



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Matthias Lübbe

Neuentwicklung eines automatisierten Motorenprüf-
standes zur Endprüfung der Asynchronmotoren in
Radargeräten

Matthias Lübbe

Neuentwicklung eines automatisierten
Motorenprüfstandes zur Endprüfung der
Asynchronmotoren in Radargeräten

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Gustav Vaupel
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Jörg Dahlkemper

Abgegeben am 25. August 2010

Matthias Lübbe

Thema der Bachelorthesis

Neuentwicklung eines automatisierten Motorenprüfstandes zur Endprüfung der Asynchronmotoren in Radargeräten

Stichworte

Oberschwingung, Asynchronmotor, Netzrückwirkung, Nutzwertanalyse, Simplorer, LOGO!Soft Comfort, Frequenzumrichter

Kurzzusammenfassung

Die Bachelorthesis behandelt die Neuentwicklung eines automatisierten Prüfplatzes für 14 verschiedene Asynchronmotoren. Die zu prüfenden Motoren befinden sich in einer Leistungsklasse von 70W bis 1000W und werden in Radaren verbaut. Mit der Prüfung soll sicher gestellt werden, dass die in Radaren eingebauten Motoren funktionsfähig und bereit für den Betrieb sind. Zur Festlegung der Realisierungsform des Prüfplatzes werden unterschiedliche Lösungsansätze erarbeitet und einer Nutzwertanalyse unterzogen. Die Variante mit dem besten Nutzwertergebnis wird umgesetzt und hinsichtlich des Einflusses auf die Motoren hin untersucht. Anschließend erfolgt ein Test des Prüfplatzes.

Matthias Lübbe

Title of the paper

New development of an automated engine test stand for the final testing of asynchronous motors in radar equipment

Keywords

harmonic, asynchron motor, system perturbation, benefit analysis, Simplorer, LOGO!Soft Comfort, frequency converter

Abstract

The bachelor thesis deals with the development of a new automated test station for 14 different motors. The engines are tested in a performance from 70W to 1000W and are built in radars. The test is to ensure, that the motors built in radars are operational and ready for operation. To determine the realization form of the test station, will be developed solution options and to subject a benefit analysis. The variant with the best benefit result is implemented and in terms of influence on the engines examined. A check of the test station follows.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Gustav Vaupel für die Betreuung meiner Arbeit. Die mir gewährten Freiheiten ermöglichten ein selbstständiges und interessantes Arbeiten. Gleichfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Jörg Dahlkemper für die freundliche Übernahme der Zweitkorrektur bedanken, Herrn Dipl.-Ing. Sönke Mier der mich mit viel Engagement als betrieblicher Betreuer unterstützte.

Des Weiteren danke ich Katharina Flemming und Dipl.-Wirt.-Ing. Haiko Fries für das Korrekturlesen der Arbeit. Nicht vergessen werden dürfen meine Kollegen in der Arbeitsvorbereitung, die mir mit einer angenehmen und netten Arbeitsumgebung halfen die Arbeit fertig zu stellen. Meinen zahlreichen Kollegen, die mir unterstützend mit Fachwissen zur Seite standen und mir somit die Einarbeitung in die Thematik erleichterten. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, deren Unterstützung ich mir während meines gesamten Studiums sicher sein konnte und die besondere Rücksicht, in der entscheidenden Phase der Thesis, auf mich nahmen.

Diese Arbeit möchte ich meiner vor vier Jahren plötzlich verstorbenen Schwester Anna Lübke widmen. Sie hat mir somit erst dieses Studium ermöglicht.

Verwendete Symbole

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
A	Amplitude	
b	Breite	[m]
C_w	Widerstandsbeiwert	
d	Durchmesser	[m]
f	Frequenz	[Hz]
F	Kraft	[N]
h	Höhe	[m]
I	Stromstärke	[A]
l	Länge	[m]
L	Induktivität	[H]
m	Masse	[kg]
M	Drehmoment	[Nm]
n	Drehzahl	[1/s]
N	Windungszahl	
p	Polpaarzahl	
P	Leistung	[W]
r	Radius	[m]
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[K]
U	Spannung	[V]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
Z	Impedanz	[Ω]
η	Wirkungsgrad	
λ	Wellenlänge	[m]
π	Kreiszahl	3,14159...
ρ	Massendichte	[kg/m ³]
ω	Kreisfrequenz	[1/s]
$\cos \varphi$	Phasenverschiebungswinkel	

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
BRT	Bruttoregistertonne
CPU	central processing unit (Hauptprozessor)
CW-Wert	Strömungswiderstandsbeiwert
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ESD	electro-static discharge (elektrostatische Entladung)
FFT	Fast Fourier Transform (Schnelle Fourier-Transformation)
FU	Frequenzumrichter
GTO-Thyristor	Gate Turn-Off Thyristor (durch das Gate abschaltbarer Thyristor)
HA	Halbautomatisch
HM	Headmarker (Impuls des Radars nach jeder vollen Umdrehung)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
IP	International Protection (Schutzart)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
ITU	International Telecommunication Union (Internationale Fernmeldeunion)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)
PELF	Protective Extra Low Voltage (Funktionskleinspannung mit sicherer Trennung)
PWM	Pulsweitenmodulation
Radar	Radio Detection and Ranging (Funkortung und Funkabstandsmessung)
RCD	Residual Current protective Device (Fehlerstromschutzeinrichtung)
RMS	Root Mean Square (Effektivwert)
ROT 1	Rotationsgeschwindigkeit 1
ROT 2	Rotationsgeschwindigkeit 2
SELF	Safety Extra Low Voltage (Sicherheitskleinspannung)
SIPN	Steuerungstechnisch interpretiertes Petrinetz
TCU	Transmission Control Unit (elektronische Getriebesteuerung)
THD	Total Harmonic Distortion (Gesamte harmonische Verzerrung)
USB	Universal Serial Bus (Bussystem für Computer)
VA	Vollautomatisch
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
1.4	Rahmenbedingungen	4
2	Analyse der Anforderungen	5
2.1	Technische Anforderungen an den Motorenprüfstand	5
2.2	Anforderungsliste an den Motorenprüfstand für die 14 Motoren	7
2.3	Betriebliche Vorgaben	7
2.4	Ist-Zustand der momentanen Prüfvorrichtung	8
3	Realisierungsvarianten des Motorenprüfstandes	10
3.1	Vollautomatische Realisierungsvariante	12
3.1.1	Vollautomatische Variante 1	13
3.1.2	Vollautomatische Variante 2	15
3.1.3	Vollautomatische Variante 3	17
3.2	Halbautomatische Realisierungsvariante	19
3.2.1	Halbautomatische Variante 1	20
3.2.2	Halbautomatische Variante 2	20
3.2.3	Halbautomatische Variante 3	20
3.3	Zusammenfassung der unterschiedlichen Varianten	26
3.4	Nutzwertanalyse der vorgestellten Varianten	26
3.5	Auswertung der gewonnenen Ergebnisse aus der durchgeführten Nutzwert- analyse	27

4	Realisierung des Motorenprüfstandes	32
4.1	Technische Umsetzung	32
4.2	Notwendigkeit der Simulation beim Einsatz eines Frequenzumrichters . . .	33
4.3	Simulation der Auswirkungen des Frequenzumrichters auf die Motoren . .	36
4.4	Auswertung der Simulationssrgebnisse	40
4.5	Schlussfolgerung	44
4.6	Erstellung der technischen Unterlagen	44
5	Funktionsprüfung des Motorenprüfstandes	58
5.1	Inbetriebnahme des Aufbaus	59
5.1.1	Besichtigung	60
5.1.2	Erprobung und Messung	61
5.1.3	Funktionsprüfung	61
6	Exemplarischer Test einer Radaranlage	62
6.1	Testergebnisse der X-Bandradaranlage	63
6.2	Auswirkungen des Frequenzumrichters auf die Messergebnisse	65
7	Verbesserungsvorschlag zum Radar 1100	74
7.1	Ausarbeitung des Verbesserungsvorschlages	75
7.2	Motorendimensionierung	76
7.3	Berechnungen zur Motorendimensionierung	77
7.4	Auswertung der Berechnungen	81
7.5	Klärung der Randbedingungen	81
7.6	Betrachtung der Kosteneffizienz des Umbaus	82
8	Zusammenfassung	84
8.1	Ausblick	84
A	Zusätzliche Informationen	87
A.1	Informationen zu S-Band und X-Band	88

