funktionalität einer Einheit ab. Ausgehend von dieser Darstellung werden nachfolgend die Schnittstellen und prinzipiellen Eigenschaften dieser Knoten entwickelt und in einer Knotenbeschreibung dokumentiert (siehe Tabelle 33).

In diesem Schritt treten die nicht funktionalen Anforderungen an das System wieder in den Vordergrund. Aufgabe ist es nun die Anforderungen nach Informationen an das Design des Systems zu durchleuchten. Ziel ist es zu jeder der drei erwähnten Unterteilungen spezifische Umsetzungen zu finden bzw. zu entwickeln, falls aus den NFAs keine Designentscheidungen entnehmbar sind.

Konkret das mehrachsige Positioniersystem betreffend ist aus den Anforderungen zu erkennen, dass für die Steuerungshardware der Positioniereinheit ein Logic Motion Controller (LMC) von Schneider Electric vorgesehen ist, und für die Energiemessung eine Wago SPS der PFC200-Serie. Zur Steuerungshardware zugehörig sind weiterhin sowohl das Netzteil und der Servoregler. Beide werden in den Anforderungen bereits erwähnt. Es steht fest, um welche Modelle es sich handelt (LXM62 Serie).

Auch zu den Aktuatoren und Sensoren der Steuerungshardware werden Aussagen in der Anforderungsanalyse getroffen. Für die Endlagendetektierung werden induktive Näherungsschalter verwendet. Der Lichtvorhang zum Schutz für Leib und Leben wird auch als Sensor kategorisiert und ist bereits ausgewählt (XUS-Serie von Schneider Electric). Bei den Aktuatoren des Systems handelt es sich um Multiturn Servos aus der Produktserie SH3 (ebenfalls von Schneider Electric).

Der generelle Aufbau des Systems bestehend aus Gehäuse und Schaltschrank wird nicht direkt in den Anforderungen vorgegeben. Somit müssen erst Anforderungen für den Anlagenteil des Systems getroffen werden. Für die Entscheidung zur Wahl der konkreten Profile, aus denen das Gehäuse aufgebaut wird, sowie die beweglichen Schlitten auf den beiden Achsen und der Schaltschrank, sollten Fachleute herangezogen werden. Im Falle der Laboranlage wurden Designentscheidungen aus den nicht funktionalen Anforderungen des Laboringenieurs Dipl. Ing. Dirk Schöttke (wiederzufinden in der Stakeholdertabelle) getroffen. Es handelt sich dabei hauptsächlich aus Erfahrungen mit bereits umgesetzten Systemen. Resultat ist die Wahl von Profilen und beweglichen Schlitten der Firma MiniTec. Auch die Entscheidung, welcher Schaltschrank ausgewählt wird, wird anhand der definierten NFAs von Herr Schöttke getroffen. Zu beachten ist, dass der Schaltschrank genügend Platz für alle benötigten Komponenten bereitstellt.

Noch zu Untersuchen sind die Anforderungen nach Designinformationen zur Steuerungssoftware des Positioniersystems. Aus den nicht funktionalen Anforderungen an die Steuerungshardware erübriggt sich die Wahl der Steuerungssoftware des Positioniersystems. Durch die Nutzung des Logic Motion Controllers von Schneider Electric ist die Programmierung dieses eingeschränkt auf die Entwicklungsumgebung, die ebenfalls durch Schneider Electric bereitgestellt wird. Die später auf der Laboranlage ausgeführte Automatisierungssoftware muss in der SoMachine bzw. MachineExpert Entwicklungsumgebung generiert werden, um

diese auf der Steuerung des Systems nutzen zu können. Es handelt sich folglich um ein abgeschlossenes Ökosystem, welches vom Hersteller etabliert wurde. Resultat ist somit auch eine vorgeschriebene Vorgehensweise zur Umsetzung von Motion Software für das Positioniersystem. Die Steuerungssoftware der PFC200 SPS soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben. Die Konfiguration der Steuerung bedingt die Nutzung der Software e!Cockpit von Wago zur Programmierung der Steuerungssoftware für die Energiemessungskomponente des Systems.

Nachdem alle Partitionierungsentscheidungen bezüglich der Anlage getroffen wurden, werden diese in Form einer Tabelle dokumentiert. Dabei handelt es sich um die Beschreibung der Knoten aus dem Verteilungsdiagramm in Abbildung 17.

Die erste Tabelle (Tabelle 33) behandelt den Anlagenteil der Positioniereinheit. Die Felder der Tabelle enthalten alle wichtigen Informationen über den Knoten des Anlagenteils der Positioniereinheit. Zu dokumentieren sind die Informationen **Name**, **Typ**, **Beschreibung**, **FAs** und **NFAs**. Im Eintrag **Typ** wird die Knotenart definiert, also ob es sich um Software, Hardware oder die Anlage handelt. Die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen, die sich auf den Knoten beziehen werden ebenfalls in der Tabelle aufgenommen.

<b>Name</b>	Anlagenteil des Positioniersystems
<b>Typ</b>	Anlage
<b>Beschreibung</b>	Stellt die Infrastruktur bereit, an die die Aktuatoren und Sensoren der Steuerungshardware angeschlossen sind.
<b>Funktionale Anforderungen</b>	Die Anlage muss sich entlang der horizontalen und vertikalen Achse bewegen können und wieder abbremsen. Weiterhin muss sie über einen Greifarm/Greifer Kombination Transportgüter aufnehmen und wieder ablegen können.
<b>Nicht-funktionale Anforderungen</b>	Die Anlage muss in den Laborraum G422 integriert werden. Zur Sicherheit sollen Plexiglasabdeckungen an ungeschützten Bereichen montiert werden. Kabel sollen in E-Ketten an den beweglichen Achsen mitgeführt werden.

Tabelle 33: Knotenpunktbeschreibung der Positioniereinheit - Anlagenteil

Analog zur ersten Tabelle wird anschließend die Knotenbeschreibung zur Hardware und Software der Positioniereinheit vorgenommen.

<b>Name</b>	Steuerungshardware des Positioniersystems
<b>Typ</b>	Hardware
<b>Beschreibung</b>	Die Hardware besteht aus den Controllern (LMC und PFC200), Aktuatoren und Sensoren. Diese sind zur Erfüllung der Aufgaben der Positioniereinheit nötig.
<b>Funktionale Anforderungen</b>	Die Servomotoren der Achsen sollen über den LMC gesteuert Positionieraufgaben ausführen. Dafür wird eine Powersupply/Servoregler Kombination benötigt, um die Motoren zu betreiben. Über Endlagesensoren soll verhindert werden, dass Bewegungen über die Enden der beiden Achsen hinaus durchgeführt werden können. Mithilfe eines zweiten Controllers soll die Energiezufuhr zum gesamten System gemessen werden. Nutzereingaben sollen über ein Bedienfeld an der Schaltschrankfront und/oder über ein Display erfolgen. Zur Signalisierung von Gefahrensituationen ist eine Signalampel zu verbauen.
<b>Nicht-funktionale Anforderungen</b>	Die Steuerungshardware der Positioniereinheit stammt aus der PacDrive 3 Reihe von Schneider Electric. Erweitert wird diese um zwei Motoren und einen Lichtvorhang, die ebenfalls von Schneider Electric gestellt werden. Um weitere (sichere) digitale und analoge Ausgänge bereitzustellen, sollen Module aus der TM5-Serie von Schneider Electric im Schaltschrank verbaut werden. Die SPS für die Energiemessung ist ein PFC200 Controller von Wago.

Tabelle 34: Knotenpunktbeschreibung der Positioniereinheit - Hardware

Durch die Vorgabe der Steuerungssoftware stehen die Schnittstellen zwischen den Steuerkomponenten und den Sensoren sowie Aktuatoren bereits fest. Der LMC400c kommuniziert mit den TM5 Erweiterungsmodulen, dem LXM 62P (Powersupply) und LXM 62D (Servoregler) via SERCOS III (in Ringkonfiguration). Zu den Endlagesensoren führen dreiaadrige Sensorleitungen. Der Lichtvorhang (bestehend aus Emitter und Receiver) ist ebenfalls über 8 und 11 adrige Sensorleitungen am Controller (über Klemmen im Schaltschrank) angeschlossen. Zu den beiden Motoren führt sowohl ein Stromkabel (3-phasic) und ein Encoderkabel (für die Bremsfunktion und das Auslesen von z. B. Temperaturwer-

ten). Die beiden Controller sind untereinander und auch mit allen weiteren Computern im Labornetzwerk per Ethernet über einen im Schaltschrank verbauten Switch verbunden.

<b>Name</b>	Steuerungssoftware der Positioniereinheit
<b>Typ</b>	Software
<b>Beschreibung</b>	Die Steuerungssoftware wertet Sensordaten aus, berechnet Trajektorien und Geschwindigkeiten für die Achsenpositionierung und stellt Prozessdaten aus globalen Variablenlisten bereit.
<b>Funktionale Anforderungen</b>	Berechnet Fahrtwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus Nutzereingaben bzw. Vorgaben. Weiterhin wird für das sicherheitsgerechte Bremsen bei Erreichen von Endlagen oder der Not-Halt-Auslösung gesorgt.
<b>Nicht-funktionale Anforderungen</b>	Die Automatisierungssoftware muss in der LogicBuilder Entwicklungsumgebung erstellt werden. Diese Umgebung wird bereits mit einigen Entwicklungsvorgehensweisen bzw. Routinen ausgeliefert.

Tabelle 35: Knotenpunktbeschreibung der Positioniereinheit - Software

Da das Positioniersystem nur aus einer Einheit, der Positioniereinheit besteht, kann der dritte Partitionierungsschritt mit drei Tabellen (Anlage, Software, Hardware) modelliert werden. Die weniger hohe Komplexität (bedingt durch das Nichtvorhandensein von mehreren Untereinheiten) führt zu der Partitionierung in die grundlegenden Einheiten *Anlagenteil*, *Steuerungshardware* und *Steuerungssoftware* der Positioniereinheit.

Auf Basis der Partitionierung kann in der Anlagenprojektierung nun die Entwicklung der Systemsoftware durchgeführt werden, nachdem die detaillierte Systemanalyse mit diesem Unterabschnitt beendet ist. Wie bereits eingangs erwähnt, folgt zunächst die Dokumentation der Testspezifikation, welche nach der Projektierung für die Inbetriebnahme der in der Projektierung entwickelten Software benötigt wird.

### 3.5 Testspezifikation

Dieses Unterkapitel behandelt die Entstehung und den Aufbau der Testspezifikation. Die Testspezifikation ist an sich kein eigener Schritt in der Analysephase, sondern entwickelt sich in über die verschiedenen Schritte der Analyse hinweg.

Testkriterien werden bereits in den Anforderungen aufgestellt und dienen als Abnahmekriterium für diese. Neben den funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen, entsteht die Testspezifikation aus sowohl der Anwendungsfallspezifikation, der Verhaltensspezifikation und den Partitionierungsinformationen.

Die Dokumentation der Testfälle erfolgt in Tabellenform. Die Tabelle unterteilt sich in die Einträge **ID**, **Name**, **Beschreibung**, **Vorgehensweise**, **Erwartungswert** und **Spezialfälle**. Im Feld *ID* wird wie auch schon bei der Anforderungsanalyse eine Bezeichnung vergeben, über welche der Testfall (TF) ohne Verwechslung identifiziert und differenziert werden kann. In den Einträgen *Name* und *Beschreibung* wird der Testfall benannt und kurz beschrieben. Im Feld *Vorgehensweise* wird die schrittweise Prüfung des jeweiligen Testfalls beschrieben. Der *Erwartungswert* ist der gewünscht bzw. geforderte Wert nach Durchführung des Tests. Zuletzt werden noch *Spezialfälle* mit in die Tabelle aufgenommen. Es handelt sich um besonders kritische Testfälle eine Anforderung betreffend. Das könnten z. B. Testfälle an der Toleranzgrenze sein.

Die Testspezifikation schließt an die Testkriterien aus den bereits erwähnten Unterkapiteln der Analysephase an und hat zum Ziel diese zu konkretisieren und gesammelt darzustellen. Nachfolgend finden sich die Testkriterien des mehrachsigen Positioniersystems.

Die Durchführung der Testfälle wird im Unterabschnitt 4.2 im Implementationsteil der Arbeit protokolliert.

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_01
<b>Name</b>	Prüfung der Vollständigkeit
<b>Beschreibung</b>	Es soll sichergestellt werden, dass alle in den Anforderungen ermittelten Systemkomponenten verbaut wurden.
<b>Vorgehensweise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtprüfung Endlagesensoren vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Not-Halt-Taster vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Lichtvorhang vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Signalampel vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Schaltschrank vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Bedienpanel an Schaltschrankfront vollständig vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Schneider Electric LMC400c, LXM 62P und LXM 62D vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Wago PFC200 Steuerung vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung sichere und nicht-sichere Modicon TM5 E/A-Module vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Schneider Electric SLC vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Plexiglasscheiben vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung E-Ketten vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung zwei Achsen vorhanden (eine Vertikale, eine Horizontale)</li> <li>• Sichtprüfung zwei Servomotoren angeschlossen</li> <li>• Sichtprüfung Greifkomponente vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Netzschütz vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Netzdrossel vorhanden</li> <li>• Sichtprüfung Leitungsschutzschalter für 24 V- und 400 V-Ebene vorhanden</li> </ul>
<b>Erwartungswert</b>	Alle in der Auflistung aufgezählten Komponenten wurden eingebaut/verbaut.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 36: Testfall - Prüfung der Vollständigkeit von Systemkomponenten

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_02
<b>Name</b>	Prüfung der Verdrahtung
<b>Beschreibung</b>	Es soll sichergestellt werden, dass alle Komponenten (richtig) verdrahtet sind.
<b>Vorgehensweise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LMC fährt nach Einschalten des Systems hoch (Display zeigt IP-Adresse)</li> <li>• Wago PFC200 fährt nach Einschalten des Systems hoch (Front-LEDs leuchten grün)</li> <li>• Status-LED des Netzteils (LXM 62P) aktiv</li> <li>• Power-LED des Netzteils (LXM 62P) aktiv</li> <li>• Status-LED des Servoreglers (LXM 62D) aktiv</li> <li>• Power-LED des SLC leuchtet grün</li> <li>• LEDs an Modicon-Modulen leuchten auf</li> <li>• Ready-Relais Ausgang des Netzteils mit Netzschütz verdrahtet</li> <li>• Initiatorklemmen für Endlagesensoren leuchten entsprechend des Schaltzustandes</li> <li>• Initiatorklemmen für den Lichtvorhang leuchten entsprechend des Schaltzustandes</li> <li>• LEDs der Not-Halt Sicherheitseingänge leuchten entsprechend des Schaltzustandes</li> <li>• Leitungsschutzschalter schalten die jeweilige Spannungsebene (ab)</li> <li>• Inverter-Enable Eingang des Servoreglers mit Sicherheitsausgängen des SLC verdrahtet</li> <li>• Netzdrossel in 400 V-Ebene verdrahtet</li> </ul>
<b>Erwartungswert</b>	Alle in der Auflistung aufgezählten Komponenten wurden eingebaut/verbaut.
<b>Spezialfälle</b>	Der Einbau von sowohl des Netzschützes als auch der Netzdrossel sind grundsätzlich fakultativ, es wird jedoch im Handbuch empfohlen beide Komponenten aus Sicht der Verbesserung der funktionalen Sicherheit zu verbauen.

Tabelle 37: Testfall - Prüfung der vollständigen und korrekten Verdrahtung

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_03
<b>Name</b>	Prüfung der Hardwarekonfiguration
<b>Beschreibung</b>	Es soll sichergestellt werden, dass alle Komponenten korrekt konfiguriert und parametriert wurden.
<b>Vorgehensweise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reale Steuerung wurde in Steuerungsauswahl selektiert</li> <li>• Jeder SERCOS Busteilnehmer hat eine eigene topologische Adresse entsprechend der realen Anordnung in der Ringstruktur des Busses</li> <li>• Der SERCOS-Bus befindet sich in Phase 4 (Ringkommunikation) und ermöglicht den Datenaustausch zwischen allen Busteilnehmern</li> <li>• Bewegungsparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung) der beiden Achsen wurden in den Servoreglereinstellungen konfiguriert</li> <li>• Physikalische Parameter der beiden Motoren wurden in den Servoeinstellungen aufgenommen</li> <li>• Netzteil wurde entsprechend der realen Verdrahtung konfiguriert</li> <li>• Diagnosemaske für offene Ausgänge am LMC wurde gesetzt</li> <li>• Adressbereiche des SLC für den Datenaustausch mit dem LMC wurden freigegeben</li> <li>• Verdrahtete Ein- und Ausgänge wurden in einer globalen Variablenliste gemappt</li> <li>• Sichere Ein- und Ausgangsmodule wurden entsprechend der zeitlichen Anforderungen parametriert</li> </ul>
<b>Erwartungswert</b>	Die aufgelisteten Einstellungen zu den jeweiligen Komponenten wurden entsprechend der Anforderungen und des realen Aufbaus angewendet.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 38: Testfall - Prüfung der Korrektheit der Hardwarekonfiguration und Parametrierung

Anschließend an die allgemeinen Testfälle zu dem physikalischen und elektrischen Aufbau des mehrachsigen Positioniersystems inklusive der Konfiguration und Parametrierung der einzelnen Steuerungskomponenten (Steuerungshardware), folgen nun konkrete Testfälle zu den einzelnen Funktionalitäten des Systems. Dazu werden erneut die Testkriterien aus den einzelnen Anforderungen der Anforderungsanalyse herangezogen.

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_04
<b>Name</b>	Prüfung Handmodus
<b>Beschreibung</b>	Durch Nutzereingaben ist es möglich den Handmodus des Systems auszuwählen und diesen anschließend zu nutzen.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anlage einschalten und vollständig hochfahren lassen</li> <li>2. Über Wahlschalter am Schaltschrank oder Button in GUI Handmodus auswählen</li> <li>3. Bestätigung der Auswahl des Handmodus über <i>START</i>-Taster (in GUI oder realer Taster)</li> <li>4. Betätigung der schwarzen Richtungsgeber-Taster (oder <i>Jog+ / Jog-</i> in GUI)</li> <li>5. Betätigung der weißen Greifer-Taster</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Zunächst wird der ausgewählte Handmodus über das Aufleuchten der weißen Bedientaster am Schaltschrank signalisiert bzw. durch die grüne Hinterlegung des Modus in der GUI. Die Bestätigung der Auswahl führt zum Einschalten der LED am <i>START</i> -Taster. Das anschließende Tasten der Richtungsgeber-Taster führt zu sichtbaren Bewegungen der Positioniereinheit. Die Betätigung des oberen weißen Taster schwenkt den Greifarm um 180°. Der untere weiße Taster öffnet/schließt den Greifer.
<b>Spezialfälle</b>	Sehr kurzes Tasten der Jog-Buttons bzw. der Richtungsgeber-Taster führt nur zu minimalen nicht sichtbaren Bewegungen.

---

Tabelle 39: Testfall - Prüfung der Handmodusfunktionalität

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_05
<b>Name</b>	Prüfung Automatikmodus
<b>Beschreibung</b>	Nach Auswahl des Automatikmodus findet eine autonome Abarbeitung des vorgegebenen Positionierprogrammes statt.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Programm mit absoluten Positionierungspunkten auf die Steuerung downloaden</li> <li>2. Anlage einschalten und vollständig hochfahren lassen</li> <li>3. Über Wahlschalter am Schaltschrank oder Button in GUI Automatikmodus auswählen</li> <li>4. Bestätigung der Auswahl des Automatikmodus über <i>START</i>-Taster (in GUI oder realer Taster)</li> <li>5. Betätigung des <i>STOP</i>-Tasters nach beliebiger Zeit</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Die Positioniereinheit fährt selbstständig die definierten Positionen ab, solange bis der <i>STOP</i> -Taster gedrückt wird. Das System beendet dann den aktuellen Zyklus und hält am Ausgangspunkt.
<b>Spezialfälle</b>	Die Vorgabe von Trajektorien und Greifaufgaben kann in das Programm integriert werden und sollte mithilfe von Trace-Diagrammen und simplen Testobjekten überprüft werden.

---

Tabelle 40: Testfall - Prüfung des Automatikmodus

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_06
<b>Name</b>	Prüfung Geschwindigkeitsvorgabe
<b>Beschreibung</b>	Die Geschwindigkeit der Bewegung auf der x- und z-Achse ändert sich entsprechend der vorgegebenen Parameter über die Bedienung.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten, Handmodus auswählen und bestätigen</li> <li>2. Potentiometer zur jeweiligen Achse auf die niedrigste Einstellung drehen</li> <li>3. Beide Achsen getrennt voneinander einmal joggen lassen</li> <li>4. Potentiometer zur jeweiligen Achse auf die höchste Einstellung drehen</li> <li>5. Beide Achsen erneut joggen lassen</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Das erstmalige Joggen der horizontalen und vertikalen Achse führt zu einer sehr langsamen Bewegung. Nach der Einstellung der Fahrgeschwindigkeit über die Potentiometer auf den höchstmöglichen Wert bewegen sich die Achsen merklich um ein Vielfaches schneller.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 41: Testfall - Prüfung der Geschwindigkeitsvorgabe

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_07
<b>Name</b>	Prüfung Endlagenfunktion
<b>Beschreibung</b>	Erreicht eine der Achsen seine Endlage, wird jegliche weitere Bewegung in diese Richtung verhindert. Befindet sich eine Achse in einer Endlagen nahen Position, bewegt diese sich verlangsamt.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten, Handmodus auswählen und bestätigen</li> <li>2. Joggen einer ausgewählten Achse (kontinuierliches Drücken des Tasters bis das Ende der jeweiligen Achse erreicht ist.)</li> <li>3. Wiederholen für alle vier Endlagen des Positioniersystems</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Das Erreichen eines Endlagesensors führt zum Bremsen und anschließenden Halten der Bewegung der jeweiligen Achse, die die Endlageposition erreicht hat. Anhand des Traces zu den durchgeführten Fahrten ist das langsamere Bewegen in Endlagennähe zu erkennen.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 42: Testfall - Prüfung der Endlagefunktionalität

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_08
<b>Name</b>	Prüfung funktionale Sicherheit
<b>Beschreibung</b>	Die Not-Halt Funktion durch Tasterbetätigung oder Lichtvorhangauslösung soll zum Halt jeglicher Bewegung führen. Dabei sollen die Zeitanforderungen an die Sicherheitsfunktionen eingehalten werden.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten, Handmodus auswählen und bestätigen</li> <li>2. Über Potentiometer die maximale Geschwindigkeit der Achsen einstellen</li> <li>3. Achsen des Systems kontinuierlich joggen lassen</li> <li>4. Auslösung eines Not-Halt-Tasters während sich mindestens eine Achse bewegt (wiederholen für alle Not-Halt-Taster inklusive der Softwareimplementierung)</li> <li>5. Auslösen des Lichtvorhangs mit einem Testobjekt während sich mindestens eine Achse bewegt</li> <li>6. Messung des Fahrweges nach Auslösung</li> <li>7. Messung der Bremsdauer der Achse(n)</li> <li>8. Messung der Auslösezeit des Lichtvorhangs</li> <li>9. Messung der Abschaltzeit des Servoreglers</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Nach spätestens 50ms schaltet der ausgelöste Lichtvorhang die zugehörigen Eingänge am SLC. Die Auslösung eines Not-Halts durch Tasterbetätigung oder Lichtvorhangauslösung führt nach spätestens 200ms zum vollständigen Abbremsen des Systems und spätestens 250ms zum Abschalten des Servoreglers. Dabei darf der noch zurückgelegte Fahrweg nach Auslösung nicht mehr als 5 cm betragen.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 43: Testfall - Prüfung der funktionalen Sicherheit

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_09
<b>Name</b>	Prüfung Reset-Funktion
<b>Beschreibung</b>	Nach einem Not-Halt Ereignis kann die Anlage über den <i>RESET</i> -Taster wieder in den Betrieb übergehen.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten, Handmodus auswählen und bestätigen</li> <li>2. Achsen des Systems joggen lassen</li> <li>3. Auslösen eines Not-Halts</li> <li>4. Testen der Jog-Funktion</li> <li>5. Betätigen des <i>RESET</i>-Tasters (gleichzeitig der Start-Taster)</li> <li>6. Erneut Achsen des Systems joggen lassen</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Nach Auslösung des Not-Halts führt der Jog-Befehl zu keiner Bewegung der Achsen. Erst nach Quittierung des Fehlers über den Reset-Taster führt ein erneuter Jog-Befehl wieder zu Achsenbewegungen.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 44: Testfall - Prüfung der Reset-Funktion

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_10
<b>Name</b>	Prüfung Programmierschnittstelle
<b>Beschreibung</b>	Es gilt die Möglichkeit von jedem Laborrechner aus die Anlage zu programmieren zu überprüfen.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten</li> <li>2. LogicBuilder Software auf Laborrechner öffnen</li> <li>3. Neues Projekt anlegen</li> <li>4. Im Reiter Steuerungsauswahl den Systemzugehörigen LMC finden</li> <li>5. Auslösen der Funktion „Visuelles Signalisieren“</li> <li>6. Wiederholen von jedem Laborrechner</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	Jeder Laborrechner kann die Steuerung des Systems finden und über die Funktion „Visuelles Signalisieren“ die Status-LED des LMC zum Blinken bringen.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 45: Testfall - Prüfung der Programmierschnittstelle

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_11
<b>Name</b>	Prüfung OPC UA Kommunikation
<b>Beschreibung</b>	Über einen OPC Client sollen ausgewählte Prozessdaten von dem als OPC Server fungierenden LMC empfangen werden.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. System einschalten und hochfahren lassen</li> <li>2. Die Software OPC-Watch auf einem Laborcomputer ausführen</li> <li>3. OPC Adresse, Nutzername und Passwort des Positioniersystems eingeben</li> <li>4. Verbindung zur Laboranlage starten</li> </ol>
<b>Erwartungswert</b>	In der Baumstruktur des OPC-Datensatzes können im vorgegebenen Unterverzeichnis mit dem Namen der globalen Variablenliste des Steuerungsprogramms alle übertragenen Prozessdaten ausgelesen werden.
<b>Spezialfälle</b>	Die Messdaten der Wago-Energieklemme stehen über einen separaten OPC-Server mit eigener Adresse bereit. Das Vorgehen bleibt jedoch das gleiche.