A.2	Informationen zu Dahlandermotoren	89
A.3	Entstehende Problematik beim Einsatz von Frequenzumrichtern	90
A.3.1	Allgemeine Problematik des Frequenzumrichters	90
A.3.2	EMV-Problematik	91
A.4	Eigenkonstruktion eines Transportwagens	92
B	Zeichnungen	93
B.1	LOGO!-Steuerung	94
B.2	Stromlaufpläne	102
B.3	Konstruktionszeichnungen	106
B.4	Liste der eingestellten Parametern	108

Abbildungsverzeichnis

1.1	S-Bandradaranlage und X-Bandradaranlage	2
1.2	Liste der verbauten S- und X-Bandmotoren	3
2.1	Auswahl der verbauten Motoren	6
2.2	momentane Prüfvorrichtung	8
3.1	Hauptkomponenten der VA Variante 1	13
3.2	Hauptkomponenten der VA Variante 3	17
3.3	Hauptkomponenten der HA Variante 1	20
4.1	Grundschiwingung und die dazugehörigen Harmonischen	36
4.2	Simplorermodell für einen Frequenzumrichter	38
4.3	Simplorerresultationsergebnisse des Frequenzumrichters	39
4.4	Signale aus der Simulation des Frequenzumrichters	41
4.5	Effektivwert und Amplitude vom PWM-Signal des Frequenzumrichters	41
4.6	FFT-Analyse des Eingangstromes	43
4.7	FFT-Analyse der Lastspannung	43
4.8	Flussdiagramm des Prüfablaufs	45
4.9	Flussdiagramm der Motorenauswahl	46
4.10	SIPN der Logosteuerung	47
4.11	grobe Übersicht eines Teils der Logosteuerung	54
4.12	Stromlaufpläne	56
4.13	AutoCad-Zeichnungen	57
5.1	Neu entwickelter Motorenprüfstand	58
5.2	Schaltkasten des neu entwickelten Motorenprüfstandes	59

6.1	X-Bandradaranlage ohne Antenne	62
6.2	Prüfergebnisse der X-Bandradaranlage Teil A	63
6.3	Prüfergebnisse der X-Bandradaranlage Teil B	64
6.4	Anlaufströme der X-Bandradaranlage	67
6.5	Strom am Motor des Motorenprüfstandes	68
6.6	Spannung am Motor des Motorenprüfstandes	69
6.7	Strom Netzseitig des Motorenprüfstandes	70
6.8	Spannung Netzseitig des Motorenprüfstandes	71
6.9	Strom am Motor der alten Prüfvorrichtung	72
6.10	Spannung am Motor der alten Prüfvorrichtung	73
7.1	horizontale Windströmung	76
7.2	vertikale Windströmung	77
7.3	Drehmoment an der Antennenachse über den Antennenwinkel	79
7.4	Nenn Drehmoment an der Motorachse über den Antennenwinkel	80
7.5	Motorantriebsleistung über den Antennenwinkel	80
A.1	Prinzipaufbau einer Radaranlage	88
A.2	Polumschaltbarer Motor mit Dahlanderwicklung	89

Tabellenverzeichnis

3.1	Kostenaufstellung für VA Variante 1	14
3.2	Kostenaufstellung für VA Variante 2	16
3.3	Kostenaufstellung für VA Variante 3	18
3.4	Kostenaufstellung für HA Variante 1	21
3.5	Kostenaufstellung für HA Variante 2	22
3.6	Kostenaufstellung für HA Variante 3	23
3.7	Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen der vollautomatischen Varianten	24
3.8	Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen der halbautomatischen Varianten	25
3.9	Nutzwertanalyse der möglichen Realisierungsformen	28
3.10	Stückliste des Motorenprüfstandes	31
4.1	Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen der Geräteklasse A, bei einem Eingangsstrom < 16A nach VDE 0838 Teil 2	35
4.2	Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen der Spannung in Niederspannungsnetzen nach VDE 0839 Teil 2	35
6.1	Stromwerte für den X-Bandradarmotor dreiphasig 400V/50Hz	66
7.1	Gewichtsänderung der X-Bandradaranlage	81
7.2	Kostenaufstellung des Verbesserungsvorschlages	82
7.3	Gewinn des Verbesserungsvorschlages	83
A.1	Frequenzbänder von S- und X-Band	88
A.2	Stückliste für die Fertigung des Transportwagens	92
B.1	veränderte Parameter	108

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Die momentane Prüfung der Radaranlagen findet mit einer etwa 20 Jahre alten Vorrichtung statt. Auf Grund des technischen Alters der Prüfvorrichtung und fehlender Dokumentation, besteht die Notwendigkeit eines Neubaus. Falls die Prüfvorrichtung einen Schaden erleidet oder anderweitig ausfällt, kann niemand anhand von technischen Unterlagen eine Reparatur oder Fehlersuche betreiben. Aus diesen Gründen wird eine neue Vorrichtung entworfen, die den aktuellen Sicherheitsstandards entspricht und einen sicheren Prüfablauf ermöglicht. Jeder Mitarbeiter soll anhand einer kurzen Einführung die Prüfung der Radaranlagen nach der vorhandenen Prüfanweisung durchführen können. Darüber hinaus ist SAM Electronics GmbH nach DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert. Dadurch verpflichtet sich das Unternehmen an einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess teilzunehmen. Dies beinhaltet alle Prozesse an denen das Unternehmen beteiligt ist. Angefangen von organisatorischen Prozessen und Abläufen bis hin zu Geräten und Werkzeugen. Zu letzterem gehört unter anderem ein Motorenprüfstand.

1.2 Zielsetzung

Das von SAM Electronics vertriebene Produkt “Radar 1100” dient zur Navigationshilfe in der Schifffahrt. Je nach Größe des Schiffes, muss jedes Schiff ein oder mehrere Radaranlagen besitzen. So brauchen Schiffe ab einer Größe von 300 Bruttoregistertonnen (BRT) mindestens eine X-Bandradaranlage¹. Schiffe über 3000 BRT benötigen zusätzlich eine S-Bandradaranlage[18]. Je nach Klassifizierungsgesellschaft müssen dann die Radaranlagen redundant ausgelegt sein. Auf Grund der unterschiedlichen Frequenzbänder und damit verbundenen Wellenlänge, sind die Antennen (auch Scanner genannt) der Radaranlagen unterschiedliche dimensioniert. Dadurch bedingt wird für die S-Bandradaranlagen eine höhere Motorleistung benötigt, um die Antenne anzutreiben. Des Weiteren kann der Kunde je nach seinen Bordnetzanforderungen einen passenden Motor auswählen. Insgesamt sind das sieben verschiedene Motortypen für X-Bandradaranlagen und sieben verschiedene Motortypen für S-Bandradaranlagen. Insgesamt müssen somit 14 verschiedene Motoren(siehe Abbildung 1.2) mit dem Motorenprüfstand geprüft werden können. Eine Prüfung der Motoren soll möglich sein, bevor die Motoren verbaut wurden und im eingebauten Zustand, also in Verbindung mit dem Getriebe. Die Prüfung dient der Endkontrolle und hilft fehlerhafte Motoren zu erkennen. Zu den Fehlern zählen zum Beispiel, Beschädigungen der Isolation, Wicklungsfehler oder falsch angeklebte Wicklungen. Mit Hilfe des Motorenprüfstandes können kostspielige Serviceeinsätze an Bord des Schiffes vermieden und eine Qualitätsverbesserung der Produkte gewährleistet werden. Nachfolgend ist eine Abbildung der S-Bandradaranlagen und X-Bandradaranlagen zu sehen. Danach folgt eine Abbildung der verfügbaren Motoren. Die 115V-Motoren sind aus dem Sortiment genommen.



Abbildung 1.1: S-Bandradaranlage (große Antennen) und X-Bandradaranlage (kleine Antennen)

¹nähere Informationen zu S- und X-Band im Anhang A1

Antenna Motor (F1...F3), Heating (F4)

X-Band

Mains supply	Nom. current /A	Power/W	Fuse F1...F3/A (slow blow)	F4/A (slow blow)	rpm (nom.)	Motor
1-ph/115 V 50 Hz	1.6	100	6.3	2	1430	Asynchronous motor (1X14PD2511550)
1-ph/115 V 60Hz	1.5	100	6.3	2	1730	Asynchronous motor (2X14PD2511560)
1-ph/230 V 50 Hz	0.8	70	4	2	1430	Asynchronous motor (3X14PD2523050)
1-ph/230 V 60 Hz	0.8	70	4	2	1730	Asynchronous motor (4X14PD2523060)
3-ph/230 V 50 Hz	1.15/0.55	180/70	6.3	2	2700/ 1450	Dahlander Asynchr. motor (5X32/4PD2523050)
3-ph/230 V 60 Hz	1.05/0.52	180/70	6.3	2	3330/ 1750	Dahlander Asynchr. Motor (6X32/4PD2523060)
3-ph/400 V 50 Hz ¹⁾	0.65/0.32	180/70	4	2	2700/ 1450	Dahlander Asynchr. motor (7X32/4PD2540050)
3-ph/400 V 60 Hz	0.60/0.30	180/70	4	2	3330/ 1750	Dahlander Asynchr. motor (8X32/4PD2540060)

¹⁾ also 3-ph/440 V, 60 Hz

S-Band

Mains supply	Nom. current/ A	Power/W	Fuse F1...F3/A (slow blow)	F4 (slow blow)	rpm (sync.)	Motor
1-ph/115 V 50 Hz	11	900	16	2	1430	Asynchronous motor (1S14PD2911550)
1-ph/115 V 60 Hz	11	900	16	2	1740	Asynchronous motor (2S14PD2911560)
1-ph/230 V 50 Hz	5.5	900	10	2	1430	Asynchronous motor (3S14PD2923050)
1-ph/230 V 60 Hz	5.5	900	10	2	1730	Asynchronous motor (4S14PD2923060)
3-ph/230 V 50 Hz	4.2/3.2	1000/750	10	2	2890/ 1450	Dahlander Asynchr. motor (5S32/4PD2923050)
3-ph/230 V 60 Hz	3.8/3.1	1000/750	10	2	3520/ 1760	Dahlander Asynchr. motor (6S32/4PD2923060)
3-ph/400 V 50 Hz ¹⁾	2.4/1.9	1000/750	6.3	2	2890/ 1450	Dahlander Asynchr. motor (7S32/4PD2940050)
3-ph/400 V 60 Hz	2.2/1.75	1000/750	6.3	2	3510/ 1760	Dahlander Asynchr. motor (8S32/4PD2940060)

¹⁾ also 3-ph/440 V, 60 Hz

Abbildung 1.2: Liste der verbauten S- und X-Bandmotoren aus dem Technical Manual RADARPILOT 1000

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 findet eine Analyse der Anforderungen statt. Dort ist der Funktionsumfang des Motorenprüfstandes definiert. Das Kapitel 3 beinhaltet eine Vorstellung der möglichen Lösungsvarianten, um den Motorenprüfstand zu realisieren. Dafür werden Komponenten exemplarisch vorgeschlagen und die dazugehörigen Marktpreise ermittelt. Unter Berücksichtigung der zuvor erstellten Anforderungen wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Im Kapitel 4 ist die Realisierung des Motorenprüfstandes behandelt. Dies beinhaltet die Erstellung von Stromlaufplänen, Konstruktionszeichnungen, der Steuerungsentwurf und die Umsetzung. Das Kapitel 5 beinhaltet die Funktionsprüfung des Motorenprüfstandes. Darin ist zusätzlich eine Simulation enthalten, in welcher der Einfluss des Motorenprüfstandes auf die Motoren simuliert wird. Danach folgen die messtechnische Überprüfung der Simulationsergebnisse sowie ein exemplarischer Test einer Radaranlage in Kapitel 6. Das folgende Kapitel 7 beschäftigt sich mit einer Verbesserungsmöglichkeit der Radaranlage. Dies ermöglicht es, den Motorenprüfstand zu vereinfachen. Abschließend ist im Kapitel 8 eine Zusammenfassung zu finden, in der die gewonnen Ergebnisse sowie ein Ausblick aufgeführt sind.

1.4 Rahmenbedingungen

Das Motorenprüfgerät wird im Produktionsbereich der SAM zum Einsatz kommen. Dort herrschen klimatisierte und saubere Arbeitsbedingungen. Somit bestehen keine besonderen Anforderungen an den Schutzart (IP). Das Spannungsnetz in der Fertigung ist ein 400V TN-C-S Drehstromsystem. Von einer 16A Drehstromsteckdose kann die benötigte Versorgungsspannung für den Motorenprüfstand entnommen werden. Es existiert kein definierter Endtermin, bis wann der Motorenprüfstand einsatzbereit sein sollte. Diese Situation ermöglicht eine gründlichere und intensivere Einarbeitung in das Thema. Die Lösungsansätze können besser ausgearbeitet werden und es nimmt den Druck auf eine zeitnahe Fertigstellung des Motorenprüfstandes. Die benötigten Komponenten und Materialien sowie das vorhandene Budget zur Beschaffung der Komponenten werden nach Fertigstellung der Nutzwertanalyse bestimmt.

Kapitel 2

Analyse der Anforderungen

2.1 Technische Anforderungen an den Motorenprüfstand

An das neu zu entwerfende Motorenprüfgerät werden verschiedenartige Anforderungen gestellt. Zunächst soll es alle Prüfanforderungen der existierenden Prüfanweisung für Getriebe GR3040PA¹ und GR3041PA² erfüllen. Der Motorenprüfstand soll die in der Produktion verwendeten Motoren prüfen. Dazu zählt die Prüfung der Motoren bevor sie in das Getriebe eingebaut werden und im bereits eingebauten Zustand in der Radaranlage, wenn die Motoren mit dem Getriebe verbunden sind. Darunter fallen nach der Auswahl des verbauten Motortyps die Prüfung des Anlaufstromes sowie der Strom bei Betriebsart ROT1 (Stufe 1) und ROT2 (Stufe 2 nur für dreiphasige Motoren). Bei dreiphasigen Motoren ist zusätzlich auf Schiefelast im Anlauf sowie im Betrieb des Motors zu achten. Die Sollwerte für die jeweiligen Motorströme sind vom Hersteller der Dahlandermotoren bekannt. Die Abkürzung ROT1 und ROT2 steht dafür, dass damit der verwendete Dahlandermotor, mit Hilfe von Schützen, in seinen Wicklungen umgeschaltet wird. Wobei ROT1 für den langsam laufenden Betrieb steht und ROT2 für den schnell laufenden Betrieb. Des Weiteren werden vom Getriebe zwei Sensorsignale zurückgegeben, welche ausgewertet werden müssen. Ein Headmarker-Impuls wird einmal pro Umdrehung der Radarantenne von einer Lichtschranke geliefert. Die Azimut-/Pulsersignale kommen bei S-Bandradaranlagen von einem induktiven Sensor, welcher die Zähne der Zahnräder abtastet. Pro Umdrehung sind es 72 Flankenwechsel. Bei X-Bandradaranlagen hingegen liefert die Pulse eine Lichtschranke, welche eine Lochscheibe abtastet. Es sind 415 Pulse pro Umdrehung[14]. Die vorgegebene Antennendrehzahl bei S-Bandradaranlagen und bei X-Bandradaranlagen beträgt bei ROT1 24U/min und bei ROT2 48U/min[13]. Diese Drehzahl wird durch ein jeweils unterschiedliches Übersetzungsverhältnis erreicht. Wenn 50Hz-Motoren eingesetzt werden ist diese kleiner als wenn 60Hz-Motoren eingesetzt werden. Wünschenswert wäre eine Kontrolle der Umdrehungszahl. Zumindest muss die Überprüfung der beiden Signale erfolgen, ob die Impulse geliefert werden. Außerdem wird vom Motorenprüfstand erwartet, dass dieser leicht und einfach zu den Radaranlagen zu transportieren ist. Die momentane Prüfvorrichtung wiegt 80kg und ist mit schwergängigen Transportrollen zu bewegen.