---

Tabelle 46: Testfall - Prüfung der OPC UA Kommunikation

---

<b>Identifikationsnummer</b>	TF_12
<b>Name</b>	Prüfung Signalampel
<b>Beschreibung</b>	Die rot-grüne Signalampel bzw. Signalsäule soll den aktuellen Betriebszustand anzeigen.
<b>Vorgehensweise</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. System einschalten und hochfahren lassen</li><li>2. Handmodus auswählen und bestätigen</li><li>3. Achse(n) des Systems joggen lassen</li><li>4. Not-Halt auslösen</li></ol>
<b>Erwartungswert</b>	Ist das System hochgefahren, leuchtet die Ampel ausschließlich grün (Leerlauf -> grünes Dauerleuchten). Bewegt sich mindestens eine Achse blinkt die Ampel abwechselnd rot-grün (Signalisierung Gefahrensituation). Liegt ein Not-Halt-Ereignis vor, leuchtet die Signalsäule dauerhaft rot.
<b>Spezialfälle</b>	—

---

Tabelle 47: Testfall - Prüfung der Signalampel

## 3.6 Stromlaufplan

Dieses Unterkapitel soll einen Überblick zur Entwicklung des Stromlaufplanes geben. Ziel des Überblickes ist nicht den kompletten Stromlaufplan darzustellen und zu erklären, sondern auf besonders relevante Aspekte in der Verdrahtung Bezug zu nehmen. Der vollständige Stromlaufplan des Systems kann im Anhang (siehe Abschnitt Anhang) wiedergefunden werden. Auf die Verdrahtung der Feld- und Prozessebene wird in diesem Abschnitt nicht eingegangen.

Zunächst wird der Anschluss des Netzteils LXM62P dargestellt. Grundlegend braucht das Netzteil eine 400 V Wechselstromversorgung und eine 24 V Gleichstromversorgung. Erstere stellt die Spannungsversorgung für die an den Servoregler angeschlossenen Motoren dar. Der 24 V Anschluss wird für die Steuerungsebene benötigt. Abbildung 18 zeigt die geforderte Verdrahtung des Netzteils.

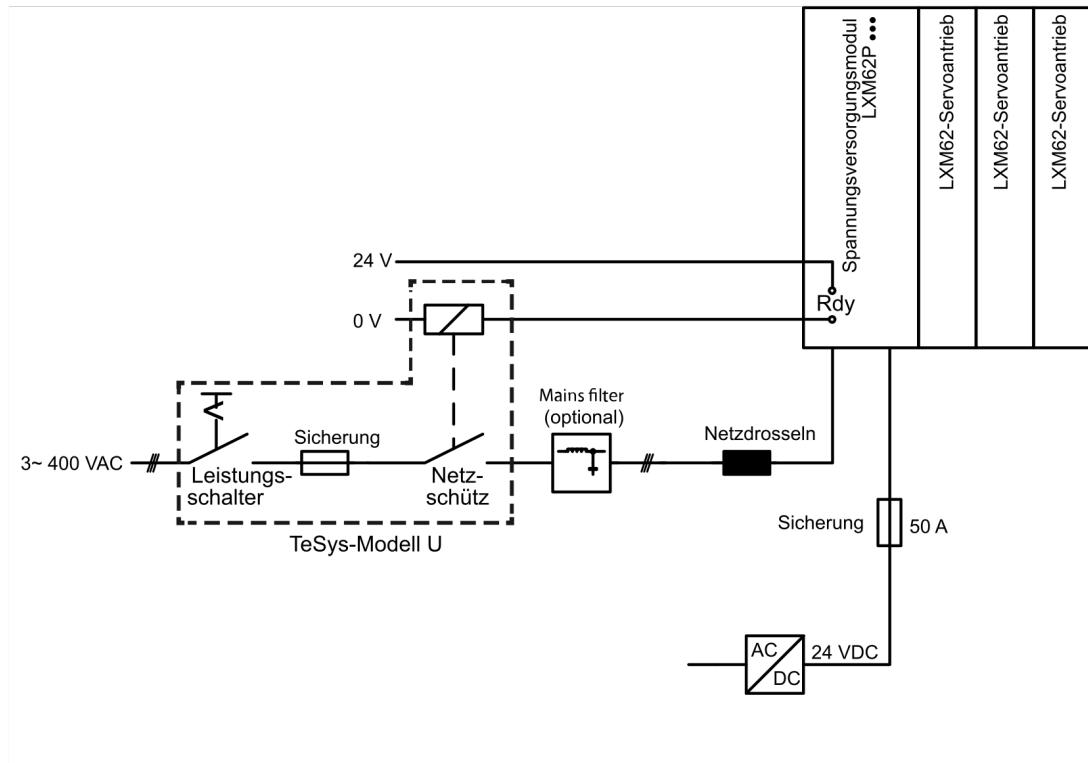


Abbildung 18: Anschluss und Verdrahtung des Netzteils LXM62P

Zu erkennen ist ein Netzschütz, welches die 400 V Ebene im Ready-Zustand des Systems über ein Schütz schalten kann. Grund für diese Implementation ist die Forderung des Zuschaltens der Versorgungsspannung erst bei Bedarf (wenn positioniert werden soll). Ziel ist die Verbesserung der Sicherheit des Systems. Der Mains-Filter und die Netzdrossel dienen zum Kompensieren von Oberschwingungen und der Glättung des Netzes.

Auch der Anschluss des Servoreglers LXM62D bedarf einer eigenen Betrachtung. Grund ist die Berücksichtigung der funktionalen Sicherheit des Servoreglers und der an diesem angeschlossenen Motoren. Grundlegend soll der Servoregler über den Inverter-Enable Eingang aktiviert bzw. deaktiviert werden. Der aktivierte Zustand muss dabei aktiv über die Bestromung des Eingangs hergestellt werden. Dies geschieht über einen sicheren Ausgang am SLC. Der Ausgang wird im Fehlerfall deaktiviert, was dafür sorgt, dass auch der Inverter-Enable Anschluss am Regler nicht mehr versorgt wird und letztendlich zur Abschaltung des Servoreglers führt. Die folgenden zwei Grafiken zeigen den Steuerkreis (siehe Abbildung 19) und den Lastkreis (siehe Abbildung 20) zur Implementation besagter Funktionalität.

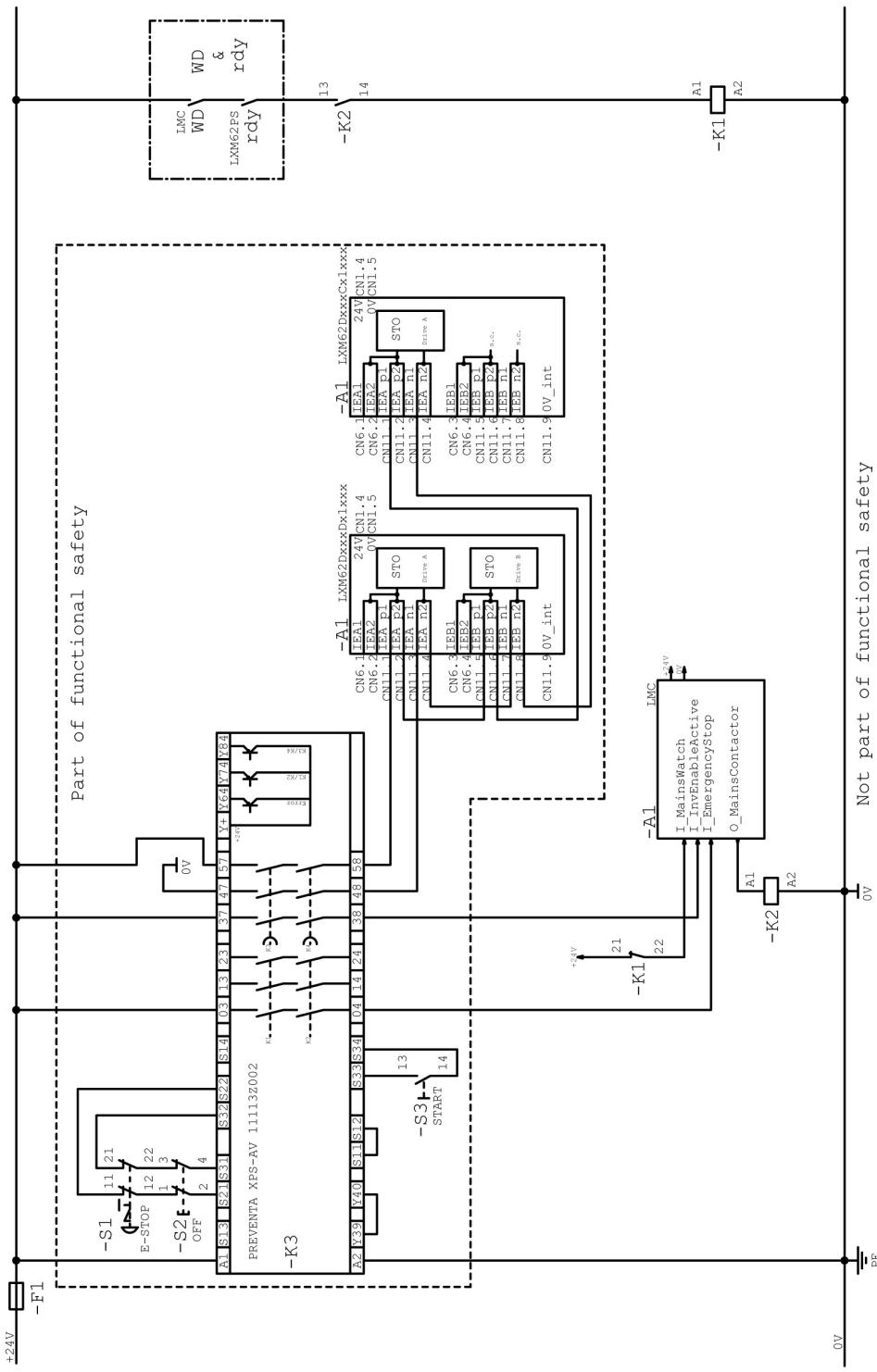


Abbildung 19: Steuerkreis des Servoreglers LXM62D

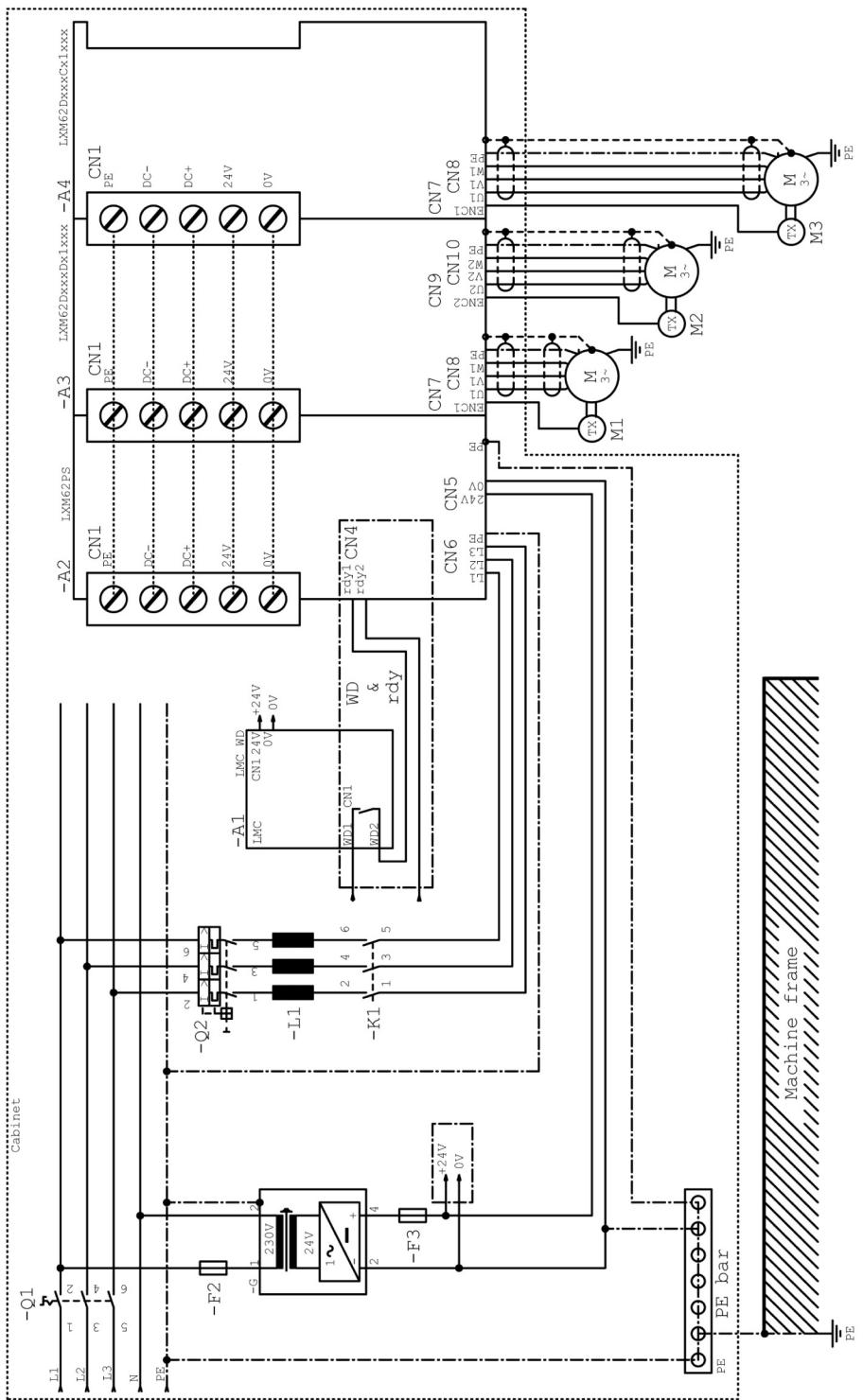


Abbildung 20: Lastkreis des Servoreglers LXM62D

### 3.7 Datenmodell

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Logischer Zustand
1	Endlage Oben (Öffner)	g_ixIN_00	Erfassung oberes Ende der z-Achse erreicht	BOOL	%IX230.0	betätigt=0
2	Endlage Unten (Öffner)	g_ixIN_01	Erfassung unteres Ende der z-Achse erreicht	BOOL	%IX230.1	betätigt=0
3	Endlage Links (Öffner)	g_ixIN_02	Erfassung linkes Ende der x-Achse erreicht	BOOL	%IX230.2	betätigt=0
4	Endlage Rechts (Öffner)	g_ixIN_03	Erfassung rechtes Ende der x-Achse erreicht	BOOL	%IX230.3	betätigt=0
5	TA Rtg. Oben (Schließer)	g_ixIN_04	Eingabe Jog+ z-Achse	BOOL	%IX230.4	betätigt=1
6	TA Rtg. Unten (Schließer)	g_ixIN_05	Eingabe Jog- z-Achse	BOOL	%IX230.5	betätigt=1
7	TA Rtg. Links (Schließer)	g_ixIN_06	Eingabe Jog+ x-Achse	BOOL	%IX230.6	betätigt=1
8	TA Rtg. Rechts (Schließer)	g_ixIN_07	Eingabe Jog- x-Achse	BOOL	%IX230.7	betätigt=1
9	TA Grün (Schließer)	g_ixIN_08	EIN / Quittieren eines Fehlers und Freigabe	BOOL	%IX231.0	betätigt=1
10	TA Rot (Öffner)	g_ixIN_09	AUS	BOOL	%IX231.1	betätigt=0
11	TA Weiß Oben (Schließer)	g_ixIN_10	Frei / vom Anwender wählbar	BOOL	%IX231.2	betätigt=1

12	TA Weiß Unten (Schließer)	g_ixIN_12	Frei / vom Anwender wählbar	BOOL	%IX231.3	betätigt=1
13	Schalter Rtg. Links (Schließer)	g_ixIN_13	Auswahl Handmodus	BOOL	%IX231.4	betätigt=1
14	Schalter Rtg. Rechts (Schließer)	g_ixIN_14	Auswahl Automatikmodus	BOOL	%IX231.5	betätigt=1
15	Lichtvorhang OSSD1 (Öffner)	g_ixIN_15	Erfassung Eindringen in Arbeitsbereich	BOOL	%IX231.6	betätigt=0
16	Lichtvorhang OSSD2 (Öffner)	g_ixIN_16	Erfassung Eindringen in Arbeitsbereich	BOOL	%IX231.7	betätigt=0

Tabelle 48: Datenmodell - Digitale Eingänge Modicon TM5 SDI16D E/A Modul

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Logischer Zustand
1	Signalsäule Rot	g_qxOUT_00	Dauerleuchten: Anlage befindet sich im Fehlerzustand	BOOL	%QX224.0	betätigt=1
2	Signalsäule Grün	g_qxOUT_01	Dauerleuchten: Anlage ist betriebsbereit (Leerlauf)	BOOL	%QX224.1	betätigt=1
3	TA LED Grün	g_qxOUT_02	Anlage ist eingeschaltet	BOOL	%QX224.2	betätigt=1
4	TA LED Rot	g_qxOUT_03	Anlage ist Ausgeschaltet (Hauptschalter jedoch EIN)	BOOL	%QX224.3	betätigt=1
5	TA LED Weiß Oben	g_qxOUT_04	Frei / vom Anwender definierbar	BOOL	%QX224.4	betätigt=1

6	TA LED Weiß Unten	g_qxOUT_05	Frei / vom Anwender definierbar	BOOL	%QX224.5	betätigt=1
7-16	NA	g_qxOUT_06-15	—	BOOL	%QX224.6-225.7	—

Tabelle 49: Datenmodell - Digitale Ausgänge Modicon TM5 SDO16T E/A Modul

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Wertebereich
1	Poti Oben	g_irIN_00	Vorgabe Maximalgeschwindigkeit z-Achse	REAL	%IX237.0	0.0 - 1.0
2	Poti Unten	g_irIN_01	Vorgabe Maximalgeschwindigkeit x-Achse	REAL	%IX237.1	0.0 - 1.0
3	NA	g_irIN_02	—	—	%IX237.2	—
4	NA	g_irIN_03	—	—	%IX237.3	—

Tabelle 50: Datenmodell - Analoge Eingänge Modicon TM5 SAI4L E/A Modul

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Wertebereich
1-4	NA	g_qrOUT_00-04	—	—	%QW113-116	—

Tabelle 51: Datenmodell - Analoge Ausgänge Modicon TM5 SAO4L E/A Modul

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Daten-typ	SPS-Adresse	Logischer Zustand
1	NOT-Halt (Öffner)	g_ixSAFE_IN_00	Auslösen NOT-Halt der Achsbewegungen	BOOL	%IX250.0	betätigt=0

2	NOT-Halt (Schließer)	g_ixSAFE_IN_01	Auslösen NOT-Halt der Achsbewegungen	BOOL	%IX250.1	betätigt=1
3	Lichtvorhang OSSD1 (Schließer)	g_ixSAFE_IN_02	Auslösen NOT-Halt der Achsbewegungen	BOOL	%IX250.2	betätigt=1
4	Lichtvorhang OSSD2 (Schließer)	g_ixSAFE_IN_03	Auslösen NOT-Halt der Achsbewegungen	BOOL	%IX250.4	betätigt=1

Tabelle 52: Datenmodell - Sichere digitale Eingänge Modicon TM5 SDI4DFS E/A Modul

Nr.	Betriebsmittel	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Logischer Zustand
1	Inverter Enable	g_qxSAFE_OUT_00	Signalabbruch führt zum Abschalten des Servoreglers (LXM62 D)	BOOL	%QX234.0	betätigt=1
2	Inverter Enable	g_qxSAFE_OUT_01	Signalabbruch führt zum Abschalten des Servoreglers (LXM62 D)	BOOL	%QX234.1	betätigt=1
3	NA	g_qxSAFE_OUT_02	—	BOOL	%QX234.2	—
4	NA	g_qxSAFE_OUT_03	—	BOOL	%QX234.3	—

Tabelle 53: Datenmodell - Sichere digitale Ausgänge Modicon TM5 SDO4TFS E/A Modul

Nr.	Funktion	BMK	Allgemeine Beschreibung	Datentyp	SPS-Adresse	Anfangs-/Standardwert
1	Error Output	bError_Out	Error Meldung SF_Antivalent SoSafe Programmable	BOOL	%IX0.0	FALSE

2	Hardware Status	bHardwareOk	Hardwarestatus Modicon TM5 SLC	BOOL	%IX0.1	FALSE
3	NOT-Halt (intern)	bNotHalt	Anbindung NOT-Halt an Programmtemplate	BOOL	%IX0.2	FALSE
4	Lichtvorhang OSSD1 (intern)	bNotHalt	Anbindung Lichtvorhangsstatus an Programmtemplate	BOOL	%IX0.3	FALSE
5	Lichtvorhang OSSD2 (intern)	bNotHalt	Anbindung Lichtvorhangsstatus an Programmtemplate	BOOL	%IX0.4	FALSE

Tabelle 54: Datenmodell - Businterne Variablen: geschrieben durch SLC, gesendet an LMC (SLC2LMC in Modicon TM5 CSLC Safety Steuerung)

## 3.8 Funktionale Sicherheit

Dieses Unterkapitel behandelt die funktionale Sicherheit des mehrachsigen Positioniersystems. Es wird eine Risikobeurteilung vorgenommen, die zu einer Handlungsempfehlung bei der fehlersicheren Inbetriebnahme des Systems führt. Der folgende Inhalt ist lediglich eine Zusammenfassung, die als Überblick dient. Die Mittel zur Minderung bzw. Vermeidung von Risiken gelten als vorgegeben. Ziel dieses Kapitels ist es nicht eine Risikoanalyse mit anschließender Modellierung von Sicherheitsmaßnahmen vorzunehmen.

Grundsätzlich können zwei Gefahrenstellen am System erkannt werden. Dies ist zum Einen die Gefährdung von Personen durch einen elektrischen Schock und zum anderen die Gefahr der Verletzung durch die Bewegungen des Systems.

Für die Verminderung bzw. Vermeidung von Risiken muss ein Sicherheitskonzept erstellt werden und die aufgestellten Ergebnisse bei der Implementierung mit eingearbeitet werden. Dass heißt konkret, dass die Implementationsphase nicht nur die Hardware-Implementation der eigentlichen Systemkomponenten umfasst, sondern dass sicherheitsbezogene Komponenten mit verbaut/montiert werden. Auch die Software-Implementation wird erweitert um Funktionen die Sicherheit der Anlage betreffend. Das heißt konkret, dass ein Sicherheitsprogramm umgesetzt werden muss.

Um Handlungen zur Vermeidung von Risiken durchzuführen, bedarf es zunächst der Ermittlung von Risikoquellen. Wie bereits erwähnt sind das die Verletzungsgefahr durch elektrische Komponenten sowie die Gefahr durch die Bewegung der Achsen der Positioniereinheit geschädigt zu werden. Vor allem die Schädigung durch bewegende Bauteile sorgt für ein erhebliches Risiko, welches es gilt zu minimieren. Dazu wird zunächst ein Risikograph erstellt, um sich der Gefährdung durch das System bewusst zu werden.

### S Schwere der Verletzung

S1 leichte (üblicherweise reversible Verletzung)

S2 ernste (üblicherweise irreversible Verletzung oder Tod)

### F Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition

F1 selten bis weniger häufig und/oder die Zeit der Gefährdungsexposition ist kurz

F2 häufig bis dauernd und/oder die Zeit der Gefährdungsexposition ist lang

### P Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens

P1 möglich unter bestimmten Bedingungen

P2 kaum möglich

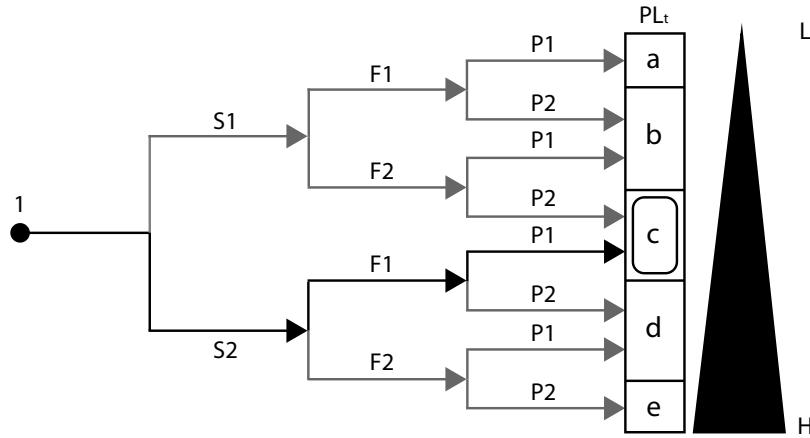


Abbildung 21: Risikograph nach DIN EN ISO 13849-1 zum mehrachsigen Positioniersystem

Es ist zu erkennen, dass von der Laboranlage ein mittelschweres Risiko ausgeht für insbesondere Personen in direktem Kontakt mit dem System. Zur Verminderung von Gefahren durch sich bewegende Elemente können mehrere Strategien angewendet werden. Dennoch gibt es eine Systemkomponente, die für ein System dieser Art immer Anwendung finden muss. Es handelt sich um einen Not-Halt. Im Unterschied zu einem Not-Stop ist es wichtig festzustellen, dass die Gefahrensituation von beweglichen Elementen ausgeht und nicht von Strömen und Spannungen. Es wäre sogar fatal das System spannungsfrei zu schalten, da dies mögliche unkontrollierte Bewegungen und somit undefinierte Zustände als Folge hätte. Somit ist es Priorität sämtliche Bewegungen in einer Notsituation zu stoppen. Da die reine Not-Halt Funktionalität ausgelöst durch ein Tast-Ereignis nicht ausreichend ist, um das System sicher für den Nutzer zu machen, ist eine weitere Handlung nötig. Vorgabe für das mehrachsige Positioniersystem ist laut Anforderungen die Nutzung eines Lichtvorhangs. Dieser soll das Eintreten in den Arbeitsbereich des Systems erkennen und den Not-Halt auslösen. Eine weitere Maßnahme ist die Verwendung einer dedizierten Sicherheitssteuerung (konkret: **SLC!100**). Diese ermöglicht eine redundante Berechnung von fehlerrelevanten Funktionen. Durch die Redundanz können kritische Systemfehler minimiert werden.