¹Prüfanweisung für X-Bandradaranlagen

²Prüfanweisung für S-Bandradaranlagen

Da das zu entwerfende Motorprüfgerät mobil sein soll, muss generell auf die elektromagnetische Verträglichkeit geachtet werden. Elektrostatische Entladungen dürfen zum Schutz elektronischer Bauteile und Personen nicht auftreten. Diese könnte durch walken der Gummiereifung der Räder an den Lagern beim Schieben des Motorenprüfstandes, auftreten. Eine technisch unwichtige Anforderung ist das Design des Motorprüfstandes. Allerdings es sollte nicht nur allen technischen Anforderungen genügen, sondern auch den repräsentativen Erscheinungsbild eines modernen und technisch fortschrittlichen Unternehmens gerecht werden.

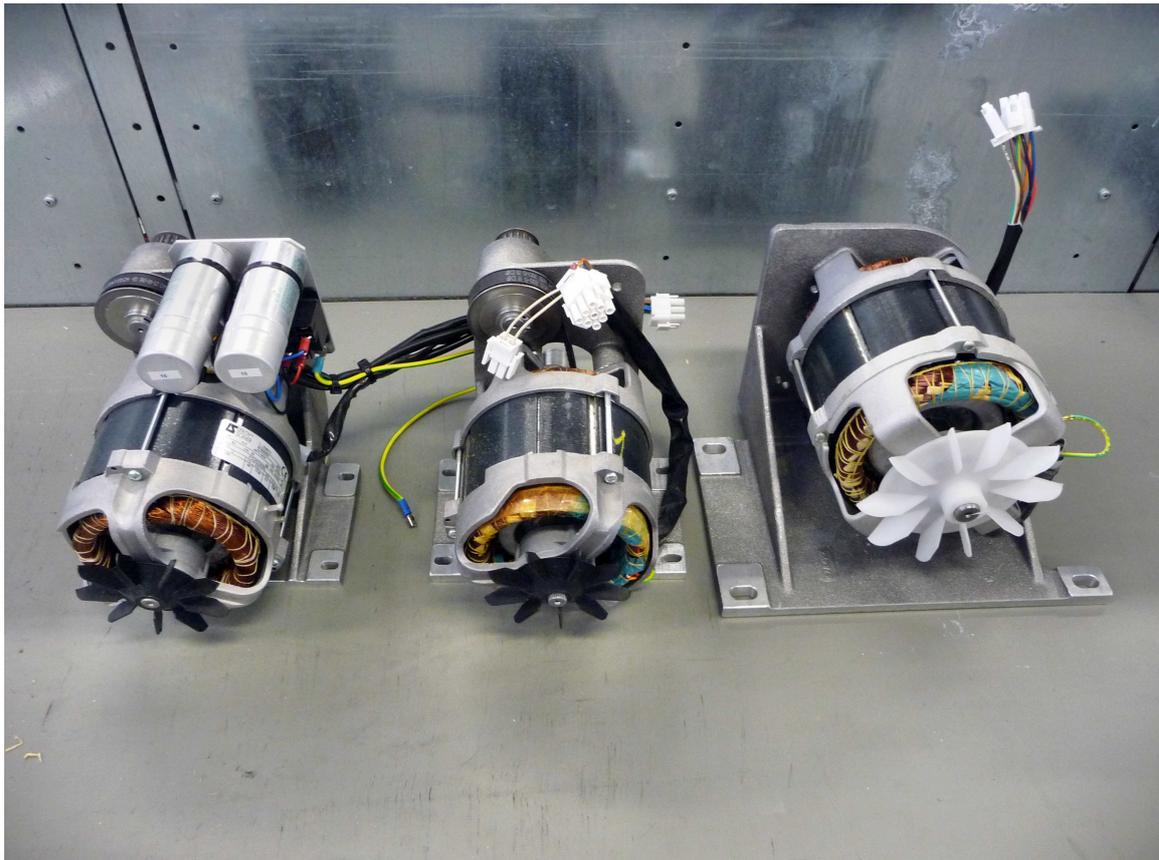


Abbildung 2.1: Auswahl der verbauten Motoren: links X-Bandmotor (70W) 1x230V/50Hz; mitte X-Bandmotor (180W) 3x400V/50Hz; rechts S-Bandmotor (1000W) 3x400V/50Hz

2.2 Anforderungsliste an den Motorenprüfstand für die 14 Motoren

Nachfolgende Anforderungen bestehen an den Motorenprüfstand.

- Anlaufströme messen und überprüfen,
- Betriebsströme für ROT1 und ROT2 messen und überprüfen,
- Headmarker-Impuls überprüfen,
- Azimut-/ Pulsersignal und die Umdrehungszahl überprüfen.

2.3 Betriebliche Vorgaben

Für die Realisierung der in Kapitel 2.2 genannten Anforderungen sind keine Einschränkungen vorhanden. Es kann frei aus dem Angebot diverser Hersteller zurückgegriffen werden. Dies ist notwendig, da unterschiedliche Lösungsansätze ausgearbeitet werden sollen, die der Entscheidungsfindung dienen. Die spätere technische Lösung sowie Nutzwertanalyse bestimmt welches Konzept zu favorisieren ist. Eine weitere Vorgabe ist es die Kosten gering zu halten. Des Weiteren wird ein automatisierter Prüfablauf angestrebt, um Bedienfehler und Prüfzeiten zu minimieren. Ein vorher zu erstellender Prüfablaufplan wird bei den Entwicklungsarbeiten helfen.

2.4 Ist-Zustand der momentanen Prüfvorrichtung



Abbildung 2.2: momentane Prüfvorrichtung

Pro Jahr werden zwischen 400 und 800 S-Bandradaranlagen und X-Bandradaranlagen gefertigt und geprüft. Dies geschieht, wie in Kapitel 1.1 erwähnt, mit einer zirka 20 Jahre alten Prüfvorrichtung. Die Prüfvorrichtung kann die Phasenströme im Betrieb des Motors messen. Dazu verbindet der Prüfer zwei Stecker mit dem Anschlussterminal der Radaranlage. Das ist zum einem die Versorgungsspannung, je nach Modell einphasig oder dreiphasig und die Steuerleitungen für die jeweiligen Funktionen der Radaranlage. Nachdem der Prüfer die jeweils erforderliche Versorgungsspannung über einen Stelltrafo eingestellt und diesen Wert auf einem analogen Spannungsmessgerät überprüft hat, kann er die jeweiligen Betriebsströme ablesen. In einem nächsten Schritt werden die gemessenen Daten mit den Herstellerangaben verglichen. Die Ströme werden für jede Phase mit jeweils einem analogen Strommessgerät für die S-Bandradaranlagen und X-Bandradaranlagen gemessen. Dies ist notwendig, da die Messbereiche für die Ströme unterschiedlich groß sind, um eine möglichst hohe Auflösung zu liefern. Bei X-Bandradaranlagen betragen die Ströme maximal 0,8A und bei S-Bandradaranlagen 5,5A.