Zur effektiven Minderung der Risiken werden nun folgende Reaktionszeiten an das System vorgegeben:

Maximale Auslösezeit des Lichtvorhangs: 50 ms

Maximale Bremsdauer bei Not-Halt: 200 ms

Maximale Abschaltzeit des Servoreglers bei Not-Halt: 250 ms

Das System sei nach Vorgaben nun maximal sicher nach der Implementierung der aufgezählten Maßnahmen. Das bedeutet jedoch nicht, dass es zu 100% sicher ist. Die Umsetzung der funktionalen Sicherheit ist in Unterabschnitt 4.1 dokumentiert.

---

## 4 Inbetriebnahme

Dieses Kapitel unterteilt sich in drei Abschnitte. Das erste Unterkapitel behandelt die Implementation bzw. die Implementationsphase der Realisierung des mehrachsigen Positioniersystems. Dabei geht es auf der einen Seite um die Beschreibung des Hardware- bzw. Geräteentwurfs aus den zugehörigen Inhalten im Kapitel zur Projektierung der Anlage. Konkret meint dies den konstruktionellen Aufbau der Laboranlage aus der Konfigurator Grafik und der Konstruktionszeichnung an erster Stelle und nachfolgend die Verdrahtung der Komponenten nach dem entwickelten Stromlaufplan. Auf der anderen Seite beinhaltet das sich anschließende Kapitel die Implementation der Software aus den in der Modellierung erstellten UML Diagrammen wie unter anderem das Zustandsdiagramm.

Nach der Implementation kann und muss das System auf seine Funktionalität geprüft werden, sowohl was seine Hardware als auch seine Software anbelangt. Dazu werden die Testkriterien aus der Anforderungsanalyse herangezogen und in Testfällen zur Überprüfung aller Anforderungen genutzt. Dabei wird eine Unterteilung in mehrere Ebenen vorgenommen, die aufbauend nacheinander durchgangen werden. Ziel ist es zunächst grundlegende Testfälle zu behandeln, die Voraussetzung für speziellere, untergeordnete Validierungen von Testspezifikationen sind.

Wird ein Test nicht bestanden, muss in einer weiteren Iteration der Entwicklungsphase der bzw. die Mängel beseitigt werden. Diese Korrekturen werden im letzten Unterkapitel der Inbetriebnahme behandelt.

### 4.1 Implementationsphase

In diesem Unterkapitel findet sich die Dokumentation der Implementation sämtlicher Modelle aus der Projektierungsphase wieder. Zunächst wird im Unterunterabschnitt 4.1.1 die Montage der Laboranlage kurz dargestellt. Dazu wird aus der Konfiguratorskizze unter Berücksichtigung der Maße des Laborraumes und der entsprechenden Anforderungen an den Aufbau des Positioniersystems die Anlage aufgebaut. Nachdem alle Gehäuseelemente an der Wand und dem Boden verankert sind können die Steuerungskomponenten, die Aktuatoren und die Sensoren an diesen befestigt werden. Weiterhin umfasst der nachfolgende Abschnitt die Verdrahtung der elektrischen Komponenten nach entwickeltem Stromlaufplan und der Netzwerkdarstellung aus dem Unterabschnitt 3.6.

Im zweiten Unterabschnitt (Unterunterabschnitt 4.1.2) wird die Implementation der modellierten Diagramme zur Steuerungssoftware vorgenommen. Da durch die Wahl der Steuerung (Logic Motion Controller von Schneider Electric), wie bereits in der Anforderungsanalyse festgestellt, die Umgebung zur Programmierung der Systemsoftware festgelegt ist, besteht die Möglichkeit Templates aus dieser zu nutzen, welche den Softwareentwicklungsprozess vereinfachen. Der Unterabschnitt zur Software-Implementation behandelt somit die schrittweise Darstellung der Umsetzung der Automatisierungssoftware aus dem von Schneider Electric bereitgestellten *MotionTemplateFull*.

### 4.1.1 Hardware-Implementation

Für die Umsetzung der Hardware wird die Konfiguratorgrafik aus der Konzeptphase aufgegriffen und gilt als Grundlage für die reale Umsetzung der Hardwarebereiche des Systems. Da im Konfigurator bereits die Kernanforderungen an die Systemhardware berücksichtigt wurden, müssen beim Bau und der Montage des Gehäuses bzw. des Anlagengerüsts nur noch die nicht-funktionalen Anforderungen an dieses und den umliegenden Raum berücksichtigt werden.

Durch die Form und die Ausmaße des Laborraumes ergibt sich eine maximale Höhe des Gehäuses von 2230mm. Die horizontale Ausdehnung der Anlage wird nicht durch den Raum begrenzt. Die Entscheidung wurde aufgrund von subjektiven Anschaulichkeitskriterien getroffen. Resultat ist eine horizontale Ausdehnung der x-Achse von 2000mm, was ungefähr der Gangbreite im Laborraum entspricht. Folglich ist der bewegliche Teil des Positioniersystems mittig zum Durchgang im Raum ausgerichtet. Sowohl rechts als auch links neben der Positioniereinheit ist ein Bereich von jeweils 600 mm reserviert, in dem Ablagepositionen an der Wand befestigt werden können. Die rechte Seite der Anlagenkonstruktion besitzt zusätzlich noch ein weiteres Aluminium Profil, welches später benötigt wird, um den Schaltschrank und die Steuerungshardware am System zu fixieren. Nachfolgende Grafik zeigt das an der Laborraumwand montierte Anlagengerüst, an welches im nächsten Schritt die Steuerungshardware befestigt wird.



Abbildung 22: Anlagengerüst des Gehäuses vom mehrachsigen Positioniersystem an der hinteren Laborwand im Raum G 422

Im nächsten Schritt der Hardware-Implementation werden die Steuerung (LMC400c) das Netzgerät (LXM 62P) und der Servoregler (LXM 62D) an Querverstrebungen der beiden rechten Profile verschraubt. Es gilt die Montageanleitung zu beachten.

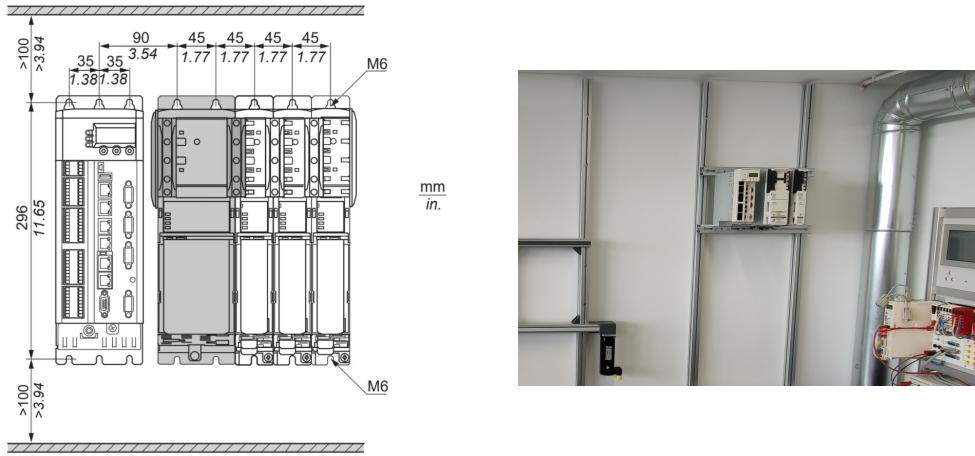


Abbildung 23: Installation der Steuerungshardware am Gehäuseaufbau des Positioniersystems

Bevor die in der Konfiguratorskizze aufgeführten Sensoren und Aktuatoren verbaut werden können, sind noch weitere Profile notwendig, um den Gehäusebau zu komplettieren. 500 mm von der Wand entfernt auf Höhe der äußeren Profile des Positionierbereiches werden zwei senkrechte Aluminiumstempel an Decke und Boden befestigt. Diese sind das vordere Ende des mehrachsigen Positioniersystems. Das Gehäusegerüst ist nun vollständig und umschließt den Bereich, in dem Positionieraufgaben durchgeführt werden können mit der Laboranlage.

Zwischen den beiden linken Profilen und den beiden rechten Profilen werden Plexiglasscheiben angebracht, die das Hineingreifen in den Fahrbereich der Anlage von den Seiten verhindern sollen. An der Front wird ein Lichtvorhang bestehend aus Emitter und Receiver montiert. Dieser befindet sich auf der Innenseite an den zuletzt angebauten senkrechten Stempeln. Der Lichtvorhang dient ebenso wie die Plexiglasscheiben zum Schutz von Leib und Leben. Im Gegensatz zu den Scheiben erlaubt der Lichtvorhang jedoch im unbewegten Zustand des Systems das Eindringen von Personen in den Arbeitsbereich.

Folgende Grafik zeigt zu den soeben genannten Komponenten zusätzlich noch die in der Anforderungsanalyse ermittelten vier Endlagesensoren, die Servomotoren für x- und z-Achse, sowie E-Ketten zu den beweglichen Achsen.



Abbildung 24: Installation von Sensoren und Aktuatoren des mehrachsigen Positioniersystems

Der Schaltschrankbau und die Verdrahtung des Systems stellt den letzten Schritt in der Hardware-Implementierung dar. Als Schaltschrank wurde ein Modell der Firma Rittal gewählt. Die Breite des Schrankes ist durch den gewählten Aufbau bereits festgelegt und beträgt 600mm. Aufgrund der Anzahl der Klemmen und dem Wunsch E/A-Module sowie weitere Steuerungskomponenten physisch von normalen Klemmen zu trennen, wurde entschieden eine Schaltschrankkonfiguration zu wählen, die in der Höhe zwei Hutschienen unterbringt. Die gewählte Schrankhöhe liegt deswegen bei 380mm. Zuletzt muss die Tiefe des Schaltschranks ausreichend sein, um die tiefste Komponente, die im Schaltschrank verbaut werden soll, unterbringen zu können. Da bereits die kleinste verfügbare Variante des gewählten Schrankes diese Anforderung erfüllt, hat der zu verbauende Schaltschrank eine Tiefe von 210mm.

Wie bereits angedeutet ist in der Grafik unten zu erkennen, dass die untere der beiden Hutschienen sämtliche Klemmen beherbergt inklusive der Absicherungen für die jeweilige Spannungsebene, so wie im Stromlaufplan geplant. An der oberen Hutschiene befinden sich die Modicon TM5 E/A-Module, die als Erweiterung für die Ein- und Ausgänge des LMC dienen. Die im Bild als rot gefärbte Komponente zu erkennende Steuerung, ist der Safety Logic Controller, der für die Berechnung der Sicherheitsfunktionen des Systems verantwortlich ist. Dazu besitzt dieser jeweils vier digitale Ein- und Ausgänge.

Rechts daneben auf derselben Schiene ist die Wago PFC200 Steuerung angebracht, welche mithilfe ihrer Energieklemme die Leistungsaufnahme des Systems messen soll.

Ganz Rechts auf der Hutschiene ist ein Ethernetswitch montiert, an welchen beide Steuerungen (LMC400c und Wago PFC200) per Ethernetkabel angeschlossen sind. Durch den Einsatz des Switches führt nach Fertigstellung der Verdrahtung nur ein Kabel zur Programmierung der beiden Steuerungen aus dem Schaltschrank heraus.

Weiterhin ist auf der rechten Schrankwand der Hauptschalter platziert. Über dieser aktiviert oder deaktiviert die Stromversorgung des Schaltschranks und somit auch aller Systemkomponenten.

Die Verdrahtung erfolgt nach Stromlaufplan. Dieser beinhaltet auch die Kopplung der einzelnen Module aus der PacDrive 3 Serie, die verbaut wurden (LMC400c, LXM 62P, LXM 62D, Modicon TM5 Module, Modicon TM5 SLC100 Sicherheitsmodule).

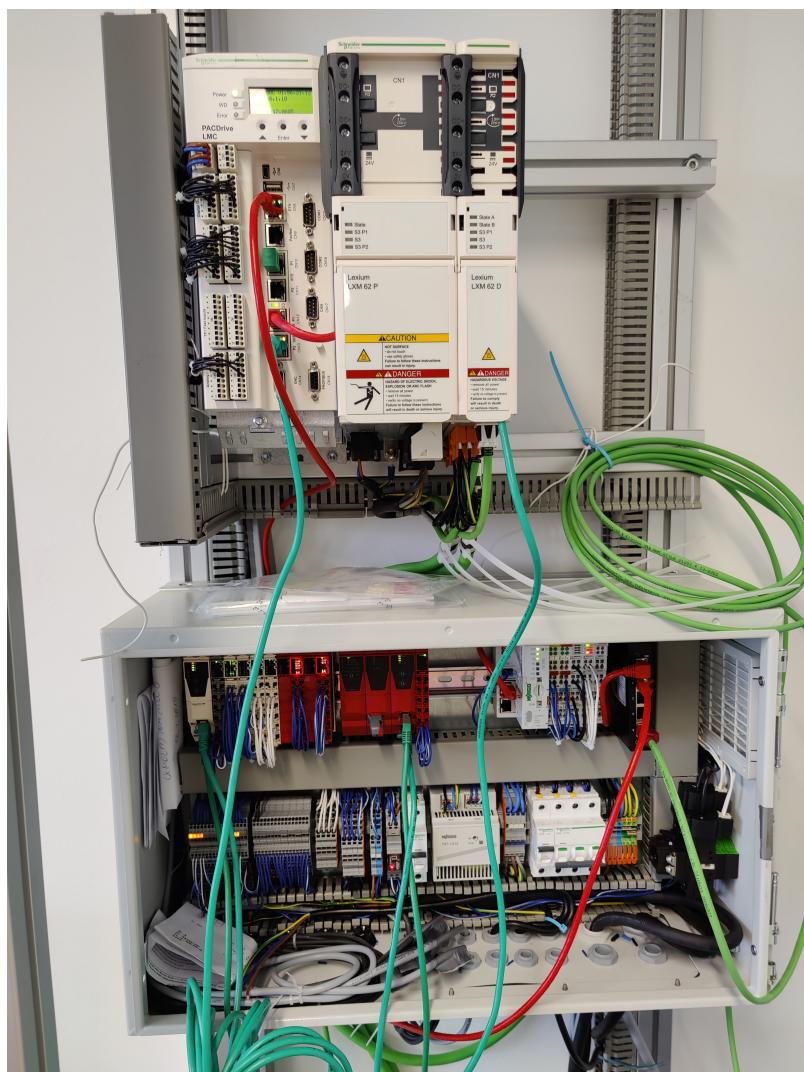


Abbildung 25: Einbau und Verdrahtung des Schaltschranks

### 4.1.2 Software-Implementation

In diesem Unterabschnitt wird die Realisierung der Automatisierungssoftware dokumentiert. Grundlegend soll aus der Modellierung der Software im vorhergegangenen Kapitel (Projektierung) das Programm für das mehrachsige Positioniersystem geschrieben werden. Wie bereits in der Einleitung zu diesem Unterkapitel erwähnt, resultiert die Wahl der Steuerungskomponenten, also konkret die Wahl Komponenten aus der PacDrive 3 Serie von Schneider Electric auszuwählen, in dem Zwang mit der auf Codesys 3.5 basierten Entwicklungsumgebung MachineExpert zu arbeiten. Diese besitzt bereits mehrere Templateprojekte für verschiedene Anwendungsfälle. Die Firma Schneider Electric empfiehlt die Nutzung des jeweiligen Programmtemplates für den gewünschten Anwendungsfall. Grund dafür ist die Minimierung vom Programmieraufwand. Ziel soll es sein lediglich Konfigurationen an einem modularen Template vorzunehmen, sodass dieses die eigenen Anforderungen erfüllt.

Begründet durch diese Aussagen wird zunächst davon ausgegangen, dass durch die Nutzung des *MotionTemplateFull* mit überschaubarem Programmier- und Parametriereraufwand die Sammlung der eigenen Anforderungen an das Automatisierungsprogramm und dessen Funktionen erfüllt werden. Dies gilt im anschließenden Unterkapitel in den jeweiligen Testfällen zu bestätigen.

Zunächst findet eine schrittweise Auflistung zur Umsetzung der Steuerungssoftware aus dem bereitgestellten Template statt. Diese unterteilt sich in folgende Vorgehensschritte:

- Anlegen des Projektes
- Zuweisen der Ein- und Ausgänge der Steuerungen und deren Erweiterungsmodule (engl. Mapping)
- Parametrierung und Inbetriebnahme des Servoreglers für die x-Achse
- Parametrierung und Inbetriebnahme des Servoreglers für die z-Achse
- Parametrierung und Inbetriebnahme des Netzteils
- Implementation der funktionalen Sicherheit

Für das **Anlegen des Projektes** wird die Software MachineExpert LogicBuilder auf den Rechnern des Labores benötigt. Alternativ kann auch die veraltete Software SoMachine LogicBuilder genutzt werden. Soll von jedem PC aus das System programmiert und zunächst auch gesteuert werden, so muss die Programmiersoftware vorhanden sein. Ist dies der Fall, so muss anschließend wie folgt vorgegangen werden:

1. *LogigBuilder* Programm am Laborcomputer starten

2. Neues Projekt aus Projektvorlage *MotionTemplateFull* für LMC300/400/402/600/800 anlegen
3. Im Projektbaum oben links Doppelklick auf *LMC\_PacDrive*
4. Anschließend im Reiter *Steuerungsauswahl* den LMC400c auswählen (vorher sichergehen, dass der Controller eingeschaltet ist, sonst kann dieser nicht gefunden werden)
5. Im Projektbaum unter *Sercos\_Master (Sercos Master)* alle untergeordneten Geräte markieren und anschließen entfernen
6. Etwas tiefer im Projektbaum Doppelklick auf *Geräteaddressierung*
7. Im neu geöffneten Fenster oben rechts den Button *Sercos Scan starten* drücken
8. Es erscheinen neue tabellarisch angeordnete Einträge in der Mitte des Fensters (Einträge sind rot eingefärbt)
9. Unten rechts im offenen Fenster auf *Geräteparameter übernehmen* klicken (Alle vorhandenen Einträge sollten die Farbe zu grün wechseln)
10. Den *IEC Bezeichner* des Netzteils ändern zu *PSM\_PowerSupply*
11. Den *IEC Bezeichner* des von Drive A und B ändern zu *DRV\_Slave1* bzw. *DRV\_Slave2*
12. Oben links im offenen Fenster über Combobox drei neue LXM62DxS hinzufügen
13. *IEC Bezeichner* des ersten neuen Eintrages auf *DRV\_Master* ändern (Wichtig: Gerät sollte auf virtuell eingestellt sein)
14. *IEC Bezeichner* der beiden anderen Einträge ändern zu *DRV\_Slave3* bzw. *DRV\_Slave4* (Wichtig: Geräte sollte auf virtuell eingestellt sein)

Geräte der Steuerungsconfiguration							Gescannte Geräte		
Topolog. Adresse	IEC-Bezeichner	Typ	Geräte-Seriennr.	Motor-Seriennumm.	Anwendungstyp	SERCOS-A	Identifikationsmodus	Betriebsart	Gescannte Geräte
1	PSM_PowerSupply	LXM62DxS	2910053203		PowerSupply	1	Topologische A... ✓	Real ✓ ...	<✓
2	DRV_Slave1	LXM62DxS	2910018244-A	2800573624	Drive A	2	Topologische A... ✓	Real ✓ ...	<✓
3	DRV_Slave2	LXM62DxS	2910018244-B	2800573623	Drive B	3	Topologische A... ✓	Real ✓ ...	<✓
4	SLC_TMS5CLCx..	TMS5CLC10..	B3560170926		Modular Safety D...	4	Topologische A... ✓	Real ✓ ...	<✓
5	BC_TMNS31	TMNS31	B37C0196882		Modular IO Device	5	Topologische A... ✓	Real ✓ ...	<✓
6	DRV_Slave3	LXM62DxS			DRV_LexumS2	100	Topologische A... ✓	Virtuell ✓ ...	<✓
7	DRV_Slave4	LXM62DxS			DRV_LexumS2	100	Topologische A... ✓	Virtuell ✓ ...	<✓
8	DRV_Master	LXM62DxS			DRV_LexumS2	100	Topologische A... ✓	Virtuell ✓ ...	<✓

Fehlerlegende:

- >Login fehlerfrei möglich
- Kein fehlerfreier Login möglich
- Kein gescanntes Gerät zugeordnet
- Login fehlerfrei möglich. Unterschiede in irrelevanten Werten werden jedoch hervorgehoben
- Login fehlerfrei möglich: gescanntes Gerät wird jedoch nicht zugeordnet
- Login möglich: eingerichteter Identifikationsmodus wird jedoch nicht unterstützt

Werte aller zugeordneten Geräte übernehmen

Abbildung 26: Geräteaddressierung der SERCOS III Busteilnehmer

Um die anliegenden Sensor- und Eingabegerätesignale an den SPS-Eingängen, sowie die Aktuatoren und Indikatoren an den SPS-Ausgängen nutzen zu können, müssen den Hardwareadressen im Programm Variablen zugewiesen werden (engl. **Mapping**). Damit alle E/A-Variablen an einem Ort als auch global im gesamten Programm verfügbar sind, sollte eine globale Variablenliste angelegt werden, in der alle Variablen eingetragen werden können. Folgendes Bild zeigt die globale Variablenliste für die Ein- und Ausgänge des mehrachsigen Positioniersystems.

```

2 | VAR_GLOBAL
3 | // Modicon TMS digital Inputs
4 | q_ixIN_00: BOOL; // Endl. Oben
5 | q_ixIN_01: BOOL; // Endl. Unten
6 | q_ixIN_02: BOOL; // Endl. Links
7 | q_ixIN_03: BOOL; // Endl. Rechts
8 | q_ixIN_04: BOOL; // Tst. Reg. Oben
9 | q_ixIN_05: BOOL; // Tst. Reg. Unten
10 | q_ixIN_06: BOOL; // Tst. Reg. Links
11 | q_ixIN_07: BOOL; // Tst. Reg. Rechts
12 | q_ixIN_08: BOOL; // Tst. Grün
13 | q_ixIN_09: BOOL; // Tst. Rot
14 | q_ixIN_10: BOOL; // Tst. Weiß Oben
15 | q_ixIN_11: BOOL; // Tst. Weiß Unten
16 | q_ixIN_12: BOOL; // Schlit. Links (Betr. Mod.)
17 | q_ixIN_13: BOOL; // Schlit. Rechts (Betr. Mod.)
18 | q_ixIN_14: BOOL; // LV. OSSDI
19 | q_ixIN_15: BOOL; // LV. OSSD2
20 |
21 | // Modicon TMS digital Outputs
22 | q_qxOUT_00: BOOL; // Sign. A. Rot
23 | q_qxOUT_01: BOOL; // Sign. A. Grün
24 | q_qxOUT_02: BOOL; // Tst. LED Grün
25 | q_qxOUT_03: BOOL; // Tst. LED Rot
26 | q_qxOUT_04: BOOL; // Tst. LED Weiß Oben
27 | q_qxOUT_05: BOOL; // Tst. LED Weiß Unten
28 | q_qxOUT_06: BOOL; // ***
29 | q_qxOUT_07: BOOL; // ***
30 | q_qxOUT_08: BOOL; // ***
31 | q_qxOUT_09: BOOL; // ***
32 | q_qxOUT_10: BOOL; // ***
33 | q_qxOUT_11: BOOL; // ***
34 | q_qxOUT_12: BOOL; // ***
35 | q_qxOUT_13: BOOL; // ***
36 | q_qxOUT_14: BOOL; // ***
37 | q_qxOUT_15: BOOL; // ***
38 |
39 | // Modicon TMS analog Inputs
40 | q_ixIN_00: REAL; // Pot. Oben (z-Achse)
41 | q_ixIN_01: REAL; // Pot. Unten (z-Achse)
42 | q_ixIN_02: REAL; // ***
43 | q_ixIN_03: REAL; // ***
44 |
45 | // Modicon TMS analog Outputs
46 | q_qxOUT_00: REAL; // ***
47 | q_qxOUT_01: REAL; // ***
48 | q_qxOUT_02: REAL; // ***
49 | q_qxOUT_03: REAL; // ***
50 |
51 | // Modicon TMS SLC100 safe digital Inputs
52 | q_ixSAFE_IN_00: BOOL; // Not-Halt Öffner
53 | q_ixSAFE_IN_01: BOOL; // Not-Halt Schlieder
54 | q_ixSAFE_IN_02: BOOL; // LV. OSSDI
55 | q_ixSAFE_IN_03: BOOL; // LV. OSSD2
56 |
57 | // Modicon TMS SLC100 safe digital Outputs
58 | q_qxSAFE_OUT_00: BOOL; // ***
59 | q_qxSAFE_OUT_01: BOOL; // ***
60 | q_qxSAFE_OUT_02: BOOL; // ***
61 | q_qxSAFE_OUT_03: BOOL; // ***
62 |
63 | // Release of the safety Outputs (required by the safety Controller)
64 | q_qxRelease_00: BOOL;
65 | q_qxRelease_01: BOOL;
66 | q_qxRelease_02: BOOL;
67 | q_qxRelease_03: BOOL;
68 |
69 | // Safety Variables
70 | bHardwareOK : BOOL; // Check if Safety Modules are working
71 | bError_Out : BOOL; // Error Status from Safety Blocks
72 | bEmergency : BOOL; // Emergency Stop Status
73 | bOSDI : BOOL; // Lightstatus
74 | bOSSD2 : BOOL; // Lightstatus
75 | END_VAR
76 |

```

Abbildung 27: Globale Variablenliste der E/A-Variablen

Nachfolgend wird das Mapping schrittweise für die Ein- und Ausgangsmodule der mit dem LMC verbundenen Modicon TM5 Geräte vorgenommen. Bei den zuzuordnenden Variablen handelt es sich um die im Datenmodell aufgelisteten Variablen. Dieses dient somit als Grundlage für die Zuweisung der Ein- und Ausgänge.

- Zuweisung der digitalen Eingänge des Modicon *TM5SDI16D* Modul:
1. Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) ->*BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SDI16D* (*TM5SDI16D*)
  2. Öffnen des Reiters *SERCOS III Module E/A-Abbild*

## 4.1 Implementationsphase

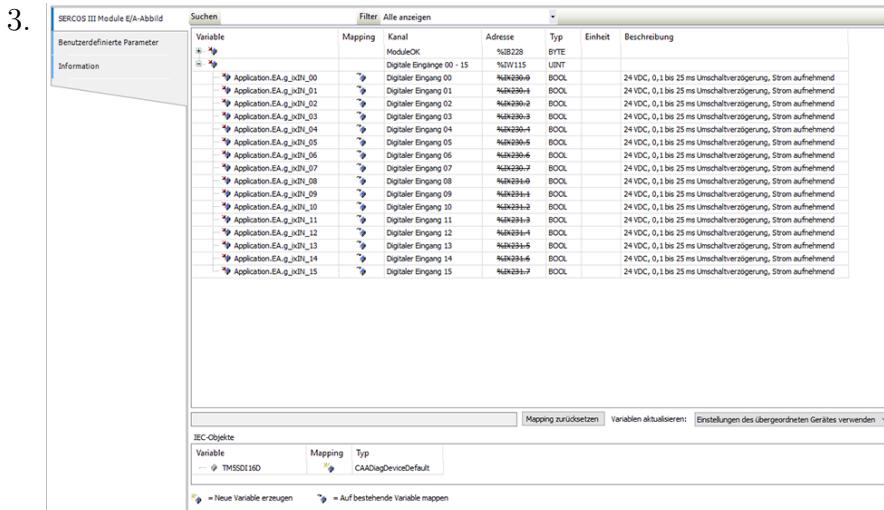


Abbildung 28: Zuweisung der digitalen Eingänge des TM5SDI16D Moduls

- Zuweisung der digitalen Ausgänge des Modicon *TM5SDO16T* Modul:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SDO16T* (*TM5SDO16T*)
- Öffnen des Reiters *SERCOS III Module E/A-Abbild*

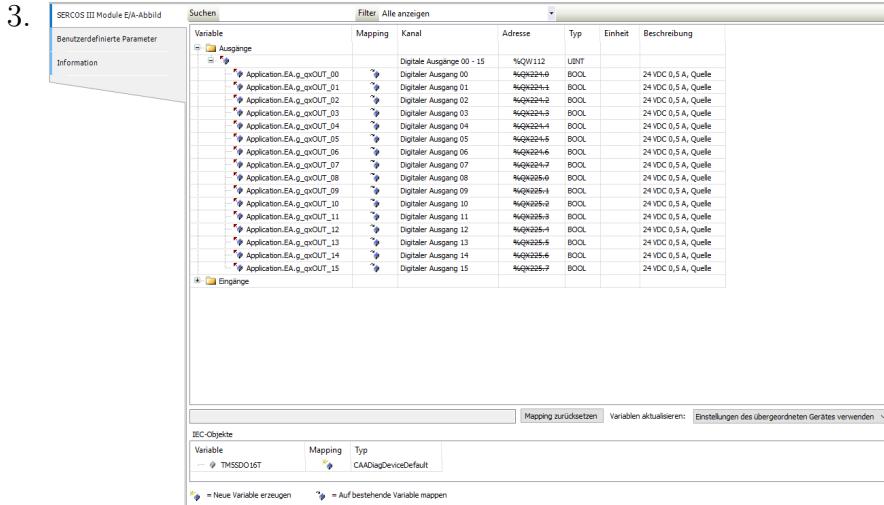


Abbildung 29: Zuweisung der digitalen Ausgänge des TM5SDO16T Moduls

- Zuweisung der sicheren digitalen Eingänge des Modicon *TM5SDI4DFS* Modul:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SDI4DFS*
- Öffnen des Reiters *TM5 Modul E/A-Abbild*

## 4.1 Implementationsphase

3.

TMS Modul E/A-Abbild						
	Suchen	Filter Alle anzeigen				
TMS Modul Parameter	Variable	Mapping	Kanal	Adresse	Typ	Einheit
Benutzerdefinierte Parameter	= Application.EA_g_qsSAFE_IN_00	"	SafeDigitalInput01	%I0:248	BYTE	
	= Application.EA_g_qsSAFE_IN_01	"	SafeDigitalInput02	%I0:249	BOOL	Sicherer digitaler Eingang 01 (24VDC)
	= Application.EA_g_qsSAFE_IN_02	"	SafeDigitalInput03	%I0:250	BOOL	Sicherer digitaler Eingang 02 (24VDC)
	= Application.EA_g_qsSAFE_IN_03	"	SafeDigitalInput04	%I0:251	BOOL	Sicherer digitaler Eingang 03 (24VDC)
			SafeDigitalInput05	%I0:252	BOOL	Sicherer digitaler Eingang 04 (24VDC)
			SafeDigitalInput06	%I0:253	BOOL	Zwei Kanalauswertung equivalent sicherer digitaler Eingang 01/02
			SafeDigitalInput07	%I0:254	BOOL	Zwei Kanalauswertung antivalent sicherer digitaler Eingang 01/02
			SafeDigitalInput08	%I0:255	BOOL	Zwei Kanalauswertung equivalent sicherer digitaler Eingang 03/04
			SafeDigitalInput09	%I0:256	BOOL	Zwei Kanalauswertung antivalent sicherer digitaler Eingang 03/04
			SafeDigitalInput10	%I0:257	BOOL	Zwei Kanalauswertung antivalent sicherer digitaler Eingang 03/04
			SafeDigitalInput11	%I0:258	BOOL	
			SafeDigitalInput12	%I0:259	BOOL	Status Kanal sicherer digitaler Eingang 02 (1=0Q)
			SafeDigitalInput13	%I0:260	BOOL	Status Kanal sicherer digitaler Eingang 03 (1=0Q)
			SafeDigitalInput14	%I0:261	BOOL	Status Kanal sicherer digitaler Eingang 04 (1=0Q)
			SafeDigitalInput15	%I0:262	BOOL	Status zwei Kanalauswertung equivalent sicherer digitaler Eingang 01/02
			SafeDigitalInput16	%I0:263	BOOL	Status zwei Kanalauswertung antivalent sicherer digitaler Eingang 01/02
			SafeDigitalInput17	%I0:264	BOOL	Status zwei Kanalauswertung equivalent sicherer digitaler Eingang 03/04
			SafeDigitalInput18	%I0:265	BOOL	Status zwei Kanalauswertung antivalent sicherer digitaler Eingang 03/04

IEC-Objekte

Variable	Mapping	Typ
M5SDO4DFS	CADaylightDeviceDefault	

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 30: Zuweisung der sicheren digitalen Eingänge des TM5SDI4DFS Moduls

- Zuweisung der sicheren digitalen Ausgänge des Modicon *TM5SDO4TFS* Modul:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SDO4TFS*
- Öffnen des Reiters *TM5 Modul E/A-Abbild*

3.

TMS Modul E/A-Abbild						
	Suchen	Filter Alle anzeigen				
TMS Modul Parameter	Variable	Mapping	Kanal	Adresse	Typ	Einheit
Benutzerdefinierte Parameter	= Application.EA_g_qsSAFE_OUT_00	"	SafeDigitalOutput1-4	%Q0:234	BYTE	Sicherer digitaler Ausgang 01 (Zustimmignal, 24VDC / 0.5A)
	= Application.EA_g_qsSAFE_OUT_01	"	SafeDigitalOutput01	%Q0:235	BOOL	Sicherer digitaler Ausgang 02 (Zustimmignal, 24VDC / 0.5A)
	= Application.EA_g_qsSAFE_OUT_02	"	SafeDigitalOutput02	%Q0:236	BOOL	Sicherer digitaler Ausgang 03 (Zustimmignal, 24VDC / 0.5A)
	= Application.EA_g_qsSAFE_OUT_03	"	SafeDigitalOutput03	%Q0:237	BOOL	Sicherer digitaler Ausgang 04 (Zustimmignal, 24VDC / 0.5A)
			Status Module	%I0:252	BOOL	

IEC-Objekte

Variable	Mapping	Typ
TM5SDO4TFS	CADaylightDeviceDefault	

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 31: Zuweisung der sicheren digitalen Ausgänge des TM5SDO4TFS Moduls

- Zuweisung der analogen Eingänge des Modicon *TM5SAI4L* Modul:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SAI4L*
- Öffnen des Reiters *TM5 Module E/A-Abbild*

3.

The screenshot shows the 'TMS Module E/A-Abbildung' configuration window. The main table lists analog inputs (Analogausgang) mapped to addresses %QW113 to %QW119. The table includes columns for Variable, Mapping, Kanal, Adresse, Typ, Einheit, and Beschreibung. Below the table, there is an IEC-Objekte section with a table for variable creation and mapping. Buttons for 'Mapping zurücksetzen', 'Variablen aktualisieren', and 'Einstellungen des übergeordneten Gerätes verwenden' are visible at the bottom.

Suchen							Filter	Alle anzeigen
Variable	Mapping	Kanal	Adresse	Typ	Einheit	Beschreibung		
% Application.EA_g_AIN_00		Status Eingang 00	%QB236	BYTE				
% Application.EA_g_AIN_01			%QB237	BYTE				
% Application.EA_g_AIN_02			%QD239#0	BOOL				
% Application.EA_g_AIN_03			%QD239#1	BOOL				
			%QD239#2	BOOL				
			%QD239#3	BOOL				
			%B1	BOOL				
			%B2	BOOL				
			%B3	BOOL				
			%B4	BOOL				
			%B5	BOOL				
			%B6	BOOL				
			%B7	BOOL				
		Analoginput 0-3	%W119					

IEC-Objekte		
Variable	Mapping	Typ
TMSSAI4L		CAADaqDeviceDefault

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 32: Zuweisung der analogen Eingänge des TM5SAI4L Moduls

- Zuweisung der analogen Ausgänge des Modicon *TM5SAO4L* Modul:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen des Moduls unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *BC\_TM5NS31* (*BC\_TM5NS31*) -> *TM5SAO4L*
- Öffnen des Reiters *TM5 Module E/A-Abbild*

3.

The screenshot shows the 'TMS Module E/A-Abbildung' configuration window. The main table lists analog outputs (Analogausgang) mapped to addresses %QW113 to %QW119. The table includes columns for Variable, Mapping, Ausgang, Adresse, Typ, Einheit, and Beschreibung. Below the table, there is an IEC-Objekte section with a table for variable creation and mapping. Buttons for 'Mapping zurücksetzen', 'Variablen aktualisieren', and 'Einstellungen des übergeordneten Gerätes verwenden' are visible at the bottom.

Suchen							Filter	Alle anzeigen
Variable	Mapping	Ausgang	Adresse	Typ	Einheit	Beschreibung		
% Application.EA_g_AOUT_00		Analogausgang 00	%QW113	INT		±10 V / 0 bis 20 mA, Auflösung 12 Bits		
% Application.EA_g_AOUT_01		Analogausgang 01	%QW114	INT		±10 V / 0 bis 20 mA, Auflösung 12 Bits		
% Application.EA_g_AOUT_02		Analogausgang 02	%QW115	INT		±10 V / 0 bis 20 mA, Auflösung 12 Bits		
% Application.EA_g_AOUT_03		Analogausgang 03	%QW116	INT		±10 V / 0 bis 20 mA, Auflösung 12 Bits		
		ModuleOK	%IB246	BYTE				

IEC-Objekte		
Variable	Mapping	Typ
TMSSAO4L		CAADaqDeviceDefault

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 33: Zuweisung der analogen Ausgänge des TM5SAO4L Moduls

- Zuweisung der Ein- bzw. Ausgänge der *SLC\_TM5CSLC* Sicherheitssteuerung für den Datenaustausch mit dem LMC:

- Im Gerätebaum öffnen der Geräteeinstellungen der Sicherheitssteuerung unter *Sercos\_Master* (*Sercos Master*) -> *SLC\_TM5CSLCx00FS* (*SLC\_TM5CSLCx00FS*)
- Öffnen des Reiters *E/A-Abbild*

3.

Parameter	Suchen	Filter	Alle anzeigen				
E/A-Abbildung	Variable	Mapping	Kanal	Adresse	Typ	Einheit	Beschreibung
Information	SLC2MC_BOOL			SLC2MC_BOOL0-7	%AB0	BYTE	
	Application.EA.bError_Out		Boo1	%AB0-9	BOOL		
	Application.EA.bHardwareOK		Boo2	%AB0-8	BOOL		
	Application.EA.bIOSSD1		Boo3	%AB0-7	BOOL		
	Application.EA.bIOSSD2		Boo4	%AB0-6	BOOL		
	Application.EA.bIOSSD3		Boo5	%AB0-5	BOOL		
	Application.EA.bIOSSD4		Boo6	%AB0-4	BOOL		
	Application.EA.bIOSSD5		Boo7	%AB0-3	BOOL		
	SLC2MC_BOOL0-15			SLC2MC_BOOL0-15	%AB0	BYTE	
	SLC2MC_BOOL16-23			SLC2MC_BOOL16-23	%AB2	BYTE	
	SLC2MC_BOOL24-31			SLC2MC_BOOL24-31	%AB3	BYTE	
	SLC2MC_BOOL32-39			SLC2MC_BOOL32-39	%AB4	BYTE	
	SLC2MC_BOOL40-47			SLC2MC_BOOL40-47	%AB5	BYTE	
	SLC2MC_BOOL48-55			SLC2MC_BOOL48-55	%AB6	BYTE	
	SLC2MC_BOOL56-63			SLC2MC_BOOL56-63	%AB7	BYTE	
	SLC2MC_BOOL64-71			SLC2MC_BOOL64-71	%AB8	BYTE	
	SLC2MC_BOOL72-79			SLC2MC_BOOL72-79	%AB9	BYTE	
	SLC2MC_BOOL80-87			SLC2MC_BOOL80-87	%AB10	BYTE	
	SLC2MC_BOOL88-95			SLC2MC_BOOL88-95	%AB11	BYTE	
	SLC2MC_BOOLExt						
	SLC2MC_INT						
	SLC2MC_LINT						
	UMC2SLC_BOOL						
	UMC2SLC_BOOLExt						
	UMC2SLC_INT						

IEC-Objekte

Variable	Mapping	Typ
SLC_TM5CSLCx00FS	SLC_PLC	

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 34: Zuweisung der Variablen für den Datentransfer vom SLC zum LMC

4.

Parameter	Suchen	Filter	Alle anzeigen				
E/A-Abbildung	Variable	Mapping	Kanal	Adresse	Typ	Einheit	Beschreibung
Information	SLC2MC_BOOL			UMC2SLC_BOOL0-7	%QB0	BYTE	
	SLC2MC_BOOLExt			Boo1	%QB0-9	BOOL	
	SLC2MC_INT			Boo2	%QB0-8	BOOL	
	SLC2MC_LINT			Boo3	%QB0-7	BOOL	
	UMC2SLC_BOOL			Boo4	%QB0-6	BOOL	
	UMC2SLC_BOOLExt			Boo5	%QB0-5	BOOL	
	UMC2SLC_INT			Boo6	%QB0-4	BOOL	
	UMC2SLC_BOOL7-15			UMC2SLC_BOOL7-15	%QB1	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL16-23			UMC2SLC_BOOL16-23	%QB2	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL24-31			UMC2SLC_BOOL24-31	%QB3	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL32-39			UMC2SLC_BOOL32-39	%QB4	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL40-47			UMC2SLC_BOOL40-47	%QB5	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL48-55			UMC2SLC_BOOL48-55	%QB6	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL56-63			UMC2SLC_BOOL56-63	%QB7	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL64-71			UMC2SLC_BOOL64-71	%QB8	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL72-79			UMC2SLC_BOOL72-79	%QB9	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL80-87			UMC2SLC_BOOL80-87	%QB10	BYTE	
	UMC2SLC_BOOL88-95			UMC2SLC_BOOL88-95	%QB11	BYTE	
	UMC2SLC_BOOLExt						
	UMC2SLC_INT						

IEC-Objekte

Variable	Mapping	Typ
SLC_TM5CSLCx00FS	SLC_PLC	

= Neue Variable erzeugen    = Auf bestehende Variable mappen

Abbildung 35: Zuweisung der Variablen für den Datentransfer vom LMC zum SLC

Für die Nutzung der beiden Achsen des Systems muss die **Parametrierung und die Inbetriebnahme des Servoreglers** vorgenommen werden. Physisch gesehen handelt es sich zwar um ein Gerät, dass zwei Servoantriebe betreiben kann, in der Konfiguration im Programm werden die x-Achse und die z-Achse jedoch separat in Betrieb genommen. Die Parametrierung und die Inbetriebnahme erfolgt für beide Achsen analog, da es sich bei beiden um die selben Motoren handelt, die in der selben Konfiguration genutzt werden. Zunächst müssen einige physikalische Daten der beiden Achsen und deren zugehörigen Hardwarekomponenten in der Geräteparametrierung aufgenommen werden:

1. Im Projektbaum öffnen der Datei *Application -> TemplateFullProgrammingFramework -> EquipmentModules -> SR\_BravoModule (PRG) -> Init\_Slave1*
2. Bis zum Kommentar **\*\*\*Manual\*\*\*** scrollen (Zeile 171)

3. **\*\*\* Manual \*\*\***

```

stSlaveInterface.stManual.i_lrVel           := 50.0;      (* Velocity in units/s *)
stSlaveInterface.stManual.i_lrAcc          := 10.0;      (* Acceleration in units/s^2 *)
stSlaveInterface.stManual.i_lrDec          := 1000.0;    (* Deceleration in units/s^2 *)
stSlaveInterface.stManual.i_lrJerk         := 1000.0;    (* Jerk in units/s^3 *)
stSlaveInterface.stManual.i_lrMaxDistance  := 120.0;     (* Max pathlengths for one step in units *)
stSlaveInterface.stManual.i_xEndless       := FALSE;     (* TRUE: jogging endless. Position between the periods *)
stSlaveInterface.stManual.i_lrPeriod        := 360.0;     (* Period of the axis *)

```

Abbildung 36: Einstellen der Bewegungsparameter für langsame manuelle Testfahrt

rVel gibt die Geschwindigkeit in mm/s an, rAcc die Beschleunigung in mm/s<sup>2</sup> und rDec die negative Beschleunigung mm/s<sup>2</sup>.

4. Im Projektbaum öffnen der Gerätedatei *Sercos\_Master (Sercos Master) -> DRV\_Slave1*

5.

Motor					
MotorType	STRING(20)	=	=	Mot	
MotorTypePlateVersion	STRING(20)	=	=	Vers	
PartNumberMotor	STRING(20)	=	=	Serv	
SerialNumberMotor	STRING(20)	=	=	Serv	
NominalSpeed	LREAL			UPM	Nenn
MaxSpeed	REAL			UPM	Max
TorqueConstant	LREAL			Nm/A	Dreh
MotorInertia	LREAL			kg*cm^2	Rot
MotorClass	Enumeration of DINT	Synchronmotor / 0	Synchronmotor / 0		Moto
BrakeIntegrated	Enumeration of BOOL				Brem
BrakePowerOffBehaviour	Enumeration of BOOL				Verf
BrakeState	Enumeration of BOOL				Brem
BrakeMode	Enumeration of DINT	Bremse beim Austrüdeln koppeln / 1	Bremse beim Austrüdeln koppeln / 1		Betr
BrakeDisconnectionTime	DINT(0..1000)	0	0 ms	0 ms	Verk
BrakeCouplingTime	DINT(0..1000)	0	0 ms	0 ms	Klem
MotorConnectionTest	Enumeration of BOOL	ein / 1	ein / 1		Pruf
MotorCommutationMode	Enumeration of DINT	minimale Bewegung / 1	minimale Bewegung / 1		Mod
MotorCommutationControl	Enumeration of DINT	aus / 0	aus / 0		Aktiv
MotorCommutationState	Enumeration of DINT	Motor ist nicht kommutiert / 0	Motor ist nicht kommutiert / 0		Zust
MotorTemperatureMonitoring	Enumeration of DINT	Thermisches Modell / 1	Sensor / 2		Betr

Abbildung 37: Parametrierung des Motors für die x-Achse

Der Wert *MotorTemperatureMonitoring* wurde zur Temperaturüberwachung des Servomotors auf *Thermisches Modell* gesetzt.

6.

Mechanik					
GearIn	DINT(1..999999)	1	1	Getr	
GearOut	DINT(1..999999)	1	1	Getr	
Direction	Enumeration of BOOL	rechts / 1	rechts / 1	Dreh	
FeederConstant	LREAL(0.01..999999.999)	188.4	360 Einheiten/Umdrehung	Vors	
J_Load	REAL(0..1000000000)	0.8588329916751	0.0 kg*cm^2	Last	
J_Gear	REAL(0..1000)	0.0	0.0 kg*cm^2	Träg	
StaticFriction	REAL(0..1000)	0.0	0.0 Nm	Stat	
ViscousFriction	REAL(0..100000)	0.0	0.0 Nm / (1000 Einheiten/s)	Visk	

Abbildung 38: Parametrierung der Mechanik für die x-Achse

Der Wert *Direction* gibt den Drehsinn des Servomotors an. Die Einstellung *rechts / 1* bedeutet, dass bei der Bedienung des Motors über die Steuerungsvisualisierung die Eingabe *Jog+* zu einer Bewegung der Achse nach links führt. Der Wert *FeederConstant*

muss selbst berechnet werden aus dem Motordurchmesser ( $\pi * M60\text{mm}$ ). Der *JLoad* Wert gibt das Lastenträgheitsmoment in  $\text{kg} * \text{cm}^2$  an. Der einzusetzende Wert kann über die Software *MachineExpert MotionBuilder* bestimmt werden.

Die gleichen Schritte müssen für die z-Achse analog zu der obigen Beschreibung durchgeführt werden.

Für den sicheren Betrieb der Achsen ist es erforderlich im *MotionTemplateFull* Programmänderungen vorzunehmen, damit die Achsen bei den Endlagesensoren des Positioniersystems stoppen und nicht darüber hinaus bewegt werden können. Folgende Schritte sind dazu nötig:

1. Im Projektbaum öffnen der Datei *Application -> TemplateFullProgrammingFramework -> EquipmentModules -> SR\_BravoModule (PRG) -> SubModules\_Action*
2. Bis zum Abschnitt 3 Scrollen und diesen auskommentieren oder löschen
3. Abschnitt 4 (beinhaltet den Funktionsbaustein und Variablenzuweisungen für den *DRV\_Slave2* bzw. die z-Achse) kopieren und wieder einfügen (duplicieren)
4. Die Kopie editieren, sodass an jeder Stelle, wo *DRV\_Slave2* aufgeführt ist nun *DRV\_Slave1* steht
- 5.

```

4 (* End of system generated code, could be modified for your application *)
fbSlave1Module
FB_AxisModuleExtIfc
astSubModuleInterface[c_udisSlave1].i_xEnable -- i_xEnable
stSlave1Interface.stManual.i_xJogForw -- i_xJogForw
stSlave1Interface.stManual.i_xJogBack -- i_xJogBack
stSlave1Interface.stMain.i_xHwLimitPos -- i_xHwLimitPos
stSlave1Interface.stMain.i_xHwLimitNeg -- i_xHwLimitNeg
astSubModuleInterface[c_udisSlave1].iq_diCmd -- iq_diCmd
astSubModuleInterface[c_udisSlave1] -- iq_stStandardModuleItf
iq_stExceptionList -- iq_stExceptionList
iq_stLogDataList -- iq_stLogDataList
stSlave1Interface -- iq_stAxisModuleItf
q_xActive
q_xReady
q_etDiag
q_etDiagExt
q_sMsg
q_xCmdActive
q_xCmdDone
q_xDriveActive
q_xHomeOk
q_xSynchron
q_lrPosition
q_lrPositionX

5 (* End of system generated code, could be modified for your application *)
fbSlave2Module
FB_AxisModuleExtIfc
astSubModuleInterface[c_udisSlave2].i_xEnable -- i_xEnable
stSlave2Interface.stManual.i_xJogForw -- i_xJogForw
stSlave2Interface.stManual.i_xJogBack -- i_xJogBack
stSlave2Interface.stMain.i_xHwLimitPos -- i_xHwLimitPos
stSlave2Interface.stMain.i_xHwLimitNeg -- i_xHwLimitNeg
astSubModuleInterface[c_udisSlave2].iq_diCmd -- iq_diCmd
astSubModuleInterface[c_udisSlave2] -- iq_stStandardModuleItf
iq_stExceptionList -- iq_stExceptionList
iq_stLogDataList -- iq_stLogDataList
stSlave2Interface -- iq_stAxisModuleItf
q_xActive
q_xReady
q_etDiag
q_etDiagExt
q_sMsg
q_xCmdActive
q_xCmdDone
q_xDriveActive
q_xHomeOk
q_xSynchron
q_lrPosition
q_lrPositionX

```

Abbildung 39: Einbinden der Endlagesensoren

Sowohl für den *DRV\_Slave1* als auch den *DRV\_Slave2* die globalen Variablen für die Endlagesensoren an den Stellen *i\_xHwLimitPos* bzw. *i\_xHwLimitNeg* einsetzen.