²Angaben aus der Datenbank von SAP

Gefordert wird auch die Prüfung des Anlaufstromes. Dieser ist nur bedingt mit den analogen Messgeräten darstellbar. Hingegen ist die Ermittlung der Ströme für die Geschwindigkeiten ROT1 sowie ROT2 ausreichend. Die Umschaltung zwischen den beiden Geschwindigkeitsstufen erfolgt mittels Kippschalter. Auf einem Oszilloskopbildschirm wird auf zwei Kanälen jeweils der Headmarker-Impuls und das Azimut-/Pulsersignal dargestellt. Dadurch wird die Kurvenform der beiden Signale deutlich. Auf die geforderte Umdrehungszahl von 24U/min bei ROT1 und 48U/min bei ROT2 kann nur bedingt geschlossen werden. Es wird nur überprüft, ob die beiden Signale anliegen und die Sensoren Signale liefern. Vorhandene Probleme, die durch den neuen Motorenprüfstand erkannt werden sollen, sind:

- Ablesefehler bei den analogen Messgeräten,
- unzureichende Bestimmung des Anlaufstromes,
- Ablesefehler in der Tabelle, ob der zulässige Strom eingehalten wird,
- HM-Impuls kann zwar erkannt werden, aber nicht die Umdrehungszahl,
- Azimut-/Pulsersignal kann erkannt werden, eine Drehzahlbestimmung ist nicht möglich.

Die momentane Prüfzeit pro Radaranlage beträgt 2,5 Minuten. Dies beinhaltet die Verbindungsherstellung mit den notwendigen Steckverbindungen zwischen Radaranlage und Prüfgerät, das Einstellen der jeweiligen Versorgungsspannung laut Tabelle³, die Auswahl des zu prüfenden Motortyps, das Kontrollieren der einzuhaltenden Phasenströme und das Ablesen des Oszilloskopbildschirmes.

³Tabelle befindet sich in GR3040PA und GR3041PA

Kapitel 3

Realisierungsvarianten des Motorenprüfstandes

Um eine Auswahl über mögliche Realisierungsformen treffen zu können, muss aus der Anforderungsliste¹ und den Rahmenbedingungen², eine minimale Systemvoraussetzungsliste der Komponenten erstellt werden. Damit eine Prüfung der Radaranlagen durchgeführt werden kann, wird eine Betriebsspannung von dreiphasen Drehstrom mit 400V/50Hz benötigt. Diese Spannung ist ausreichend, um alle Motorenspannungen zu erzeugen. Es werden zukünftig digitale Anzeigeelemente für Strom und Spannung verwendet, damit mögliche Ablesefehler durch einen falschen Blinkwinkel auf die Anzeigen vermieden werden.

Viele Stromversorgungsgeräte können mit einer externen Steuerung bedient werden. So kann zum Beispiel die Ausgangsspannung des Stromversorgungsgerätes mit einem Analogwert eingestellt werden. Um die unterschiedlichen Motorenspannungen vorzugeben, benötigt die Steuerung einen analogen Ausgang. Der Forderung das Azimut-/Pulsersignal und den HM-Impuls zu überprüfen, kann mit zwei digitalen Eingängen, welche mit einer Frequenz von mindestens 332Hz abtasten [14], nach gekommen werden. Das Azimut-/Pulsersignal tritt häufiger auf. Nach folgender Formel wird die Abtastrate berechnet.

$$\frac{48 \frac{u}{min.}}{60s} \cdot 415 \frac{Pulse}{u} = 332 \frac{Pulse}{sec.} \quad (3.1)$$

¹siehe Kapitel 2.2

²siehe Kapitel 1.4

Die Anzahl der digitalen Eingänge kann sich je nach Steuerungsprinzip erhöhen. Dies wird bei der Vorstellung der möglichen Realisierungsmöglichkeiten in den nächsten Abschnitten deutlich. Dies ist der Fall wenn zum Beispiel zusätzliche externe Taster angeschlossen werden wie Ein- oder Austaster. Mit diesen könnte die Steuerung Ein- oder Ausgeschaltet werden. Die Steuerung der Radaranlage benötigt ein 24V Startsignal ("24V für TCU") und eine Geschwindigkeitsvorgabe, ob auf ROT1 oder ROT2 geschaltet werden soll. Mit diesem Signal wird die Polumschaltung im Dahlandermotor gesteuert. Um diese drei Funktionen zu realisieren, werden mindestens drei digitale Ausgänge benötigt. Insgesamt ergeben sich daraus folgende Minimalanforderungen:

- eins analoger Ausgang,
- zwei digitale Eingänge (Abtastrate mindestens 332Hz),
- drei digitale Ausgänge.

Unter Berücksichtigung der minimalen Systemvoraussetzungen werden nun Varianten zur Realisierung eines Motorenprüfstandes erarbeitet. Anschließend folgt eine Nutzwertanalyse, um abzuwägen welche Variante sich am besten für die Umsetzung eignet und alle Anforderungen erfüllt. Die folgenden Kostenaufstellungen sind zirka Nettopreise ohne Berücksichtigung von Firmenrabatten. Zusätzlich werden noch Kleinteile, Leitungen und Sicherheitselemente wie Not-Aus, Fehlerstromschutzeinrichtung (RCD) benötigt, welche nicht detailliert aufgelistet werden.

3.1 Vollautomatische Realisierungsvariante

Eine vollautomatische Variante hat den Vorteil, dass die gesamte Prüfung ohne externes menschliches Eingreifen erfolgt. Dies reduziert Fehlerquellen erheblich. Um die gewünschte Spannungsversorgung für den Motor bereitzustellen wird ein programmierbares Stromversorgungsgerät verwendet. Damit können sowohl Frequenzen wie auch die benötigten Spannungen variabel eingestellt werden. Gleichzeitig ermöglichen Stromversorgungsgeräte einen vorprogrammierten Prüfablauf zu implementieren. Die Messung von Phasenspannungen, Phasenströmen sowie Leistungen ist bereits integriert. Ein weiterer Vorteil des Stromversorgungsgerätes ist der integrierte Überlastschutz sowie die Kurzschlussfestigkeit. Dies erlaubt es, bis auf Leitungsschutzschalter, auf zusätzlich Absicherungen zu verzichten. Für die Steuerung und Visualisierung des Motorenprüfstandes dient ein Laptop mit dem Betriebssystem Windows XP. Dieses Betriebssystem ist weit verbreitet und wird von vielen Softwareanwendungen unterstützt. Insbesondere das vorgesehene Steuerungsprogramm LabView ist unter XP lauffähig. Mit dem Laptop können die Bedienung des Prüfstandes sowie die Programmierung der Steuerungssoftware realisiert werden. Die Radaranlage benötigt Steuerbefehle und gibt wie in Kapitel 2.1 erwähnt zwei Sensorsignale aus, welche überprüft werden müssen. Dafür wird ein Interface verwendet, welches als ein USB Optokoppler Relaismodul ausgeführt sein kann. Es dient als Verbindungsstück zwischen der Radaranlage und der Steuerung. Dieses ist notwendig, um die Steuerung von Kurzschlüssen und ähnlichen unerlaubten Betriebszuständen zu schützen und die notwendige Steuerspannung von 24V für die Radaranlage bereit zu schalten. Für die Erzeugung der Steuerspannung von 24V, wird ein Labornetzgerät verwendet. Dieses ist kurzschlussfest und benötigt keine zusätzliche Absicherung. Alternativ ist auch die Verwendung eines Festspannungsnetzgerätes möglich.