Im nächsten Schritt wird die **Parametrierung und Inbetriebnahme des Netzteils** durchgeführt. Dafür muss zunächst wieder eine Hardwareparametrierung nach folgenden Schritten vorgenommen werden:

1. Im Projektbaum öffnen der Gerätedatei *Sercos\_Master (Sercos Master) -> PSM\_PowerSupply*

Allgemeines und Status	DINT			
DiagClass	DINT			Diagnoseklasse (AD)[0x00CD]
DiagCode	DINT			Diagnosenummer (AD)[0x0001]
DiagSource				Diagnosequelle (AD)[0x00CE]
udiType	UDINT	0	0	Diagnosetext (AD)[0x0003]
udiInstance	UDINT	0	0	Erweiterte Diagnosemeldung (AD)
udiParameterId	UDINT	0	0	Leistungsversorgung-Überwachung
DiagMsg	STRING(39)	=	=	Status der Leistungsversorgung-I
DiagExtMsg	STRING(14)	=	=	Phasenüberwachungsmodus (EP)
PowerSupplyCheckSet	Enumeration of BOOL	aus / 0	aus / 0	Netzspannung (ES)[0x0000]
PowerSupplyCheck	Enumeration of BOOL			Bremswiderstand Modus (EP)[0]
PhaseCheckMode	Enumeration of DINT	Dreiphasige Überwachung / 2	Dreiphasige Überwachung / 2	Betriebsbereit (AD)[0x0008]
MainsVoltageMode	Enumeration of DINT	400V / 2	400V / 2	Betriebszustand (Netzteil und Anl)
BrakingResistorMode	Enumeration of DINT	400V Modus / 1	400V Modus / 1	Bereit für Auftragsbearbeitung
Ready	Enumeration of BOOL			Gerätezustand (AS)[0x0010]
GroupState	Enumeration of DINT	Initialisierung / 0	Initialisierung / 0	Überlast des Netzteils (AS)[0x0011]
GroupReady	Enumeration of BOOL			Temperatur der Steuerplatine (A)
InternalDeviceState	Enumeration of DINT	Initialisierung / 0	Initialisierung / 0	Temperatur der Gleichrichters (A)
PowerSupplyOverload	INT		%	
AutoDischarge	Enumeration of BOOL	Aktiviere automatische Entladung / 1	Aktiviere automatische Entladung / 1	
ControlBoardTemp	INT(-10..150)	0	0   °C	
RectifierTemp	INT(-10..150)	0	0   °C	

Abbildung 40: Konfiguration des Netzteils

Der *PhaseCheckerMode* muss auf *Dreiphasige Überwachung / 2* eingestellt werden, da das Netzteil dreiphasig angeschlossen und genutzt wird. Der *MainsVoltageMode* wird gesetzt auf *400V / 2* und der *BrakingResistorMode* wird ebenfalls gesetzt auf *400V Modus / 1*. Diese Werte ergeben sich ebenfalls aus dem dreiphasigen Anschluss des Netzteils.

Je nachdem, ob bei der Verdrahtung ein Netzschütz verbaut oder diese weggelassen wurde, müssen nun weitere Programmänderungen am *MotionTemplateFull* vorgenommen werden. An erster Stelle wird erklärt, wie ohne ein Netzschütz vorgegangen werden muss:

1. Im Projektbaum öffnen der Datei *Application -> TemplateFullProgrammingFramework -> TaskCalls -> SR\_MainMachine (PRG) -> Input\_Action*

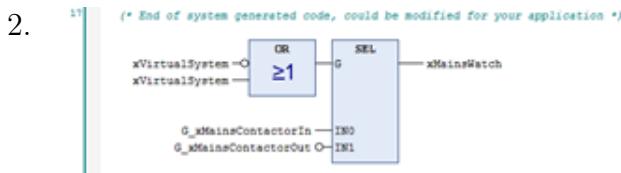


Abbildung 41: Deaktivierung der Netzüberwachung

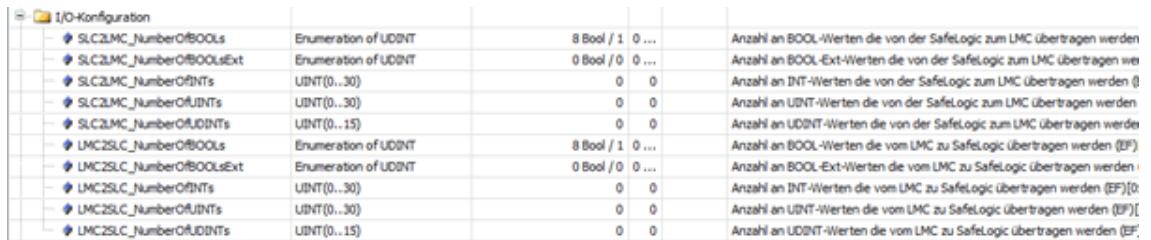
Das Netzwerk in Abschnitt 17 muss erweitert werden um einen *OR-Funktionsbaustein*, zu dem die Eingangsvariable *xVirtualSystem* einmal negiert und einmal nicht-negiert zugewiesen wird. Diese Änderung deaktiviert die Netzüberwachung. Grundsätzlich sollte dieser Weg nicht gewählt und ein Netzschatz verbaut werden.

Bei der Verwendung eines Netzschatzes sollte wie folgt vorgegangen werden:

1. Mappen der Eingangsvariablen am LMC für die Netzschatzrückmeldung
2. Im Projektbaum öffnen der Datei *Application -> TemplateFullProgrammingFramework -> TaskCalls -> SR\_MainMachine (PRG) -> Input\_Action*
3. Zuweisen der globalen Variablen für *G\_xMainsContactorIn* und *G\_xMainsContactorOut*

Im nächsten Schritt der Software-Implementation findet die **Implementation der funktionalen Sicherheit** statt. Dazu wird zunächst der Safety Logic Controller (SLC) konfiguriert:

1. Im Projektbaum öffnen der Gerätedatei *Sercos\_Master (Sercos Master) -> SLC\_TM5CSLCx00FS (TM5CSLCx00FS)*

2. 

I/O-Konfiguration				
SLC2LMC_NumberOfBOOLs	Enumeration of UDINT	8 Bool / 1 0 ...	Anzahl an BOOL-Werten die von der SafeLogic zum LMC übertragen werden	
SLC2LMC_NumberOfBOOLsExt	Enumeration of UDINT	0 Bool / 0 0 ...	Anzahl an BOOL-Ext-Werten die von der SafeLogic zum LMC übertragen werden	
SLC2LMC_NumberOfINTs	UINT(0..30)	0 0	Anzahl an INT-Werten die von der SafeLogic zum LMC übertragen werden (0)	
SLC2LMC_NumberOfUINTs	UINT(0..30)	0 0	Anzahl an UINT-Werten die von der SafeLogic zum LMC übertragen werden	
SLC2LMC_NumberOfUDINTs	UINT(0..15)	0 0	Anzahl an UDINT-Werten die von der SafeLogic zum LMC übertragen werden	
LMC2SLC_NumberOfBOOLs	Enumeration of UDINT	8 Bool / 1 0 ...	Anzahl an BOOL-Werten die vom LMC zu SafeLogic übertragen werden (EF)	
LMC2SLC_NumberOfBOOLsExt	Enumeration of UDINT	0 Bool / 0 0 ...	Anzahl an BOOL-Ext-Werten die vom LMC zu SafeLogic übertragen werden	
LMC2SLC_NumberOfINTs	UINT(0..30)	0 0	Anzahl an INT-Werten die vom LMC zu SafeLogic übertragen werden (EF)[0]	
LMC2SLC_NumberOfUINTs	UINT(0..30)	0 0	Anzahl an UINT-Werten die vom LMC zu SafeLogic übertragen werden (EF)[0]	
LMC2SLC_NumberOfUDINTs	UINT(0..15)	0 0	Anzahl an UDINT-Werten die vom LMC zu SafeLogic übertragen werden (EF)[0]	

Abbildung 42: I/O-Konfiguration des SLC

Der Wert *SLC2LMC\_NumberOfBOOLs* muss auf *8 Bool / 1* gesetzt werden, sodass bis zu 8 Bool-Werte vom Safety Logic Controller an den LMC übertragen werden können. Analog muss der Wert *LMC2SLC\_NumberOfBOOLs* auf *8 Bool / 1* gesetzt werden, dass bis zu 8 Bool Werte vom **LMC!** an den **SLC!** gesendet werden können.

3. Mapping der neu verfügbaren E/A-Variablen von bzw. zu dem SLC (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35)

Anschließend kann das Programm für die Software-Implementation der funktionalen Sicherheit geschrieben werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

1. Im Projektbaum Rechtsklick auf *Sercos\_Master (Sercos Master) -> SLC\_TM5CSLCx00FS (TM5CSLCx00FS)*

2. Im sich geöffneten Menü den Punkt *SoSafe -> SoSafe Programmable starten* auswählen
3. Zunächst muss sowohl ein Passwort für die Entwicklung und die Inbetriebnahme des Sicherheitsprogramms festgelegt werden. In dem der Arbeit beigefügten Programm ist das Passwort admin1 für sowohl die Entwicklung als auch die Inbetriebnahme festgelegt worden.
4. Es müssen im sich nun geöffneten Dialogfenster alle Module (drei Module) per Checkbox ausgewählt werden
5. Nun kann mit der Programmierung der Sicherheitsfunktionalitäten begonnen werden in der Funktionsbausteinsprache (FUP) nach IEC 61131-3

6.

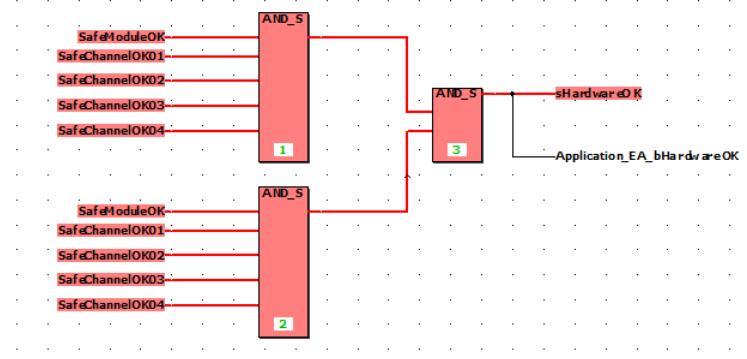


Abbildung 43: Hardwareprüfung der sicheren E/A-Module

Die sichere Variable *sHardwareOK* wird auf den Wert **TRUE** gesetzt, wenn sowohl die beiden E/A-Module keine Hardwarefehler aufweisen und die Verdrahtung der Eingänge und Ausgänge korrekt ist. Weiterhin wird der Wert über die Variable *Application\_EA\_bHardwareOK* auch an den LMC weitergeleitet, um im Hauptprogramm genutzt zu werden (z. B. für die Ausgabe über OPC UA).

7.

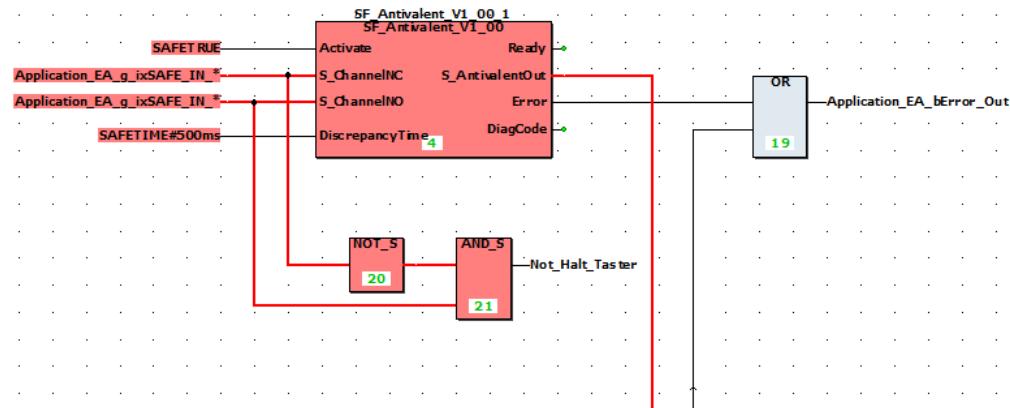


Abbildung 44: Sicherer SF\_Antivalent Funktionsbaustein für die Verarbeitung der Not-Halt-Auslösung

Bei dem sicheren Funktionsbaustein **SF\_Antivalent\_V1\_00\_1** handelt es sich um einen Baustein, der die beiden antivalenten Eingänge für die Not-Halt-Taster Auslösung verarbeitet. Ist die Variable **Application\_EA\_g\_ixSafe\_IN\_01 FALSE** und die Variable **Application\_EA\_g\_ixSafe\_IN\_00 TRUE**, so schaltet der Ausgang **S\_AntivalentOut** auf **TRUE**. Der Wert des Ausgangs wird im nächsten Bild weiterverarbeitet. Für die Weitergabe des gleichen Wertes an den LMC wird der Baustein nicht benötigt und die beiden Eingänge können per **AND\_S**-Baustein verundet werden (unter Berücksichtigung, dass der Eingang **Application\_EA\_g\_ixSafe\_IN\_01** negiert werden muss). Der **Error** Ausgang kann auch verbunden und die Information an den LMC weitergegeben werden in der Variable **Application\_EA\_bError\_Out**.

8.

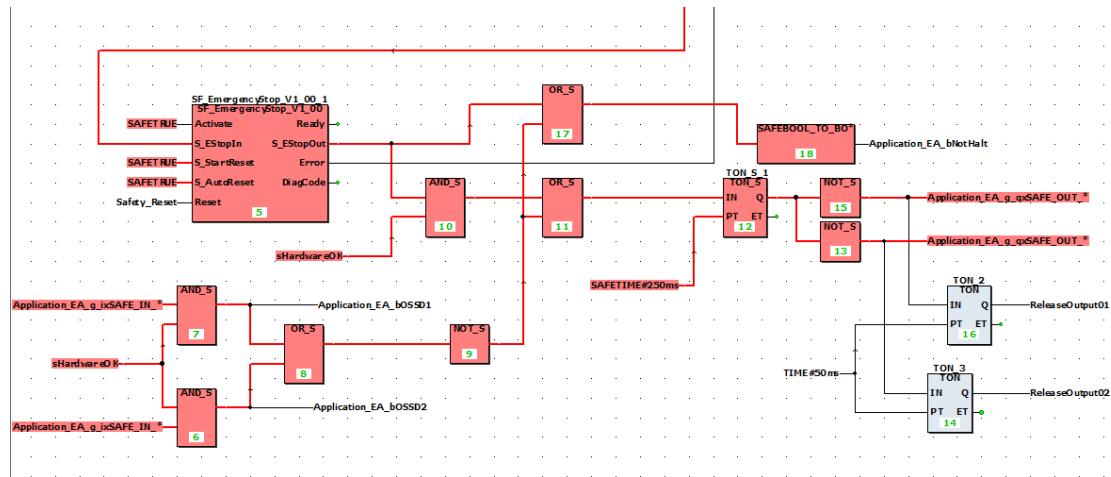


Abbildung 45: Verarbeitung des Not-Halt-Signals und der Lichtvorhangssignale

9. Zunächst wird der sichere Funktionsbaustein *SF\_EmergencyStop\_V1\_00\_1* hinzugefügt. In den Eingang *S\_EStopIn* wird das Ausgangssignal des Antivalent-Funktionsbausteins gelegt. Wird der Not-Halt aktiviert, schaltet der Ausgang *S\_EStopOut* des Bausteins auf **TRUE**. Über den *Reset*-Eingang muss der Baustein wieder freigegeben werden, sodass der Ausgang wieder auf **FALSE** umschaltet. Auf den Reset-Eingang wird die Variable *>Safety\_Reset* gelegt, die vom LMC an den SLC weitergeleitet wird. Somit kann durch das Auslösen des Hardware Reset-Tasters am LMC der Funktionsbaustein wieder freigegeben bzw. zurückgesetzt werden. Die Eingänge *S\_StartReset* und *S\_AutoReset* sollten auf **SAFEFALSE** gesetzt werden. Im Bild ist jedoch vorerst zu erkennen, dass die Werte auf **SAFETRUE** gesetzt sind, da zum Testen des Sicherheitsprogramms ein automatisches Zurücksetzen das Drücken des Reset-Tasters hinfällig macht und somit Zeit spart.
10. Anschließend werden die beiden sicheren Eingänge *Application\_EA\_g\_ixSafe\_IN\_02* und *Application\_EA\_g\_ixSafe\_IN\_03* verarbeitet. Dabei handelt es sich um den Lichtvorhang (OSSD1 und OSSD2). Die beiden Eingänge müssen jeweils verundet werden mit der Variable *bHardwareOK*. Ist eines der beiden Signale des Lichtvorhangs **FALSE**, so muss der Ausgang, dessen Signal später mit dem Not-Halt-Signal verodert wird **TRUE** sein (umgesetzt durch ein *S\_ODER*- und ein *S\_Not*-Baustein).
11. Wie bereits im vorherigen Schritt angedeutet wird nun das Ausgangssignal der LichtvorhangSchaltung mit dem Ausgang der Not-Halt-Schaltung verodert. Wichtig ist, dass das Not-Halt-Signal auch mit dem Wert der Variablen *sHardwareOK* verundet wird, um Hardwarefehler auszuschließen.
12. Im nächsten Schritt wird das Not-Halt-Signal zu einem nicht-sicheren Bool-Wert umgewandelt, welcher über die Variable *Application\_EA\_bNotHalt* an den LMC übergeben wird.
13. Der letzte Schritt in der Programmierung des Sicherheitsprogrammes ist das setzen der Ausgänge des SLC. Wichtig ist zu beachten, dass die Ausgänge mit dem *InverterEnable*-Eingang des Servoreglers (LXM 62D) verbunden sind. Nehmen die Ausgänge den Wert **FALSE** an, schaltet der Servoregler ab. Das soll dann passieren, wenn der Not-Halt ausgelöst bzw. der Lichtvorhang durchbrochen wurde. Jedoch ist es notwendig, dass die Motoren zunächst angehalten haben, bevor der Regler abgeschaltet wird, da sonst bei zu frühem Abschalten des Reglers der Bremsvorgang nicht fortgesetzt wird und die beiden Achsen des Positioniersystems austrudeln würden. Dies könnte dafür sorgen, dass die Schlitten auf den Achsen über die Endlagen hinausrutschen und Beschädigungen an der Anlage verursachen. Deshalb wird über ein *S\_TON*-Baustein die Abschaltung der Ausgänge um 250ms verzögert. In Abbildung 45 ist zu erkennen, dass zwei weitere nicht-sichere TONs genutzt wurden. Diese sind für das Lösen der Ausgänge nach einem Signalwechsel zuständig. Es handelt sich

dabei um eine Sicherheitsmaßnahme, so das Ausgänge nach Wertänderung immer gesteuert wieder freigegeben werden.

Nachdem nun das Sicherheitsprogramm komplettiert ist, kann die SoSafe Programmable Umgebung wieder verlassen werden. Abschließend muss eine letzte Änderung am *MotionTemplateFull* vorgenommen werden, um den Not-Halt auch auf LMC-Seite zu implementieren. Dazu sind folgende Schritte nötig:

1. Im Projektbaum öffnen der Datei *Application -> TemplateFullProgrammingFramework -> TaskCalls -> SR\_HWCOPYIO*



Abbildung 46: Zuweisung der Not-Halt-Variable im LMC

Der internen Variable *G\_xEmergencyIn* wird die Not-Halt-Ausgangsvariable aus dem SLC zugewiesen. Nun bekommt auch das *MotionTemplateFull* das reale Not-Halt-Signal zur Verfügung gestellt und kann dieses verarbeiten (z. B. für den Software-Not-Halt-Reset aus der Steuerungsvisualisierung).

Der letzte Schritt der Software Implementation ist die Einrichtung des LMC400c sowie der Wago PFC200 Steuerung für die Nutzung als OPC UA Server. Dabei sind die Schritte für beide Steuerungen identisch. Es unterscheiden sich lediglich die Daten, die über OPC kommuniziert werden können. Der LMC soll vor allem Positionsdaten und für die Positionierung relevante Daten bereitstellen können, als auch lesen. Die Wago-Steuerung ist verantwortlich für die Messung von Verbrauchswerten des Systems, wie der benötigte Strom oder die Leistungsaufnahme. Diese Daten werden über den Wago OPC Server bereitgestellt. Für die Implementierung der OPC Funktionalität werden auf beiden Steuerungen folgende Schritte durchgeführt:

1. Es wird eine weitere globale Variabelliste angelegt, die alle Variablen enthält, die per OPC versendet bzw. empfangen werden sollen.
2. Im Hauptprogramm werden die globalen Variablen mit den Werten der relevanten Variablen im Programm gefüllt.
3. Im nächsten Schritt wird eine Symbolkonfiguration angelegt unter Beachtung der Auswahl der Checkbox für die OPC Kompatibilität.

4. Zunächst wird die Symbolkonfiguration einmal gebaut per Button in der oberen Leiste.
5. Anschließend wird die neu erstellte Variablenliste per Haken selektiert.
6. Nach erneutem Bauen und der Übertragung des Programmes ist die OPC Kommunikation betriebsbereit

Mit Fertigstellung der Software-Implementation der funktionalen Sicherheit ist die Implementierung sämtlicher Modelle aus der Projektierungs- bzw. Modellierungsphase abgeschlossen. Anschließend gilt es die Anforderungen an das System mithilfe der Testkriterien zu diesen zu überprüfen, um sicherzustellen, dass die nun implementierten Funktionalitäten die Anforderungen erfüllen.

## 4.2 Verifizierung der Testspezifikation

Nachdem im Unterabschnitt 3.5 alle Testfälle zu den aus der Anforderungsanalyse ermittelten Testspezifikationen modelliert wurden, müssen diese nun durchgeführt und in einem Testprotokoll dokumentiert werden.

Aus den Vorgehensweisen der einzelnen Testfälle sind bereits verschiedene Methoden zur Prüfung der Testspezifikationen zu erkennen. Das Vorgehen unterscheidet sich in der Komplexität der Durchführung. Aus den Testabläufen ist bereits zu erkennen, dass die Durchführung und Bestätigung grundlegender Testfälle Voraussetzung für nachfolgende Testdurchführungen ist.

Es ergibt sich eine methodische Abfolge, die in der Abbildung 47 dargestellt ist.

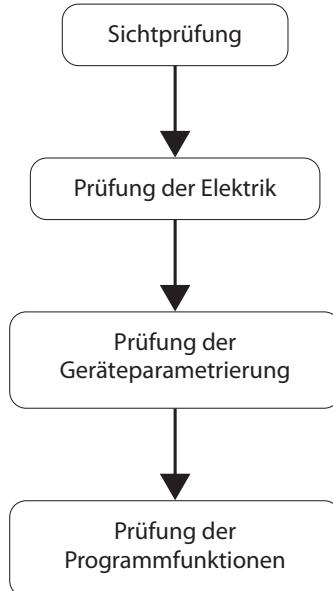


Abbildung 47: Ablauf zur schrittweisen Verifizierung der Testspezifikationen

Die Protokollierung der Tests erfolgt nach der vorgenommenen Einteilung des dargestellten Diagrammes. Die einzelnen Punkte werden in den nachfolgenden Unterabschnitten abgearbeitet. Erneut kommt eine tabellarische Darstellung zum Einsatz, in der einzelne Testfälle mit den Schlüsselwörtern **bestanden**, **nicht bestanden** und **nicht getestet** protokolliert werden. Nicht durchgeführte Tests müssen nachgeholt werden. Ist ein Testfall nicht bestanden, so wird im anschließenden Unterkapitel die Korrektur der Implementierung diskutiert.

### 4.2.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung stellt den ersten Schritt in der Verifizierung der Testspezifikationen dar. Ziel ist es die Laboranlage durch eine visuelle Inspektion auf das Vorhandensein von allen geforderten Hardwarekomponenten zu untersuchen. Der durchgeführte Test bezieht sich dabei auf den Testfall *TF\_01* (siehe Tabelle 36). Die protokollierten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Steuerung LMC 400c wurde verbaut	bestanden
2	Netzteil LXM 62P wurde verbaut	bestanden
3	Servoregler LXM 62D wurde verbaut	bestanden
4	Steuerung Wago PFC200 wurde verbaut	bestanden
5	Sicherheitssteuerung SLC 100 wurde verbaut	bestanden
6	Modicon TM5 digitales Eingangsmodul wurde verbaut	bestanden
7	Modicon TM5 digitales Ausgangsmodul wurde verbaut	bestanden
8	Modicon TM5 analoges Eingangsmodul wurde verbaut	bestanden
9	Modicon TM5 analoges Ausgangsmodul wurde verbaut	bestanden
10	Modicon TM5 SERCOS III Bus-Interface wurde verbaut	bestanden
11	Wago Leistungsklemme wurde verbaut	bestanden
12	Ethernetswitch wurde verbaut	bestanden
13	Vier Endlagesensoren wurden verbaut	bestanden
14	Zwei Not-Halt Taster wurden verbaut	bestanden
15	XUS Lichtvorhang wurde verbaut	bestanden

16	Ampel (rot/grün) wurde verbaut	bestanden
17	Schalschrank an Gehäuse montiert	bestanden
18	Schalschrankforderseite besitzt geforderte Bedienelemente	bestanden
19	Seiten des Gehäuses sind mit Plexiglasscheiben	nicht bestanden
20	Kabel an den beweglichen Achsen sind in E-Ketten verlegt	bestanden
21	Die Laboranlage besitzt zwei bewegliche Achsen (x/z)	bestanden
22	An jeder Achse ist ein Servomotor verbaut	bestanden
23	Die z-Achse besitzt einen Greifarm	nicht bestanden
24	Am Greifarm ist ein Greifer montiert	nicht bestanden
25	24 V-Ebene ist über einen Leitungsschutzschalter abgesichert	bestanden
26	400 V-Ebene ist über einen Leitungsschutzschalter abgesichert	bestanden
27	Es wurde ein Netzschütz verbaut	nicht bestanden
28	Es wurde eine Netzdrossel verbaut	nicht bestanden

Tabelle 55: Testprotokoll - Sichtprüfung des mehrachsigen Positioniersystems

#### 4.2.2 Prüfung der Elektrik

Nach Abschließen der Sichtprüfung des Systems kann mit der Prüfung der Elektronik fortgesetzt werden. Konkret soll über die nachfolgende Testung sichergestellt werden, dass alle Steuerungskomponenten sowie Sensoren und Aktuatoren richtig verdrahtet sind und eingesetzt werden können. Dazu wird der Testfall *TF\_02* herangezogen (siehe Tabelle 37). Die durch die Nichterfüllung des ersten Testfalls betroffenen Testkriterien werden im Feld *Ergebnis* frei gelassen.

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	LMC400c fährt nach Einschalten des Systems über den Hauptschalter hoch	bestanden
2	Wago PFC200 fährt nach Einschalten des Systems über den Hauptschalter hoch	bestanden
3	Status-LED des Netzteils LXM 62P aktiv	bestanden
4	Power-LED des Netzteils LXM 62P aktiv	bestanden
5	Status-LED des Servoreglers LXM 62D aktiv	bestanden
6	Power-LED des SLC100 aktiv	bestanden
7	Power-LED des Modicon TM5 Bus Interface aktiv	bestanden
8	LEDs der Modicon TM5 E/A-Module aktiv	bestanden
9	Ready-Relais-Output des Netzteils mit Netzschütz verdrahtet	—
10	Netzschütz schaltet 400 V Spannungsversorgung des Netzteils	—
11	Initiatorklemmen der Endlagesensoren leuchten im nicht geschalteten Zustand	bestanden
12	Initiatorklemmen des Lichtvorhangs leuchten im nicht ausgelösten Zustand	bestanden
13	LEDs der Not-Halt Sicherheitseingänge leuchten anti- valent	bestanden
14	Initiatorklemmen der Bedienelemente leuchten entsprechend des Schaltzustandes	nicht bestanden
15	Leitungsschutzschalter für 400 V-Ebene kann diese schalten	bestanden

16	Leitungsschutzschalter für 24 V-Ebene kann diese schalten	bestanden
17	Iverter-Enable Eingang des Servoreglers LXM 62D ist mit dem ersten Sicherheitsausgang verdrahtet	bestanden
18	Netzdrossel ist in 400 V-Ebene verdrahtet	—

Tabelle 56: Testprotokoll - Prüfung der Verdrahtung des Systems

#### 4.2.3 Prüfung der Geräteparametrierung

Bevor konkrete Funktionen verifiziert werden können, müssen zunächst die eingestellten Geräteparameter geprüft werden. Dabei wird Bezug genommen auf den Testfall *TF\_03* (Siehe Tabelle 38). Die Nichterfüllung voraussetzender Testkriterien führt auch in dieser Tabelle zu der Freilassung des Ergebnisfeldes. Die Überprüfung und Verifizierung der Geräteparameter erfolgt in der Software *MachineExpert LogicBuilder*. Sämtliche zu treffende Einstellungen sind Voraussetzung für die korrekte Inbetriebnahme. Ist ein Testkriterium nicht erfüllt, da eine Systemkomponente nicht vorhanden ist oder Änderungen am Aufbau der Anlage vorgenommen wurden, muss die Parametrierung angepasst werden, sodass der Testfall zu 100% bestanden wird. Ein Nichtbestehen sorgt zu einer Fehlermeldung im Programm oder verhindert die Ausführung von Systemfunktionen.

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Steuerung LMC400c des Positioniersystems wurde in Steuerungsauswahl selektiert	bestanden
2	Jeder SERCOS III Busteilnehmer besitzt eine eigene topologische Adresse entsprechend der realen Verdrahtungsreihenfolge	bestanden
3	Der SERCOS III Bus befindet sich in Phase 4 (Ringkommunikations) und ermöglicht Datentransfer zwischen allen Busteilnehmern	bestanden
4	Physikalische Parameter der Achsen wurden in den Servoreglereinstellungen aufgenommen	bestanden

5	Das Netzteil ist auf 400 V und 3-phasige Überwachung eingestellt ( <i>PhaseCheckMode</i> , <i>MainsVoltageMode</i> )	bestanden
6	Diagnosemaske für offene Ausgänge des LMC wurde gesetzt ( <i>OpenDiagMask</i> )	bestanden
7	Adressbereiche des SLC wurden für den Datenaustausch mit dem LMC freigegeben ( <i>LMC2SLCNumberOfBOOLs</i> )	bestanden
8	E/A-Abbild wurde in einer globalen Variablenliste angelegt	bestanden
9	Sichere E/A-Module wurden entsprechend der zeitlichen Anforderungen parametriert	bestanden

Tabelle 57: Testprotokoll - Prüfung der Geräteparametrierung in der Steuerungskonfiguration

#### 4.2.4 Prüfung der Programmfunctionen

Zuletzt werden die eigentlichen Funktionen des mehrachsigen Positioniersystems verifiziert. Anders als die bisherigen Tabellen im Testprotokoll sind nun nicht mehrere Testkriterien in einer Tabelle aufgeführt. Jeder Testfall eine Funktion betreffend besitzt eine eigene Tabelle mit allen geforderten Kriterien für die Erfüllung des jeweiligen Testfalls. Die nachfolgenden Tabellen beziehen sich auf die Testfälle *TF\_04* bis *TF\_12*. Der betrachtete Testfall wird im Titel der jeweiligen Tabelle referenziert.

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Weisse Taster leuchten nach Handmodusauswahl	nicht bestanden
2	Handmodus-Button wird nach Handmodusauswahl in GUI grün hinterlegt	bestanden
3	Bestätigung der Auswahl führt zur Aktivierung der grünen LED des Start-Tasters	nicht bestanden

4	Bestätigung der Auswahl führt zum Anlegen der Aufgabe in der GUI	bestanden
5	Tasten des vierfach Drucktasters führt zu Bewegungen der jeweiligen Achse	nicht bestanden
6	Drücken der <i>Jog+</i> und <i>Jog-</i> Buttons führt nach Auswahl der Achse zu Bewegungen an dieser Achse	bestanden
7	Tasten der weißen Bedienelemente bewegt den Greifer bzw. den Greifarm	nicht bestanden

Tabelle 58: Testprotokoll - Prüfung der Handmodusfunktionalität siehe Tabelle 39

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Positioniersystem arbeitet Absolut-Positionieraufgaben nach Programmavorgaben ohne Nutzereingaben ab	nicht getestet
2	Positioniersystem fährt programmatisch vorgegebene Trajektorien ohne Nutzereingaben ab	nicht getestet
3	System führt automatische Greifoperationen zur Aufnahme und Ablage von Transportobjekten durch	—
4	System fährt leer nach Betätigung des Stop-Tasters	nicht getestet

Tabelle 59: Testprotokoll - Prüfung des Automatikmodus siehe Tabelle 40

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	x-Achse bewegt sich langsam bei niedrigster Geschwindigkeitseinstellung am oberen Poti	—
2	z-Achse bewegt sich langsam bei niedrigster Geschwindigkeitseinstellung am unteren Poti	—

3	x-Achse bewegt sich schnell bei höchster Geschwindigkeitseinstellung am oberen Poti	—
4	z-Achse bewegt sich schnell bei höchster Geschwindigkeitseinstellung am unteren Poti	—

Tabelle 60: Testprotokoll - Prüfung der Geschwindigkeitsvorgabe siehe Tabelle 41

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Erreichen der rechten Endlage stoppt/verhindert Bewegung der x-Achse nach rechts	bestanden
2	Erreichen der linken Endlage stoppt/verhindert Bewegung der x-Achse nach links	bestanden
3	Erreichen der oberen Endlage stoppt/verhindert Bewegung der z-Achse nach oben	bestanden
4	Erreichen der unteren Endlage stoppt/verhindert Bewegung der z-Achse nach unten	bestanden
5	Bewegungen in Endlagennähe sind gedämpft (verringerte Geschwindigkeit, Beschleunigung)	nicht bestanden

Tabelle 61: Testprotokoll - Prüfung der Endlagenfunktionalität siehe Tabelle 42

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Erster sicherer Eingang detektiert Lichtvorhangauslösung nach spätestens 50ms	bestanden
2	Zweiter sicherer Eingang detektiert Lichtvorhangauslösung nach spätestens 50ms	bestanden
3	Not-Halt-Auslösung stoppt jegliche Bewegung nach spätestens 200ms	nicht getestet

4	Not-Halt-Auslösung schaltet Servoregler nach spätestens 250ms ab	bestanden
5	Der zurückgelegte Weg einer Achse nach Not-Halt Auslösung ist kleiner als 5cm	bestanden

Tabelle 62: Testprotokoll - Prüfung der funktionalen Sicherheit siehe Tabelle 43

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Bewegungsbefehle führen nach Not-Halt Auslösung zu keiner Bewegung	bestanden
2	Betätigung des Reset-Tasters ermöglicht die erneute Ausführung von Bewegungsbefehlen	—
3	Quittieren des Fehlers aus der GUI ermöglicht die erneute Ausführung von Bewegungsbefehlen	bestanden

Tabelle 63: Testprotokoll - Prüfung der Reset-Funktion siehe Tabelle 44

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Software <i>MachineExpert LogicBuilder</i> auf jedem Laborrechner installiert	bestanden
2	Steuerung LMC400c des Positioniersystems kann bei Steuerungsauswahl von jedem Laborcomputer gefunden werden	bestanden
3	Betätigung des Buttons „visuelles Signalisieren“ in Steuerungsauswahloberfläche lässt Status-LED am LMC blinken	bestanden
4	Es können Programme von jedem Rechner im Labor auf die Steuerung gespielt werden	bestanden

5	Jeder Laborcomputer kann sich auf der Steuerung einloggen	bestanden
---	---	-----------

Tabelle 64: Testprotokoll - Prüfung der Programmierschnittstelle Tabelle 45

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	OPC Server auf LMC kann über die Software <i>OPC-Watch</i> gefunden werden	bestanden
2	OPC Server auf PFC200 kann über die Software <i>OPC-Watch</i> gefunden werden	nicht getestet
3	Es können Daten vom LMC über den OPC Client der <i>OPC-Watch</i> Software ausgelesen werden	bestanden
4	Es können Daten vom PFC200 über den OPC Client der <i>OPC-Watch</i> Software ausgelesen werden	nicht getestet
5	Es können Daten aus dem OPC Client angepasst und zurück an den LMC übertragen werden	bestanden
6	Es können Daten aus dem OPC Client angepasst und zurück an den PFC200 übertragen werden	nicht getestet

Tabelle 65: Testprotokoll - Prüfung der OPC UA Schnittstelle Tabelle 46

Nr.	Testfall	Ergebnis
1	Ampel leuchtet dauerhaft grün, wenn das System im Leerlauf ist (keine Bewegungen der Achsen)	bestanden
2	Ampel leuchtet dauerhaft rot, wenn das System im Fehlerzustand ist (Not-Halt ausgelöst)	bestanden
3	Ampel blinkt abwechselnd rot und grün, wenn das System Achsbewegungen durchführt	bestanden

Tabelle 66: Testprotokoll - Prüfung der Signalampel Tabelle 47

## 4.3 Korrekturen und Verbesserungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Aufarbeitung der Testergebnisse aus dem letzten Unterabschnitt. Die meisten Testfälle konnten erfolgreich erfüllt werden und das mehrachsige Positioniersystem ist grundsätzlich für den aktiven Betrieb einsatzbereit. Die Kernanforderungen wurden bestanden.

Dennoch sind vereinzelt Testfälle noch nicht verifiziert worden oder haben die Prüfung sogar nicht bestanden. Im Folgenden sollen diese nun kurz diskutiert werden, um mögliche Lösungsansätze zu entwickeln, damit das System entsprechend seiner Anforderungen vollständig in Betrieb genommen werden kann.

Bereits bei der Sichtprüfung fällt direkt auf, dass die durch den Prozessentwickler geforderte Greiffunktion schon auf Hardwareebene nicht implementiert wurde. Da es sich um einen möglichen Anwendungsfall des Systems handelt und keine grundlegende Anforderung der wichtigen Stakeholder (Lehrpersonal) nicht erfüllen lässt, sind zunächst keine weiteren Handlungen nötig. Die Funktionalität auf sowohl der Hardware- als auch Softwareebene kann als spätere Erweiterung kategorisiert werden, die nicht mehr Teil dieses Projektes ist. Bei der Sichtprüfung fällt des Weiteren das Fehlen von Plexiglasscheiben am linken und rechten Ende des Gehäuses auf. Damit das System in Anwesenheit von Personen genutzt werden darf, müssen diese unabdinglich am Gestell des Systems montiert sein. Grund für das Fehlen ist eine Lieferschwierigkeit. Folglich muss die Lieferung abgewartet und die Montage nachgeholt werden. Es sind keine weiteren Handlungen von Nöten.

Abschließend im Sichtprüfungstestfall konnte das Nichtvorhandensein eines Netzschützes und einer Netzdrossel festgestellt werden. Beide Bauteile sind für die Nutzung des Systems nicht zwangsläufig nötig, sorgen jedoch für eine Qualitätssteigerung der Anlage hinsichtlich Komfort und Netzverträglichkeit. Wie schon im vorherigen Punkt ist das Fehlen der Komponenten bedingt durch Lieferschwierigkeiten. Liegen die Komponenten zu einem späteren Zeitpunkt vor, müssen sie lediglich noch montiert und verdrahtet werden.

Bei der Prüfung der Verdrahtung fällt ein weiteres Nichtbestehen eines Testfalls auf. Die Bedienelemente an der Tür des Schaltschrankes sind nicht verdrahtet. Sämtliche Eingaben, die über das physische Bedienfeld stattfinden, können auch über die GUI des Systems vorgenommen werden. Es gilt die Verdrahtung nachzuholen.

Bei der Testung der Anlagenfunktionen können abseits der bekannten Fehler noch drei weitere Probleme festgestellt werden. Zunächst muss der Automatikmodus abschließend getestet werden. Das heißt konkret, dass die Trajektorievorgabefunktion und das absolute Positionieren der Achsen über das genutzte *MotionTemplateFull* Programm, verifiziert werden muss. Weiterhin sind Geschwindigkeitsanpassungen der Achsbewegungen noch nicht dynamisch implementiert worden. Grund dafür ist die fehlende Verdrahtung der vorgesehenen Potentiometer. Somit ergibt sich die Notwendigkeit einer Programmanpassung zum Regeln der Geschwindigkeit (und Beschleunigung) aller Bewegungen der Positioniereinheit. Dies schließt das gedämpfte Fahrverhalten in Endlagennähe ein. Zuletzt ist es erforderlich die funktionale Sicherheit sowie die OPC Kommunikation vollständig zu überprüfen, da

einige Tests noch nicht vorgenommen wurden.

Bei der Nutzung des Systems ist ein nicht direkt über einen Testfall abgedecktes Problem zu erkennen. Das Positionieren auf der x-Achse des Systems ist möglich, jedoch ist das Motormoment nicht ausreichend, um die Achse flüssig bewegen zu können. Lösungsstrategie ist es den Servomotor nachträglich um ein Getriebe zu erweitern, damit dieser die x-Achse zuverlässig bewegen kann. Benötigt wird ein Getriebe mit Übersetzungsverhältnis von 1:3 oder höher. Der Einbau macht eine Neukonfigurierung der mechanischen Parameter in den Servoreglereinstellungen erforderlich.

Nach der Implementation der Korrekturen an der Systemhard- und Software gilt die Laboranlage als fertiggestellt.

---

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Über den Verlauf der Arbeit konnte ein mehrachsiges Positioniersystem wie auch dessen Systemsoftware entwickelt werden. Dabei wurden folgende Zielstellungen abgearbeitet:

- Erstellung einer Anforderungsanalyse des mehrachsigen Positioniersystems
- Aufstellung von Testkriterien zu den Anforderungen an das System
- Erstellung eines Anlagenkonzeptes unter Handlungsempfehlungen durch das Requirements-Engineering
- Modellierung des Systemverhaltens mithilfe der UML unter den Gesichtspunkten der Anlagenprojektierung
- Implementierung der Modelle unter Beachtung der Norm DIN/EN 61131 als Steuerungsprogramm des Systems
- Erfolgreiche Inbetriebnahme des Positioniersystems unter Prüfung der festgelegten Testkriterien
- Bereitstellen von Prozess- und Maschinendaten für die Weiterverarbeitung und dezentrale Steuerung
- Bereitstellen einer Schnittstelle für die Bedienung und Programmierung des Systems von allen Laborplätzen

Dazu werden beginnend mit dem Konzeptionsteil der Arbeit alle Anforderungen der verschiedenen Stakeholder das System betreffend ermittelt. Diese können anschließend unterteilt werden in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, die in der anschließenden Projektierungsphase als geforderte Funktionalität modelliert werden müssen. In der Konzeption werden weiterhin die Stakeholder ermittelt um verschiedene Interessengebiete festzustellen und Anforderungen gewichten zu können. Mithilfe einer Konfiguratorgrafik können sämtliche Systemkomponenten zusammengetragen und skizzenhaft in Zusammenhang gebracht werden, um einen Grobüberblick herzustellen. Im Konzeptionsteil wird weiterhin ein Bedienkonzept entworfen, welches Grundlage für die spätere Umsetzung sein soll.

Aus dem entwickelten Konzept kann im zweiten Teil der Arbeit, der Anlagenprojektierung, das weitere Vorgehen abgeleitet werden. Beginnend mit der Kontextanalyse findet die Modellierung des Systems und seines Verhaltens statt. In der Kontextanalyse werden zunächst die Systemgrenzen sowie Nachbarsysteme ermittelt. Anschließend findet eine Identifizierung der Systemprozesse und deren Präzisierung in der Anwendungsfallspezifikation statt. Basierend auf der Anwendungsfallspezifikation kann im nächsten Analyseschritt das Systemverhalten modelliert werden. Zur Komplexitätsverringerung wird daraufhin eine Partitionierung vorgenommen, um die Entwicklung zu vereinfachen und übersichtlicher zu gestalten. Im letzten Schritt der detaillierten Systemanalyse werden sämtliche Testspezifikationen der vorhergegangenen Analyseschritte zusammengetragen und strukturiert dokumentiert. Nach der Implementation müssen unter Verifizierung der

---

aufgestellten Testkriterien die Anlagenfunktionen geprüft werden. Nachfolgend wird in der Projektierungsphase der Stromlaufplan des Systems entwickelt, auf dessen Grundlage die Hardwareimplementation nachfolgend stattfindet. Das Datenmodell stellt die Grundlage für die Softwareimplementation dar und bildet eine Brücke zwischen den realen Komponenten, wie Aktuatoren und Sensoren und Variablen im Steuerungsprogramm. Abschließend in der Systemmodellierung spielt die funktionale Sicherheit eine wichtige Rolle, um den Schutz von Mensch und Anlage sicherzustellen. Es wird eine Zusammenstellung von Sicherheitsmaßnahmen vorgenommen.

Im Kapitel zu Inbetriebnahme werden beginnend mit der Implementationsphase die Modellierungen aus der Projektierung des Positioniersystems implementiert. Begonnen mit der Hardware findet die Dokumentation der Montage- und Verdrahtungsaufgaben statt. Daran anschließend kann die Systemsoftware implementiert werden, die im Kontext der Arbeit eine besonders wichtige Rolle spielt. Nach Abschließen der Implementationsphase müssen mithilfe von Testfällen die in der Anforderungsanalyse ermittelten Anforderungen bzw. deren Testkriterien überprüft werden. Treten Fehler auf oder können Anforderungen nicht erfüllt werden, müssen diese je nach Gewichtung korrigiert bzw. verbessert werden.

Resultat der Arbeit ist die erfolgreiche Entwicklung eines mehrachsigen Positioniersystems, welches sowohl als Lehrmittel als auch als eingebettetes System im Automatisierungsbzw. Prozesssteuerungssystem-Labor eingesetzt werden kann. Es besteht die Möglichkeit Anlagenspezifische Funktionen zu nutzen und die Programmierung dieser als Softwareentwicklung zu üben und zu erlernen. Durch die Implementierung eines OPC Servers auf der Systemsteuerung können sowohl Daten aus dem Systemprozess bzw. der Systemsoftware bereitgestellt werden, als auch Daten empfangen werden. Dies ermöglicht auf der einen Seite einen Mehrwert aus den generierten Daten zu erzeugen, in dem diese visualisiert und/oder analysiert werden. Relevanz hat das für sowohl das Nachbarsystem Augmented Reality Server, welches einen schnellen Überblick über das Positioniersystem verschaffen soll, als auch für die Integrierung der Daten in eine Verwaltungsschale, welche das System digital repräsentiert. Auf der anderen Seite kann durch das Zurückschreiben von z. B. Positionsdaten die Positioniereinheit dezentral gesteuert werden. Es ergibt sich die Nutzung des Systems als Smart-Application.

Vor allem durch die Messung und Bereitstellung von Leistungsdaten des Systems durch die Wago Steuerung können Optimierungen am Fahrverhalten vorgenommen werden. Dies ermöglicht eine quantitative Bewertung der Qualität der entwickelten Systemsoftware. Dennoch wurden in der Testphase Fehler bzw. Mängel ermittelt, die auszubessern sind. Da die Kernanforderungen jedoch erfüllt sind, kann die Aufgabenstellung zur Entwicklung des Positioniersystems als erfüllt bewertet werden.

---

## 6 Ausblick

Mit der Fertigstellung des mehrachsigen Positioniersystems ergibt sich die Möglichkeit der Einbindung des Systems in Nachbarprojekte, sowie die Erweiterung in Folgeprojekten. Dieses letzte Kapitel dient als kurzer Überblick zu möglichen und geplanten Erweiterungen sowie anschließenden Projekten.

Zunächst werden mögliche Erweiterungen aufgeführt:

- Umsetzung der bereits in dieser Arbeit postulierten Greiffunktionalität über ein anbaubares Greifsystem
- Erweiterung des Systems um Ablage- und Abtransportsysteme (z. B. Förderband, Lager)
- Projektionssystem zur Visualisierung von virtuellen Hindernissen

Da es sich nur um mögliche und nicht geplante Erweiterungen handelt, werden diese nicht weiter aufgegriffen.

Anders als die zuvor erwähnten Erweiterungen sind die folgenden Projekte bereits in der Planung oder der Umsetzung:

- Integration eines Augmented Reality Servers zur Visualisierung von Systemzuständen und Prozessdaten
- Anbindung an ein Verwaltungsschalenmanager, der über die OPC Kommunikation das System verwalten kann (Projekt OpenBasys)
- Steuerung des Systems über dezentral nutzbare Webanwendung (Projekt OPC-Gateway)

Die Einbindung eines AR Servers ist bereits in der letzten Entwicklungsphase. Ziel soll es sein, Prozessdaten über ein Smartphone oder Tablet auslesen zu können, in dem die Kamera auf Systemkomponenten ausgerichtet wird. So führt z. B. die Anvisierung des Motors der x-Achse des Positioniersystems zur Ausgabe der Motortemperatur und der aktuellen Position der Achse auf dem Display des genutzten Endgerätes. Die Sicht auf den Schaltschrank ermöglicht bspw. die Einsicht des Stromlaufplanes oder der Handbücher zu den Steuerungskomponenten.

Ein weiteres parallel umgesetztes Projekt beschäftigt sich mit der Generierung und dem Management von Verwaltungsschalen, welche eine digitale Repräsentanz des Systems darstellen. Ziel soll es sein ganze Fabrikkomplexe über ein Softwaresystem zu Verwalten. Das Positioniersystem wird ein Anwendungsbeispiel dieses Projektes darstellen.