Mit der vollautomatischen Variante sind somit Bedienungs- und Handhabungsfehler auf ein Minimum reduziert. Die einzige Fehlerquelle ist nun das fehlerhafte Einstellen des Motorentyps. Dies würde jedoch zu einer ungültigen Prüfung führen. Somit sind alle Fehlerursachen durch den Bediener beseitigt.

In Kapitel 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3 folgen verschiedene Ausführungen eines vollautomatisierten Prüfablaufes. Im Internet sind Hersteller ausfindig gemacht, die die in Kapitel 2.2 genannten Anforderungen erfüllen. Preise für die Komponenten wurden beim jeweiligen Hersteller erfragt oder auf Websites von Händlern übernommen.

3.1.1 Vollautomatische Variante 1

Das Stromversorgungsgerät ist bei gleichem Leistungsangebot im Vergleich zu anderen Herstellern am günstigsten. Die maximale Leistung der zu prüfenden Motoren beträgt 1kW. Ein Anlaufstrom von $10A^3$ ist dabei durchaus möglich [1]. Dafür ist die Leistung des Stromversorgungsgerätes mit 4,5kW ausreichend. Das Labornetzgerät hat einen großen einstellbaren Spannungsbereich und kann einen für die Anforderung ausreichend großen Strom liefern. Dies ist sinnvoll, falls es zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Erweiterung der Anlage kommt. Der Laptop ist für Industrieinsätze geeignet und ist für die in der Produktion gegebenen Arbeitsbedingungen ausgelegt. Andere Hersteller liefern ähnliche Geräte in der gleichen Preiskategorie. Daher gibt es keine besonderen Gründe, für die Entscheidung, zu einem bestimmten Hersteller zu tendieren. Das Interface ist das Einzige, welches die Anforderung erfüllt und in dem Relais verbaut sind. Diese können einen größeren Strom schalten als Transistoren. Sind aufgrund des mechanischen Aufbaus aber langsamer, was die Schaltzeiten betrifft. Da die notwendigen Schaltzeiten vernachlässigbar lang sind, ist dies kein Nachteil. Ein Transportwagen, um den Ansprüchen der Mobilität gerecht zu werden, kann von einer Hamburger Firma geliefert werden. Dieser ist variabel anpassbar und besitzt Rollen die auf elektrostatische Entladung (ESD) geprüfte sind. Somit sind ausreichende Ablagefächer für die verwendeten Komponenten vorhanden.



Abbildung 3.1: Hauptkomponenten der VA Variante 1, links Stromversorgungsgerät; mitte Laptop; rechts Interface

³laut Tabellenbuch[1] kann der Anlaufstrom von Asynchronmotoren $7 \cdot I_N$ betragen

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Stromversorgungsgesetzgerät	California Instruments	4500Ls-400	17.182,00	3x1500VA/ 3x270VAC/11,1A
2	Labornetzgerät	Voltcraft	VLP-1405 PRO	201,11	2 Ausgänge 0-40 V/DC 0-5A 3-6V/DC max. 2A
3	Laptop	DELL	Vostro V1520	359,00	Intel Celeron Processor 900 (2.20GHz, 800MHz FSB,1MB L2 cache), 1024 MB Arbeitsspeicher mit 800 MHz DDR2,15,4-Zoll-WXGA-LED-Display mit reflexionsarmer Beschichtung, 160-GB-Serial ATA-Festplatte (5.400 1/min),Integrierte GMA X4500 HD-Grafikkarte
4	Interface	QUANCOM	USBOPTOREL8	308,21	8 Eingängen und 8 Relais,12V-30V
5	Trans-portwagen	TRESTON	WTR 140 Universalwagen	999,99	TxBxH: 650 x 650 x 1415; 150 kg
Summe: ⁴				19.050,31	

Tabelle 3.1: Kostenaufstellung für VA Variante 1

⁴Preise: Stand 06.05.2010

3.1.2 Vollautomatische Variante 2

Die Variante 2 ist günstiger als Variante 1. Dies liegt vor allem daran, dass das Stromversorgungsgerät eine geringere Leistung besitzt und somit einen geringeren Strom treiben kann. Dieser liegt unter dem möglichen Anlaufstrom des leistungsstärksten Motors von 1kW. Dies ist jedoch nicht problematisch, da das Stromversorgungsgerät für eine Sekunde, eine erhöhte Stromabgabe von bis zu 15A ermöglicht⁵. Das Festspannungsnetzgerät ist ebenso leistungsschwächer. Statt einem fertigen Transportwagen, wird eine Eigenentwicklung aus Aluminiumprofilen verwendet. Damit ist die Konstruktion des Motorenprüfstandes flexibler und günstiger als der Fertigungsbau. Durch zusätzlichen Fertigungsaufwand würde die Realisierung mehr Zeit in Anspruch nehmen. Unten folgt die Kostenaufstellung.

⁵Angabe aus dem Datenblatt

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Stromversorgungsgerät	California Instruments	2253i/iX	11.069,00	2250VA/ 300V/3,25A
2	Festspannungsnetzgerät	Voltcraft	FSP 2410	98,71	24 - 29 V/DC Ausgangsstrom max. 10 A
3	Laptop	DELL	Vostro V1520	359,00	Intel Celeron Processor 900 (2.20GHz, 800MHz FSB,1MB L2 cache), 1024 MB Arbeitsspeicher mit 800 MHz DDR2,15,4-Zoll-WXGA-LED-Display mit reflexionsarmer Beschichtung, 160-GB-Serial ATA-Festplatte (5.400 1/min),Integrierte GMA X4500 HD-Grafikkarte
4	Interface	QUANCOM	USBOPTOREL8	308,21	8 Eingängen und 8 Relais,12V-30V
5	Transportwagen	SMT	Eigenbau	419,29	siehe Anhang A4

Summe:⁶ 12.254,21

Tabelle 3.2: Kostenaufstellung für VA Variante 2

⁶Preise: Stand 06.05.2010

3.1.3 Vollautomatische Variante 3

Die Variante 3 stellt ein völlig anderes Konzept dar. Als Stromversorgung wird ein Frequenzumrichter verwendet. Dieser kann auf die jeweilige Motorenspannung eingestellt werden. Die Steuerung übernimmt nun nicht mehr der Laptop, sondern eine LOGO!. Die LOGO! ist eine reduzierte Variante einer speicherprogrammierbaren Steuerung. Reduziert sind dabei der Hauptprozessor (CPU), der Speicher und die Ein- sowie Ausgänge. Andere Hersteller bieten ähnliche Produkte an. Die Vorteile der LOGO! gegenüber dem Laptop sind die schnellere Einsatzbereitschaft und ein zuverlässigerer Programmablauf. Ein Laptop benötigt durch den Bootvorgang mehr Zeit, um Bereit für eine Prüfung zu sein. Des Weiteren sind Betriebssysteme fehleranfällig und können abstürzen. Da nun die Ströme nicht vom Stromversorgungsgerät gemessen werden können, sind Stromwächter notwendig. Diese liefern einen analogen Messwert in Form von normierten Signalen. Dies kann ein Strom von 4...20mA oder eine Spannung von 0...10V sein. Die Hersteller unterscheiden sich nicht stark in Preis/Leistung. Ebenso gut kann auch ein Stromwächter verwendet werden. Um die Ströme überwachen zu können, werden zusätzlich zu den zwei digitalen Eingängen, drei analoge Eingänge benötigt. Dies ist mit der LOGO! möglich da Standardmäßig von den acht Eingängen, vier als analoge verwendet werden können. Die digitalen Eingänge können mit 5kHz abtasten was der Forderung nachkommt, das Azimut-/Pulsersignal zu kontrollieren. Für den analogen Ausgang ist ein Erweiterungsmodul nötig, standardmäßig sind keine analogen Ausgänge vorhanden. Der analoge Ausgang ist notwendig, um einen Steuersollwert für den Frequenzumrichter vorzugeben. Dadurch kann die benötigte Motorenspannung eingestellt werden. Statt der LOGO! könnte auch ebenso die Easy verwendet werden. Das Paket mit Software und LOGO! wird jedoch günstiger angeboten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Klärungsbedarf besteht, ob der Frequenzumrichter jeweils mit einem dreiphasigen Motor und einem einphasigen Motor betrieben werden kann. Wenn der Frequenzumrichter dies nicht kann, muss ein zweiter verbaut werden, der nur für Einphasenmotoren verwendet wird. Viele Hersteller weisen in den technischen Handbüchern darauf hin, dass ihre Frequenzumrichter keine stark ausgeprägte unsymmetrische Belastungen der Phasen vertragen. Dies wäre der Fall, wenn nur eine Phase am Ausgang des Frequenzumrichters angeschlossen wird, statt drei.



Abbildung 3.2: Hauptkomponenten der VA Variante 3, links Frequenzumrichter; mitte LOGO! mit Textdisplay; rechts Stromwächter

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Frequenzumrichter	California Instruments	SD25309	500,00	Volt:400 (3Ph); Amp.:9,0; KW:4,0;mit Netzfilter
2	Festspannungsnetzgerät	Voltcraft	FSP 2410	98,71	24 - 29 V/DC Ausgangsstrom max. 10 A
3	Steuerung	SIEMENS LOGO!	TD NEWS BOX 12/24V 0BA6 DE	296,31	8 Eingänge davon 4 Analog; 4 Relaisausgänge
4	Steuerungserweiterung	SIEMENS LOGO!	digitale Erweiterung	74,97	4 Eingänge; 4 Relaisausgänge
5	Steuerungserweiterung	SIEMENS LOGO!	analoge Erweiterung	126,00	2 analoge Ausgänge
6	Stromwächter	Weidmüller	WAZ1 CMA 1/5/10A ac	3 · 161,00	transformatorisch;Ie=0...10A AC; Ausgang:0(4)...20 mA; =0...10 V
7	Transportwagen	SMT	Eigenbau	419,29	siehe Anhang A4
Summe: ⁷				1998,28	

Tabelle 3.3: Kostenaufstellung für VA Variante 3

⁷Preise: Stand 06.05.2010

3.2 Halbautomatische Realisierungsvariante

Ein anderer Lösungsansatz stellt ein halbautomatischer Prüfablauf dar. Der wesentliche Unterschied besteht in der Bereitstellung der Motorenspannung. Diese wird mit einem Stelltransformator realisiert. Dafür muss die notwendige Spannung mit einem Handrad eingestellt werden. Der Nachteil ist, die fehlende Einstellungsmöglichkeit einer Frequenz von 60Hz für die Motoren. Dies könnte durch Umrechnung kompensiert werden.

Zum Beispiel: $\frac{440V}{60Hz} = \frac{366,67V}{50Hz}$ (eine Erklärung folgt unten)

Eine halbautomatische Variante verringert den Automationsgrad und verlangt somit für den Prüfvorgang zusätzliches Eingreifen von extern. Dadurch werden zusätzliche Fehlerquellen geschaffen. Aus diesen Gründen ist ein halbautomatischer Prüfablauf in vielen Anwendungsfällen unerwünscht. An dieser Stelle wird er dennoch in die Betrachtung miteinbezogen.

Für die Steuerung wird eine LOGO! mit zusätzlichem, vergrößertem Bedien- und Anzeigeelement verwendet. Die Steuerspannung von 24V, wird wie zuvor von einem Labornetzgerät oder Festspannungsnetzgerät geliefert. Alternativ kann zur LOGO! auch ein Laptop mit dem Optokoppler Relaismodul benutzt werden. Die Nachteile sind aus Kapitel 3.3.3 bekannt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mögliche Bedienfehler vorhanden bleiben. Zum Beispiel falsche Einstellung der Betriebsspannung der Motoren. Eine Auswahl des Prüfprogramms ist mit der LOGO! nur bedingt möglich.

Ergänzung zum Beispiel von oben: Die prozentuale Spannungsdifferenz bei dem Beispiel von oben beträgt 16,67% gegenüber der eigentlichen Motorenspannung bei 60Hz. Diese könnte einfacherweise durch $\frac{50 \cdot 100\%}{60} = 83,33\%$ und $100\% - 83,33\% = 16,67\%$ erklärt werden. Besser hingegen ist, dass die Spannung bei einem 50Hz-Netz verringert werden muss, wenn daran ein für 60Hz-Netze ausgelegter Motor betrieben wird. Der im Motor fließende Strom wird somit begrenzt, was notwendig ist um die Wicklungen des Motors nicht zu überlasten. Folgende Formel erklärt den Zusammenhang der mechanischen Leistung.

$$M = \frac{1000 \cdot P}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} \quad (3.2)$$

Weil f von 60Hz auf 50Hz sinkt, folgt bedingt durch $n = \frac{f \cdot 60}{p} \curvearrowright n \downarrow \curvearrowright M \uparrow$. Wenn die Formel 3.2 nach P umgestellt wird,

$$P = \frac{M \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60}}{1000} \quad (3.3)$$

ist folgender Zusammenhang ersichtlich. $M \uparrow \curvearrowright P \uparrow$. Aus $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ folgt, wenn $P \uparrow \curvearrowright I \uparrow$. Durch $U = I \cdot Z$ wird deutlich, wenn $I \uparrow$ muss $U \downarrow$ um den Strom zu begrenzen.

3.2.1 Halbautomatische Variante 1

Für die Bereitstellung der Motorenspannung dient ein Stelltransformator. Dieser ist Wartungsarm und äußerst zuverlässig. Nachteil ist sein hohes Gewicht von zirka 85 kg bedingt durch die Kupferwicklungen. Dies führt dazu, dass die gesamte Prüfvorrichtung sperrig und schwerfällig zu transportieren ist. Als Steuerung kommt hier wie bei Variante VA 1 in Kapitel 3.3.1 erwähnt, ein Laptop zum Einsatz. Zusätzlich muss zur Spannungsbestimmung, ein Spannungsmessumformer verwendet werden, um die eingestellte Spannung des Stelltransformators zu überprüfen. Eine Kostenaufstellung folgt in Tabelle 3.4.



Abbildung 3.3: Hauptkomponenten der HA Variante 1, links Stelltransformator; mitte Laptop; mitte oben Stromwächter; rechts Interface

3.2.2 Halbautomatische Variante 2

Die halbautomatische Variante 2 ist eine weitere Möglichkeit für einen halbautomatischen Motorenprüfstand. Der Unterschied zur Variante 1 ist, dass anstatt des Laptops eine LOGO! als Steuerung eingesetzt wird. Vorteile und Nachteile der LOGO! sind in der Variante VA 3 in Kapitel 3.3.3 behandelt worden. Durch Verwendung der LOGO! fällt das Interface weg. Des Weiteren wird ein anderes Labornetzgerät verbaut sowie der Transportwagen selbst gefertigt. Dadurch wird die Anlage wesentlich günstiger. Die Kostenaufstellung folgt in Tabelle 3.5.

3.2.3 Halbautomatische Variante 3

In der Variante 3 wird wie zuvor in Variante 1, das günstigere Netzgerät für die 24V Steuerung verwendet. Außerdem wird ein wesentlich leichter Stelltransformator verbaut. Dieser kann einen kleineren Strom von 12A liefern. Dadurch werden die Querschnitte der Kupferleitungen kleiner und es kommt somit zu einer Gewichtsreduzierung. Der Strom von 12A ist dennoch ausreichend für die Anlaufströme des stärksten Motors. Eine Kostenaufstellung folgt in Tabelle 3.6.