---

Zuletzt soll auf ein weniger umfangreiches Folgeprojekt eingegangen werden, welches im direkten Anschluss an die Arbeit fertiggestellt werden wird. Es handelt sich um die Umsetzung eines OPC-Gateways, welches sowohl als OPC Client als auch Backend für eine Webanwendung dient. Ziel ist es die Steuerung des Positioniersystems sowohl umfangreicher als auch leichter zu gestalten. Über die OPC Schnittstelle des mehrachsigen Positioniersystems können sowohl Steuerdaten ausgegeben werden als auch wieder entgegengenommen. Dies ermöglicht die komplette Steuerung des Systems in eine externe Anwendung auszulagern. Nach Beendigung des Projektes können alle bisherigen Bedienfunktionen anschaulicher genutzt werden, sowie unter anderem Trajektorievorgaben durch touch-basiertes Zeichnen dieser vorgenommen werden. Es wird eine grafische Oberfläche geben, in der alle realen Komponenten digital repräsentiert sind.

Weiterhin sollten KI gesteuerte Optimierungen im Zusammenhang mit der Fahrweg- und Fahrqualitätsoptimierung evaluiert werden. Daraus gewonnene Ergebnisse würden einen erheblichen Mehrwert für verwandte Systeme ergeben und mögliche Handlungsempfehlungen zur Folge haben.

---

# Literaturverzeichnis

## Bücher

- [Abo16] Ferri Abolhassan. *Effizienz durch Automatisierung*. Herausgegeben von Jörn Kellermann. Gabler, Betriebswirt.-Vlg, März 2016. 118 Seiten. ISBN: 978-3-658-10644-7. URL: [https://www.ebook.de/de/product/25821787/effizienz\\_durch\\_automatisierung.html](https://www.ebook.de/de/product/25821787/effizienz_durch_automatisierung.html) (siehe Seite 1).
- [And17] Volker P. Andelfinger. *Industrie 4.0*. Herausgegeben von Till Hänisch. Gabler, Betriebswirt.-Vlg, Feb. 2017. 271 Seiten. ISBN: 978-3-658-15557-5. URL: [https://www.ebook.de/de/product/28656146/industrie\\_4\\_0.html](https://www.ebook.de/de/product/28656146/industrie_4_0.html) (siehe Seite 1).
- [Bal09] Helmut Balzert. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*. Spektrum Akademischer Verlag, Sep. 2009. 644 Seiten. ISBN: 978-3-8274-1705-3. URL: [https://www.ebook.de/de/product/8616890/helmut\\_balzert\\_lehrbuch\\_der\\_softwaretechnik\\_basiskonzepte\\_und\\_requirements\\_engineering.html](https://www.ebook.de/de/product/8616890/helmut_balzert_lehrbuch_der_softwaretechnik_basiskonzepte_und_requirements_engineering.html).
- [Bör15] Josef Börcsök. *Funktionale Sicherheit Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme*. BerlinOffenbach: VDE-Verl, 2015. ISBN: 9783800735907.
- [Com98] International Electronic Commission. *International Standard IEC 61131*. 1998 (siehe Seite 1).
- [Gol11] Joachim Goll. *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8348-1578-1 (siehe Seiten 54, 63).
- [HLG19] Berthold Heinrich, Petra Linke und Michael Glöckler. *Grundlagen Automatisierung*. Springer-Verlag GmbH, Nov. 2019. 462 Seiten. ISBN: 978-3-658-27323-1. URL: [https://www.ebook.de/de/product/38313274/berthold\\_heinrich\\_petra\\_linke\\_michael\\_gloeckler\\_grundlagen\\_automatisierung.html](https://www.ebook.de/de/product/38313274/berthold_heinrich_petra_linke_michael_gloeckler_grundlagen_automatisierung.html) (siehe Seite 1).
- [Kar09] Michael Tiegelkamp Karl Heinz John. *SPS-Programmierung mit IEC 61131-3*. Springer-Verlag GmbH, Juni 2009. 402 Seiten. ISBN: 978-3-642-00269-4. URL: [https://www.ebook.de/de/product/12469251/karl\\_heinz\\_john\\_michael\\_tiegelkamp\\_sps\\_programmierung\\_mit\\_iec\\_61131\\_3.html](https://www.ebook.de/de/product/12469251/karl_heinz_john_michael_tiegelkamp_sps_programmierung_mit_iec_61131_3.html).
- [Kas18] Ismail Kasikci. *Projektierung von Niederspannungsanlagen*. Hüthig GmbH, Okt. 2018. 832 Seiten. ISBN: 9783810104687. URL: [https://www.ebook.de/de/product/33869961/ismail\\_kasikci\\_projektierung\\_von\\_niederspannungsanlagen.html](https://www.ebook.de/de/product/33869961/ismail_kasikci_projektierung_von_niederspannungsanlagen.html).
- [Kel19] Hubert B. Keller. *Entwicklung von Echtzeitsystemen*. Springer-Verlag GmbH, Dez. 2019. 287 Seiten. ISBN: 978-3-658-26641-7. URL: [https://www.ebook.de/de/product/38401910/hubert\\_b\\_keller\\_entwicklung\\_von\\_echtzeitsystemen.html](https://www.ebook.de/de/product/38401910/hubert_b_keller_entwicklung_von_echtzeitsystemen.html).

- 
- [Kle13] Stephan Kleuker. *Grundkurs Software-Engineering mit UML*. Springer-Verlag GmbH, Juli 2013. 402 Seiten. ISBN: 978-3-658-00642-6. URL: [https://www.ebook.de/de/product/25604282/stephan\\_kleuker\\_grundkurs\\_software\\_engineering\\_mit.uml.html](https://www.ebook.de/de/product/25604282/stephan_kleuker_grundkurs_software_engineering_mit.uml.html) (siehe Seiten 7, 35).
- [Lap14] Phillip Laplante. *Requirements engineering for software and systems, second edition*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014. ISBN: 978-1-4665-6082-6 (siehe Seiten 1, 3, 21).
- [Man21] Marco Kuhrmann Manfred Broy. *Einführung in die Softwaretechnik*. Springer-Verlag GmbH, Juni 2021. 666 Seiten. ISBN: 978-3-662-50263-1. URL: [https://www.ebook.de/de/product/41143391/manfred\\_broy\\_marco\\_kuhrmann\\_einfuehrung\\_in\\_die\\_softwaretechnik.html](https://www.ebook.de/de/product/41143391/manfred_broy_marco_kuhrmann_einfuehrung_in_die_softwaretechnik.html) (siehe Seiten 50, 55).
- [Mar07] Peter Marwedel. *Eingebettete Systeme*. Springer-Verlag GmbH, Apr. 2007. 265 Seiten. ISBN: 978-3-540-34049-2. URL: [https://www.ebook.de/de/product/19205528/peter\\_marwedel\\_eingebettete\\_systeme.html](https://www.ebook.de/de/product/19205528/peter_marwedel_eingebettete_systeme.html) (siehe Seite 49).
- [Poh15] Klaus Pohl. *Basiswissen Requirements Engineering : Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering"; Foundation Level nach IREB-Standard*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2015. ISBN: 9783864902833.
- [Pos11] Torsten Posch. *Basiswissen Softwarearchitektur : verstehen, entwerfen, wiederverwenden*. Heidelberg: Dpunkt.verlag, 2011. ISBN: 3898647366.
- [Rud99] Peter Göhner Rudolf Lauber. *Prozessautomatisierung 2*. Springer Berlin Heidelberg, Okt. 1999. 524 Seiten. ISBN: 978-3-540-65319-6. URL: [https://www.ebook.de/de/product/1369906/rudolf\\_lauber\\_peter\\_goehner\\_prozessautomatisierung\\_2.html](https://www.ebook.de/de/product/1369906/rudolf_lauber_peter_goehner_prozessautomatisierung_2.html) (siehe Seiten 4, 6, 20).
- [Sch15] Karl Schmitt. *SPS-Programmierung mit ST nach IEC 61 131 mit CODESYS und mit Hinweisen zu STEP 7 im TIA-Portal*. Würzburg: Vogel Business Media, 2015. ISBN: 3834333697.
- [Tab06] Peter Tabeling. *Softwaresysteme und ihre Modellierung Grundlagen, Methoden und Techniken ; mit 43 Tabellen*. BerlinHeidelbergNew York: Springer, 2006. ISBN: 3-540-25828-0 (siehe Seiten 51, 68).
- [Tho17] Dieter Hofmann Thomas Bindel. *Projektierung von Automatisierungsanlagen*. Springer-Verlag GmbH, 2. Aug. 2017. 273 Seiten. ISBN: 978-3-658-16416-4. URL: [https://www.ebook.de/de/product/33168410/thomas\\_bindel\\_dieter\\_hofmann\\_projektierung\\_von\\_automatisierungsanlagen.html](https://www.ebook.de/de/product/33168410/thomas_bindel_dieter_hofmann_projektierung_von_automatisierungsanlagen.html) (siehe Seite 3).
- [Wei14] Tim Weilkiens. *Systems Engineering mit SysML/UML*. Dpunkt.Verlag GmbH, Juni 2014. 512 Seiten. ISBN: 3864900913. URL: [https://www.ebook.de/de/product/22032044/tim\\_weilkiens\\_systems\\_engineering\\_mit\\_sysml\\_uml.html](https://www.ebook.de/de/product/22032044/tim_weilkiens_systems_engineering_mit_sysml_uml.html).

- 
- [Wie12] Joachim Wietzke. *Embedded Technologies*. Springer-Verlag GmbH, Mai 2012. 321 Seiten. ISBN: 978-3-642-23996-0. URL: [https://www.ebook.de/de/product/19292147/joachim\\_wietzke\\_embedded\\_technologies.html](https://www.ebook.de/de/product/19292147/joachim_wietzke_embedded_technologies.html) (siehe Seite 45).

## Artikel

- [Gmb12] t2informatik GmbH. „Requirements Engineering“. In: (Okt. 2012). URL: <https://t2informatik.de/wissen-kompakt/requirements-engineering/> (besucht am 23. 09. 2021).
- [Wal05] Christian Walke. „Entwurfsprozess für verteilte Steuerungen mit UML und IEC 61499“. In: (2005) (siehe Seiten 5, 21, 49).

---

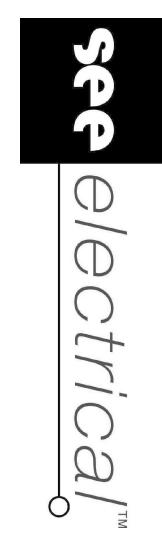
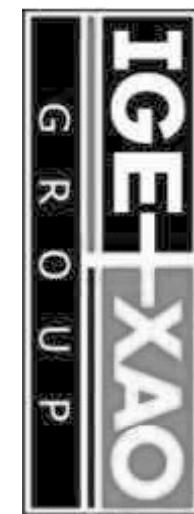
## Anhang

Dieser Abschnitt der Arbeit beinhaltet sämtliche Anhänge, die nicht im Hauptteil eingebunden wurden.

Anschließend findet sich der komplette Stromlaufplan des Systems. Wichtig zu beachten ist, dass der Stand des Stromlaufplanes in dieser Arbeit zum Zeitpunkt des Lesens veraltet ist, da Erweiterungen bzw. Änderungen an der Laboranlage vorgenommen wurden. Ein aktueller Stromlaufplan muss folglich nachgereicht werden.

Weiterhin kann eine Tabelle mit allen Systemkomponenten nach dem Stromlaufplan gefunden werden.

卷之三



**Projekt:** Positioniereinheit\_G422\_2  
**Kunde:** Positioniereinheit\_G422\_2

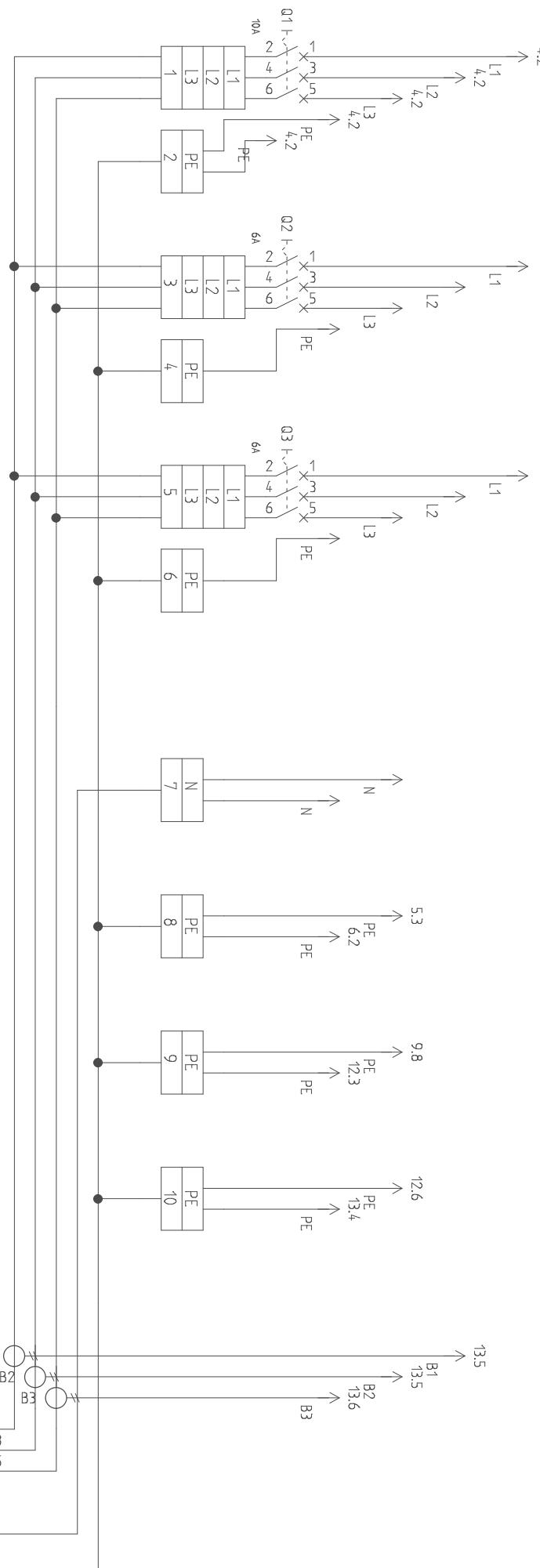
vorherige Seite:		nächste Seite:	
Zustand Änderung	Datum	Kunde	Projektbeschreibung
		Prof. Dr. Schäfer Wittensteinstr. 75A 12459 Berlin	Positionseinheit - Schäfer MC
			Proj.-Nr.: 4422_2
			Positionseinheit: 4422_2
			Standort: Zeichn.-Nr.: 1
0	1	2	3
			Ers.f.
			Ers.d
		4	5
		6	7
		8	9
			von 1

卷之三

Inhaltsverzeichnis

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!

vorherige Seite:		Kunde		Projektbeschreibung		Blattbeschreibung		nächste Seite:	
Zustand	Änderung	Datum	Name	Projekt	Datum	Name	Inhaltsverzeichnis	Proj.-Nr.:	Anlage:
		16/03/2021	Bearb.	16/03/2021				Positionseinheit_5422_2	Ort:
			Gepr.					Standort	Zeichng.-Nr.:
			Norm				Urspr.	Ers.f	Blatt:
0				2			3	Ers.d	1
		1					4		von
							5		1
							6		9
							7		
							8		
							9		



0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

A

24V → 6.0  
0V → 6.0

B

B

C

C

D

D

E

E

F

F

G

G

H

H

I

I

J

J

K

K

L

L

M

M

N

N

O

O

P

P

Q

Q

R

R

S

S

T

T

U

U

V

V

W

W

X

X

Y

Y

Z

Z

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

WW

XX

XX

YY

YY

ZZ

ZZ

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

WW

XX

XX

YY

YY

ZZ

ZZ

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

WW

XX

XX

YY

YY

ZZ

ZZ

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

WW

XX

XX

YY

YY

ZZ

ZZ

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

WW

XX

XX

YY

YY

ZZ

ZZ

AA

AA

BB

BB

CC

CC

DD

DD

EE

EE

FF

FF

GG

GG

HH

HH

II

II

JJ

JJ

KK

KK

LL

LL

MM

MM

NN

NN

OO

OO

PP

PP

QQ

QQ

RR

RR

SS

SS

TT

TT

UU

UU

VV

VV

WW

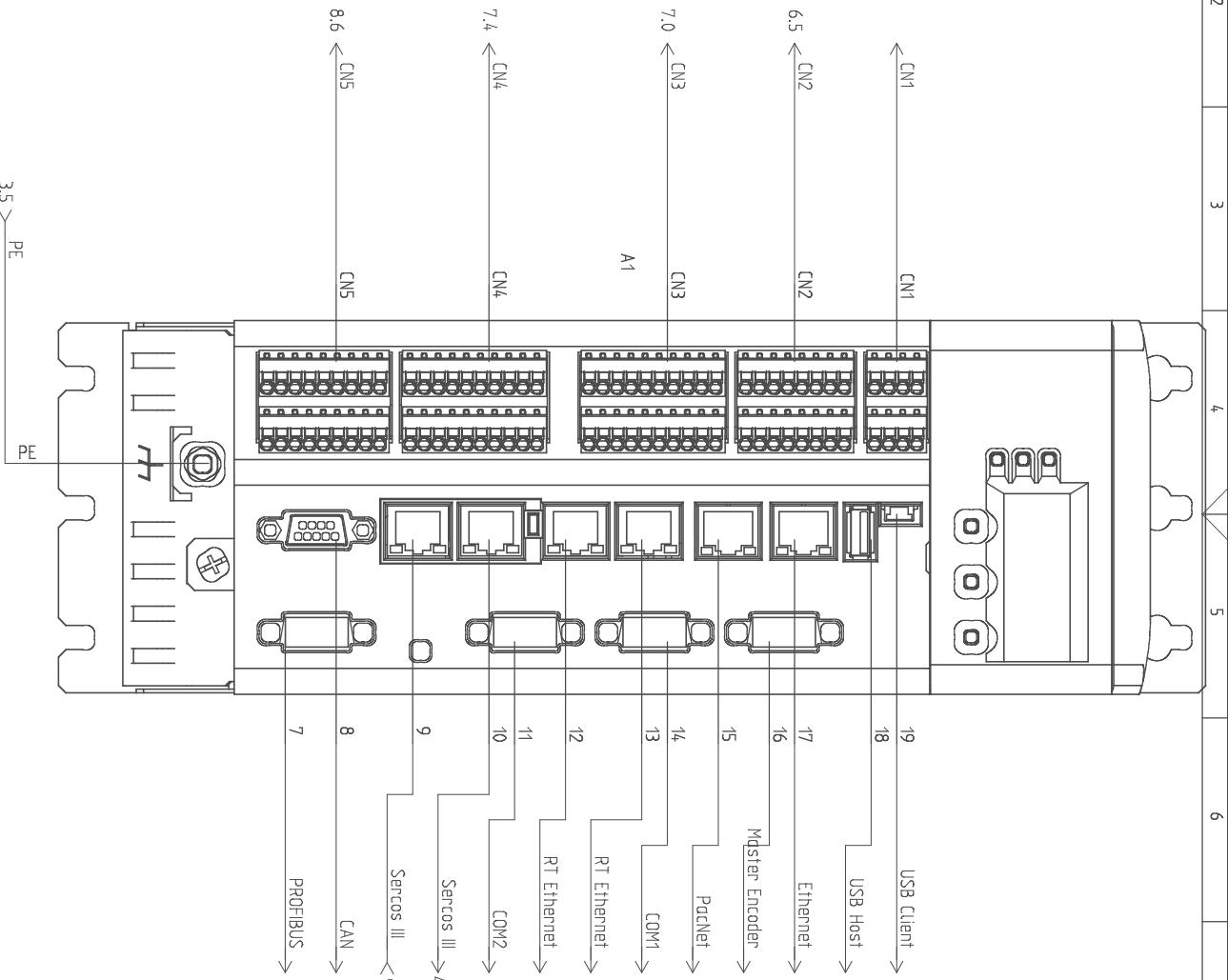
WW

XX

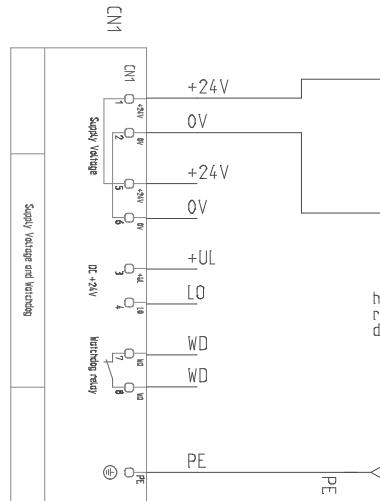
XX

YY

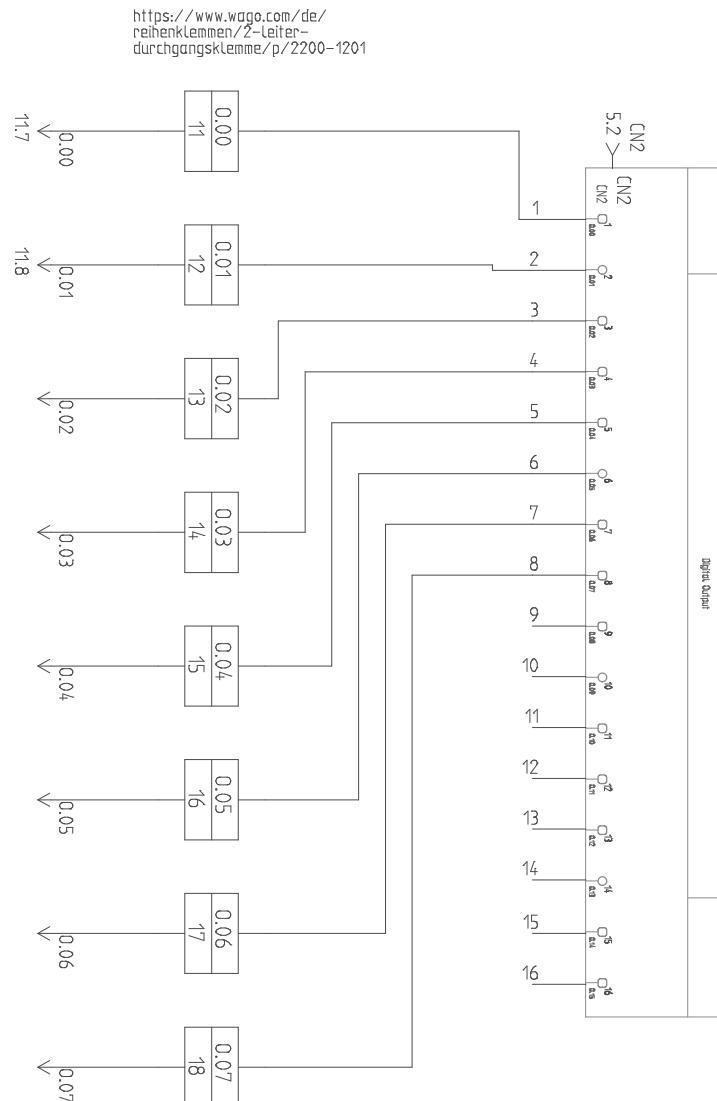
YY



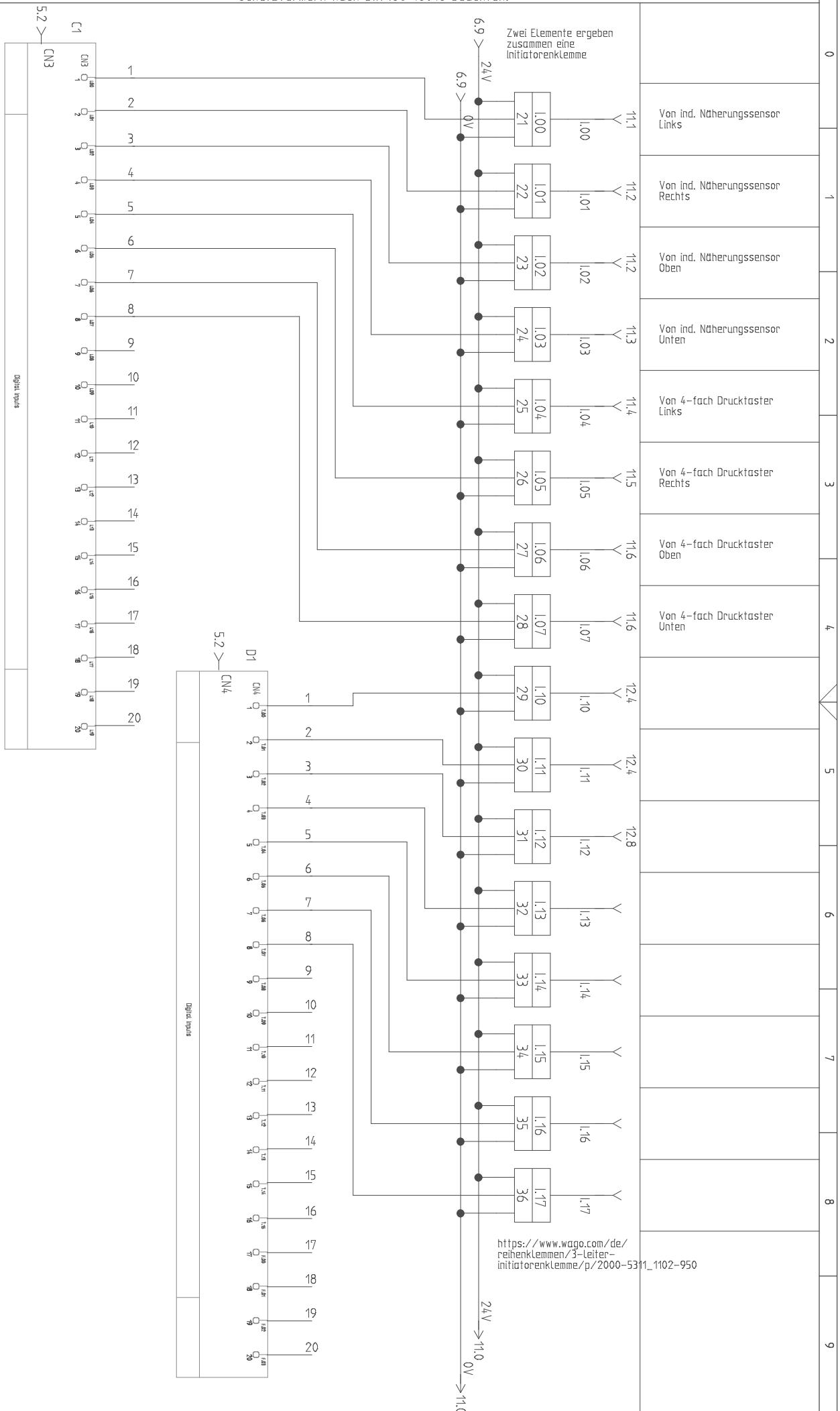
Kunde		Projektbeschreibung	Blattbeschreibung	nächste Seite: 6
Projekt	Datum	Nome	LMC Inselübersicht	Anlage:
Bearb.	10/03/2021		Proj.-Nr.:	
Gepr.			Positionierähnheit	Ort:
Norm		Urspr.	Standort	Zeichng.-Nr.:
		Ers.f	Ers.d	Blatt: 5 von 11



[https://www.wago.com/de/  
reihenklemmen/2-Leiter-  
durchgangsklemme/p/2200-1201](https://www.wago.com/de/reihenklemmen/2-Leiter-durchgangsklemme/p/2200-1201)



Kunde		Projektbeschreibung		Blattbeschreibung		nächste Seite:	
Projekt Bearb.	Datum Gepr.	Name Urspr.		LMC/V/O		Proj.-Nr.: Positionseinheit: Standort	Anlage: Ort: Zeichng.-Nr.: Blatt: von
Norm		Ers.f		Ers.d		Zu Ampel Rot	Zu Ampel Grün



Vorherige Seite:	6	Kunde	Projektbeschreibung	Blattbeschreibung	Nächste Seite:	8
Zustand Änderung	Datum	Name	Projekt Datum	Name	IMC I/O 2	
Bearb.	16/03/2021				Proj.-Nr.:	Anlage:
Gepr.					Positioniereinheit 6422 2	Ort:
Norm			Urspr.	Ers.f	Standort	Zeichn.-Nr.:
				Ers.d		Blatt:
						von
						11

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!

0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9

A

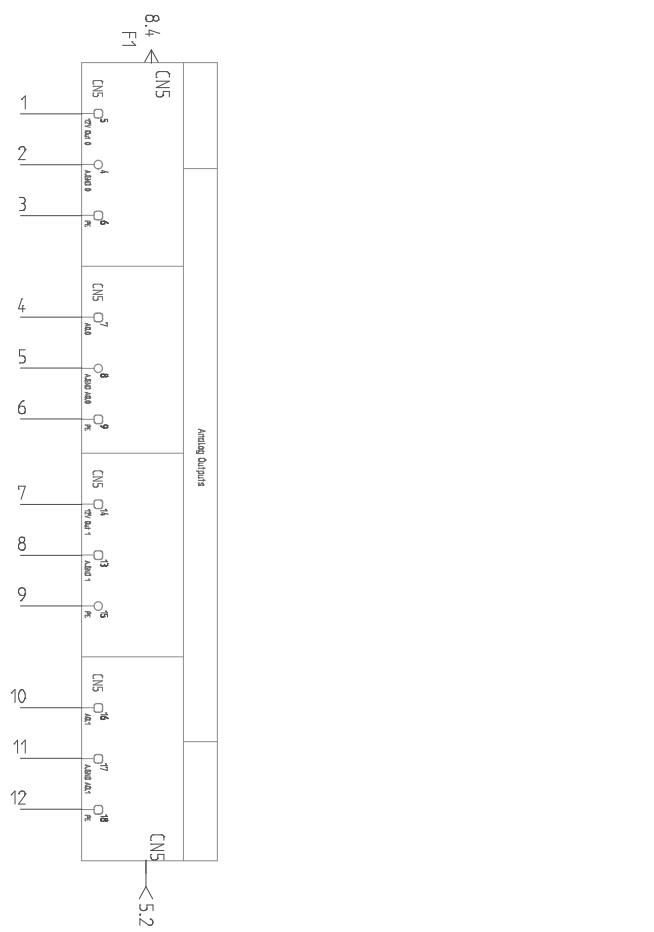
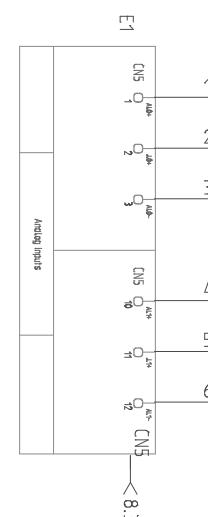
1

1

1

1

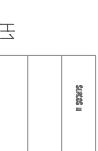
1



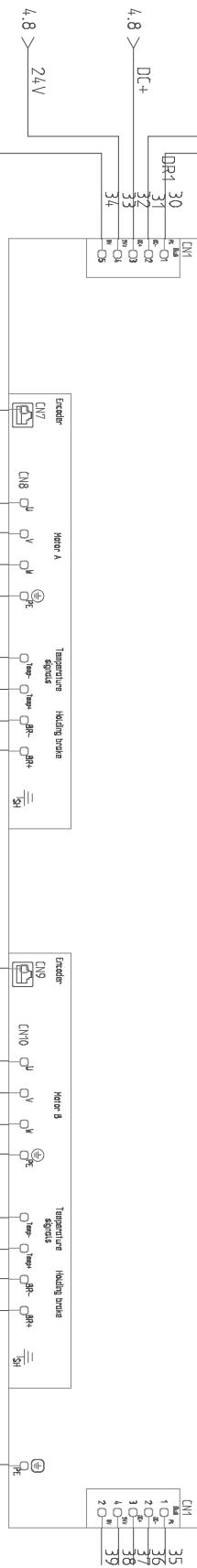
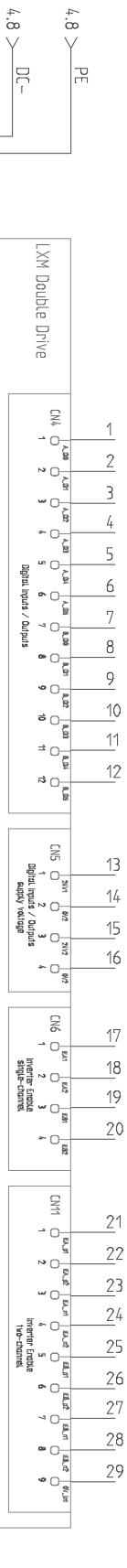
Kunde	Projektdeskription	Blattbeschreibung	nächste Seite: 9
		LMC 1/0 3	Proj.-Nr.: Anlage: Positionseinheit:
Urspr.	Ers.f	Ers.d	Standort: 5422 2 Zeichn.-Nr.: Ort: Blatt: 8 von 11

0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9

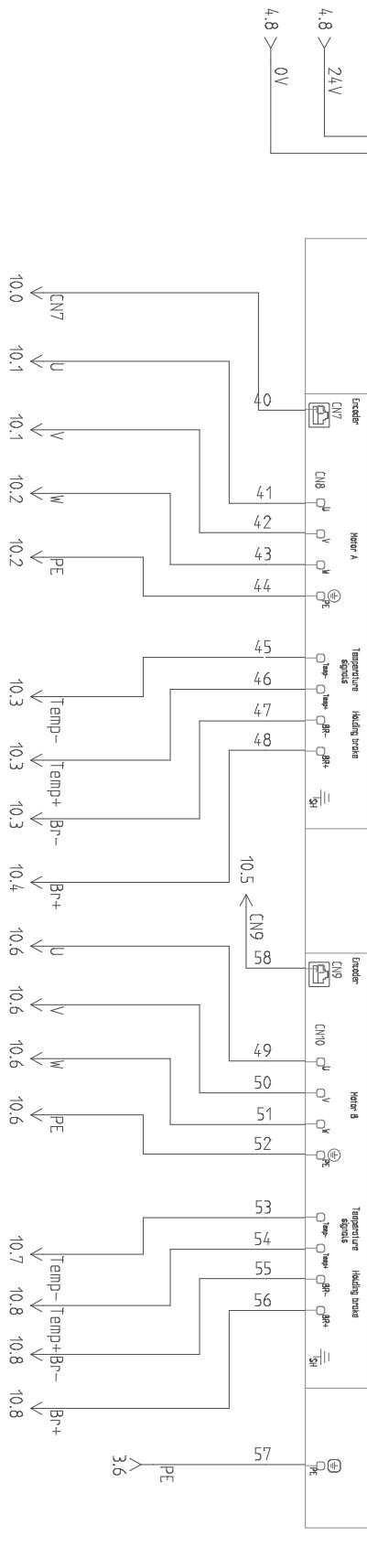
A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z



H1  
Sercos III  
5.7  
4.0



Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!



F

vorherige Seite: 8

Kunde

Projektbeschreibung

LXM Drive

nächste Seite: 10

Anlage:

E

Zustand Änderung Datum Name Projekt Datum Name

Beorb.

Proj.-Nr.:

Positioniereinheit\_5422\_2

Ort:

D

Gepr.

Norm

Standort

Zeichnung-Nr.:

Blatt:

C

Unspr.

ErS.f

ErS.d

von

Blatt: 9 von 11

B

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!

0

→

2

2

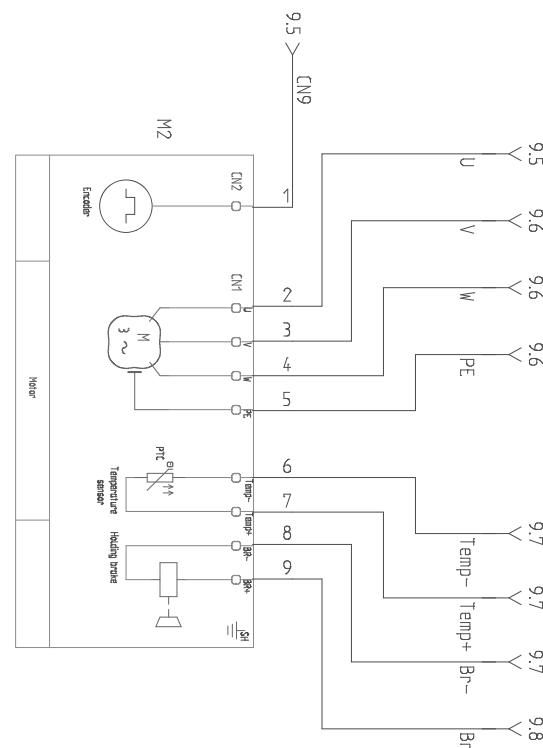
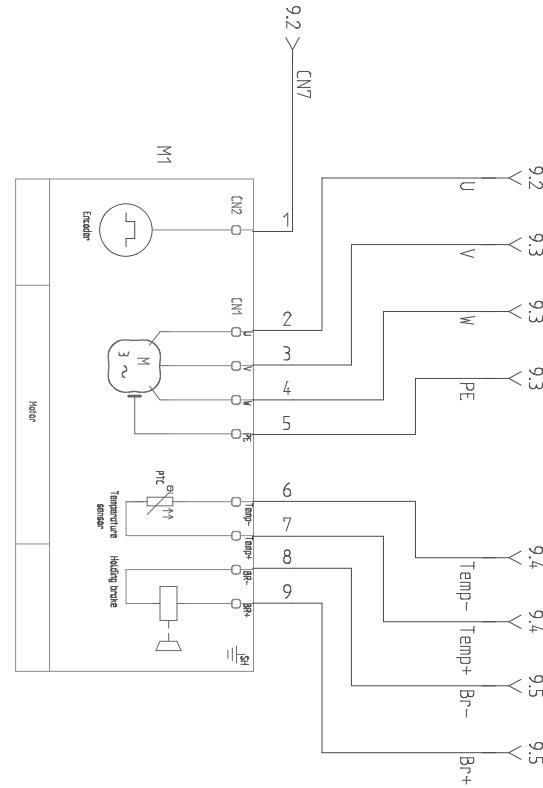
1

۷

7

1

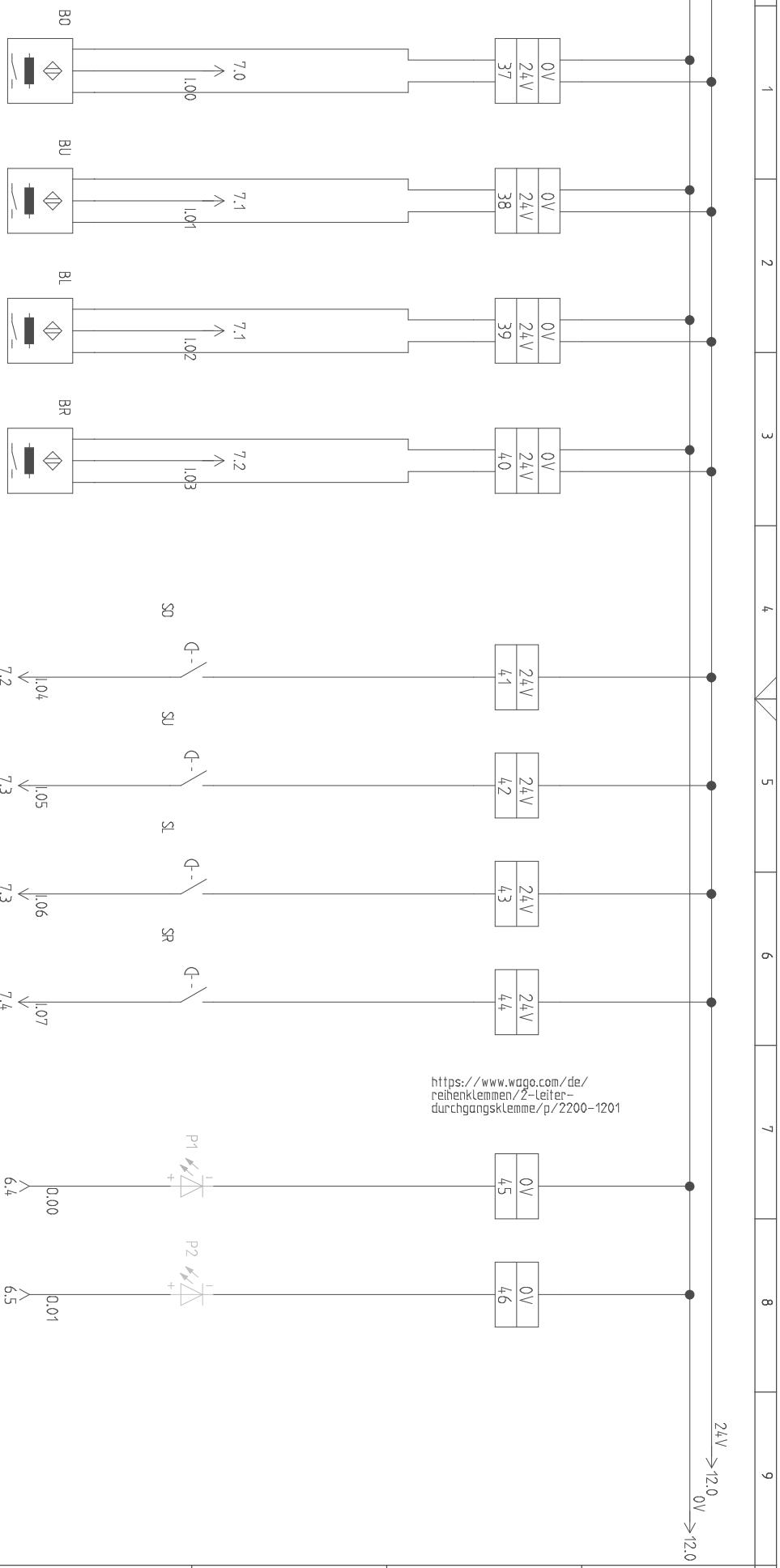
8



vorherige Seite: 9					Kunde	projektbeschreibung	Buflfbeschreibung	nächste Seite: 11
Zustand	Änderung	Datum	Name	Projekt	Datum	Name	Motoren	Proj.-Nr.:
				Bearb.	10/03/2021			Positioniereihheit 6422-2
				Gep.				Standort
			Norm			Urspr.	Ers.f	Zeichung.-Nr.:
							Ers.d	Blatt: 10 von 11

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!

<https://www.wago.com/de/reihenklemmen/doppelstockklemme/p/2000-2201>



Induktive Sensoren  
(Schließer)

4-fach Drucktaster  
(für Achsbewegungen X,Z)

Signalsäule  
(Rot + Grüne LED)

F

E

D

C

B

A

0

1

2

3

5

6

7

8

9

F

E

D

C

B

A

vorherige Seite: 10

Kunde

Projektbeschreibung

Blattbeschreibung

nächste Seite: 12

F

Zustand Änderung Datum Name Projekt Datum Name

Bezirk:

10/03/2021

Gepr.:

Anlage:

E

Norm

Unspr.

ErS,f

Standort

Ort:

D

Zeichn.-Nr.:

6422-2

Blatt:

C

11

von

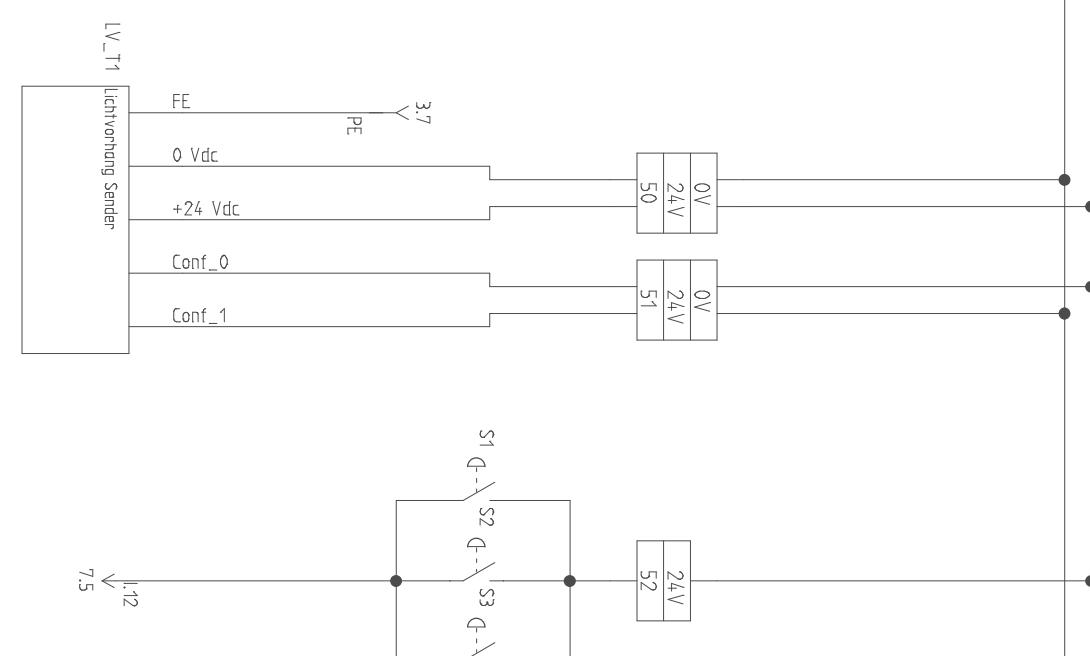
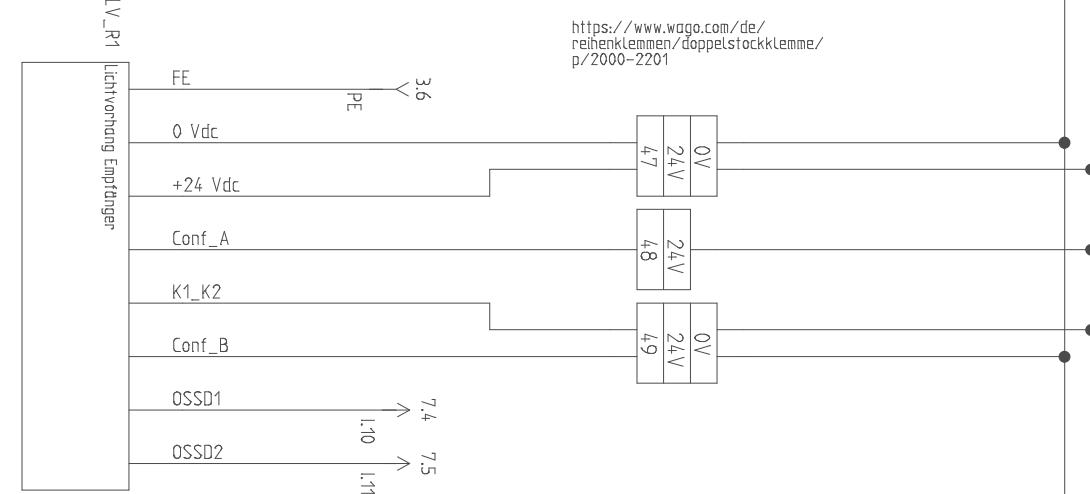
B

11

A

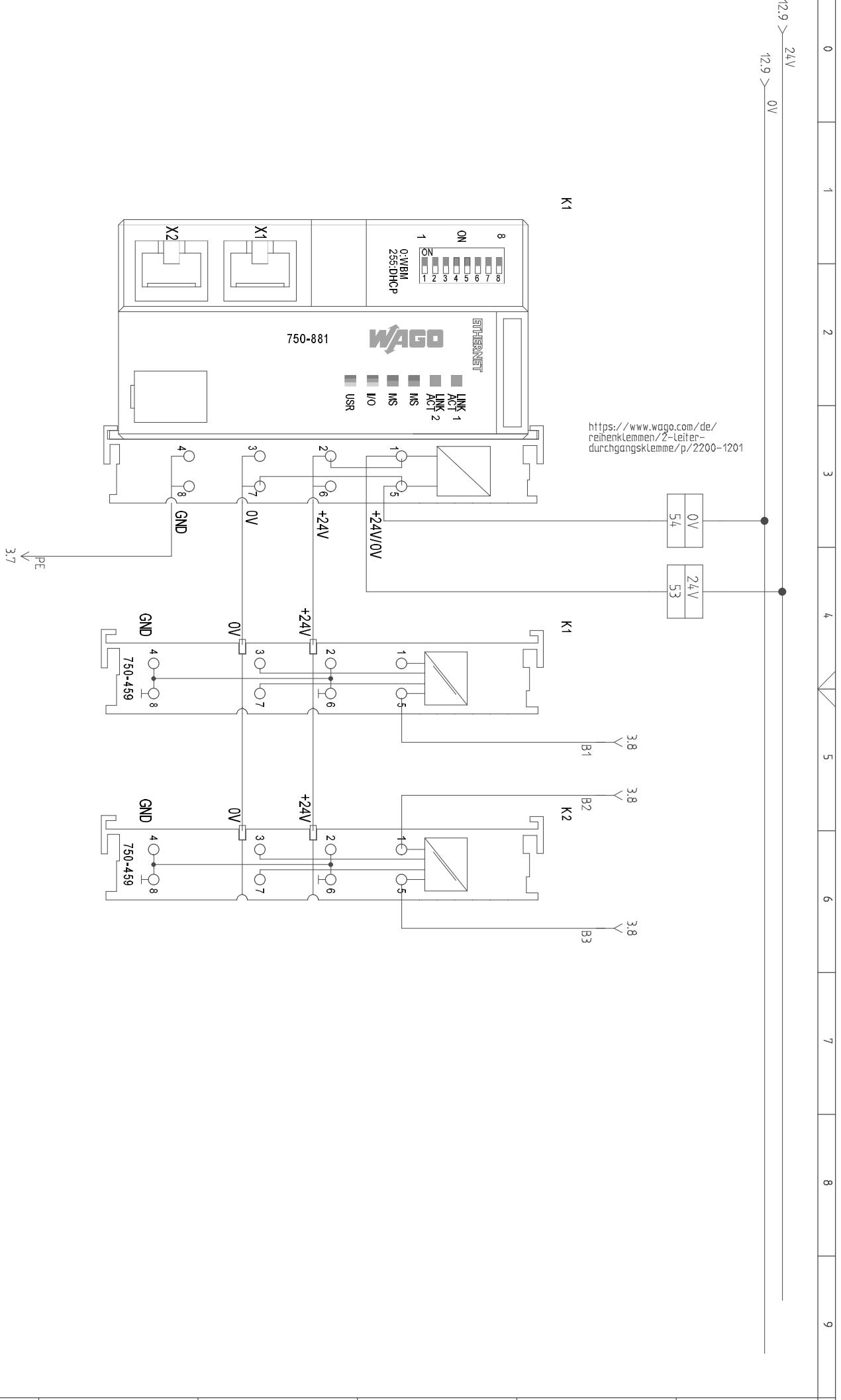
&lt;p

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!



F	E	D	C	B	A
vorherige Seite: 11					0
Zustand Änderung	Datum	Name	Projekt Datum	Name	1
			Beorb.	10/03/2021	2
			Gepr.		3
			Norm	Urspr.	4
					5
					6
					7
					8
					9

Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!





## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit, dass

- ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- ich andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe,
- ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe,
- die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegen hat.

Berlin, 20. Oktober 2021

Unterschrift: A. Zelk