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Stelltrans- formator	Caroroll & Meynell	CMV20-E3 20A	1000,05	4800VA; Ue=400V; Ua=0-112%; Ia=20A; Gewicht=85kg
2	Festspannungs- netzgerät	Voltcraft	FSP 2410	98,71	24 - 29 V/DC Ausgangsstrom max. 10 A
3	Laptop	DELL	Vostro V1520	359,00	Intel Celeron Processor 900 (2.20GHz, 800MHz FSB,1MB L2 cache), 1024 MB Arbeitsspeicher mit 800 MHz DDR2,15,4- Zoll-WXGA-LED-Display mit reflexionsarmer Beschichtung, 160-GB-Serial ATA-Festplatte (5.400 1/min),Integrierte GMA X4500 HD- Grafikkarte
4	Interface	QUANCOM	USBOPTOREL8	308,21	8 Eingängen und 8 Relais, 12V-30V
5	Stromwächter	Weidmüller	WAZ1 CMA 1/5/10A ac	3 · 161,00	transformatorisch;Ie=0...10A AC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10 V
6	Transportwagen	TRESTON	WTR 140 Uni- versalwagen	999,99	TxBxH: 650 x 650 x 1415; 150 kg
7	Spannungsmess- umformer	Phoenix Contact	MCR-VAC-UI-0- DC	99,00	Ue=0-370VAC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10V

Summe:⁸ 3347,96

Tabelle 3.4: Kostenaufstellung für HA Variante 1

⁸Preise: Stand 06.05.2010

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Steuerung	SIEMENS LOGO!	TD NEWS BOX 12/24V 0BA6DE	296,31	8 Eingänge davon 4 analog; 4 Relaisausgänge
2	Steuerungs-erweiterung	SIEMENS LOGO!	Digitale Erweiterung	74,97	4 Eingänge; 4 Relaisausgänge
3	Labornetzgerät	Voltcraft	VLP-1405 PRO	201,11	2 Ausgänge 0-40 V/DC 0-5A 3-6V/DC max. 2A
4	Stelltrans-formator	Caroroll & Meynell	CMV20-E3 20A	1000,05	4800VA; Ue=400V; Ua=0-112%; Ia=20A; Gewicht=85kg
5	Stromwächter	Weidmüller	WAZ1 CMA 1/5/10A ac	3 · 161,00	transformatorisch;Ie=0..10 A AC; Ausgang:0(4)..20mA; 0...10V
6	Transportwagen	SMT	Eigenbau	419,29	siehe Anhang A4
7	Spannungsmess-umformer	Phoenix Contact	MCR-VAC-UI-0-DC	99,00	Ue=0-370VAC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10V

Summe:⁹ 2573,73

Tabelle 3.5: Kostenaufstellung für HA Variante 2

⁹Preise: Stand 06.05.2010

Lfd.-Nr.	Gerät	Hersteller	Typ	Preis in €	Merkmale
1	Steuerung	SIEMENS LOGO!	TD NEWS BOX 12/24V 0BA6DE	296,31	8 Eingänge davon 4 analog; 4 Relaisausgänge
2	Steuerungs-erweiterung	SIEMENS LOGO!	Digitale Erweiterung	74,97	4 Eingänge; 4 Relaisausgänge
3	Festspannungs-netzgerät	Voltcraft	FSP 2410	98,71	24 - 29 V/DC Ausgangsstrom max. 10A
4	Stelltrans-formator	Tufassons	OITA 15	863,10	Ue=400 VAC; Ua=0...450VAC; Ia=12A; Gewicht=4kg
5	Stromwächter	Weidmüller	WAZ1 CMA 1/5/10A ac	3 · 161,00	transformatorisch;Ie=0...10A AC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10V
6	Transportwagen	SMT	Eigenbau	419,29	siehe Anhang A4
7	Spannungsmess-umformer	Phoenix Contact	MCR-VAC-UI-0-DC	99,00	Ue=0-370VAC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10V
Summe: ¹⁰				2334,38	

Tabelle 3.6: Kostenaufstellung für HA Variante 3

¹⁰Preise: Stand 06.05.2010

In Tabelle 3.7 findet eine Zusammenfassung von Vor- und Nachteile der vollautomatischen Varianten statt. Die Tabelle 3.8 zeigt Vor- und Nachteile der halbautomatischen Varianten.

Variante	Vorteile	Nachteile
VA 1	<ul style="list-style-type: none"> - schnelle Inbetriebnahme des Motorenprüfstandes durch wenig Konstruktions- und Programmieraufwand - universell und erweiterungsfähig durch die verwendeten Komponenten - geringes Gewicht - gute Visualisierung des Prüfablaufes mit Hilfe des Laptops möglich - sehr Leistungsfähige Einzelkomponenten - fehlerhafter Prüfvorgang durch automatischen Prüfablauf sehr unwahrscheinlich 	<ul style="list-style-type: none"> - späte Einsatzbereitschaft für eine Prüfung der Radaranlagen aufgrund des Bootvorgangs vom Laptop - sehr hohe Kosten durch das Stromversorgungsgerät - fehleranfällige Anlage aufgrund des Laptops
VA 2	<ul style="list-style-type: none"> - zügige Inbetriebnahme des Motorenprüfstandes durch leicht erhöhten Konstruktions- und Programmieraufwand - universell und erweiterungsfähig durch die verwendeten Komponenten - geringes Gewicht - gute Visualisierung des Prüfablaufes mit Hilfe des Laptops möglich - leistungsfähige Einzelkomponenten - fehlerhafter Prüfvorgang durch automatischen Prüfablauf sehr unwahrscheinlich 	<ul style="list-style-type: none"> - späte Einsatzbereitschaft für eine Prüfung der Radaranlagen aufgrund des Bootvorgangs vom Laptop - hohe Kosten durch das Stromversorgungsgerät - fehleranfällige Anlage aufgrund des Laptops
VA 3	<ul style="list-style-type: none"> - schnell für eine Prüfung der Radaranlagen bereit - fehlerhafter Prüfvorgang durch automatischen Prüfablauf unwahrscheinlich - geringes Gewicht - sehr geringe Kosten der Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> - bedingt erweiterungsfähig aufgrund der speziellen Komponenten - längere Inbetriebnahmezeit durch hohen Konstruktions- und Programmieraufwand

Tabelle 3.7: Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen der vollautomatischen Varianten

Variante	Vorteile	Nachteile
HA 1	<ul style="list-style-type: none"> - schnelle Inbetriebnahme des Motorenprüfstandes durch wenig Konstruktions- und Programmieraufwand - geringe Kosten der Komponenten - gute Visualisierung des Prüfablaufes mit Hilfe des Laptops möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - späte Einsatzbereitschaft für eine Prüfung der Radaranlagen aufgrund des Bootvorgangs vom Laptop - sehr hohes Gewicht und sehr sperrig aufgrund des Transformators - fehlerhafter Prüfvorgang aufgrund eines nicht automatisierten Prüfablaufs wahrscheinlich - bedingt erweiterungsfähig aufgrund der speziellen Komponenten - fehleranfällige Anlage aufgrund des Laptops
HA 2	<ul style="list-style-type: none"> - schnell für eine Prüfung der Radaranlagen bereit - sehr geringe Kosten der Komponenten - zuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr hohes Gewicht und sehr sperrig aufgrund des Transformators - schlecht erweiterungsfähig aufgrund der speziellen Komponenten - längere Inbetriebnahmezeit durch hohen Konstruktions- und Programmieraufwand - fehlerhafter Prüfvorgang aufgrund eines nicht automatisierten Prüfablaufs wahrscheinlich
HA 3	<ul style="list-style-type: none"> - schnell für eine Prüfung der Radaranlagen bereit - sehr geringe Kosten der Komponenten - zuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> - hohes Gewicht und sperrig aufgrund des Transformators - schlecht erweiterungsfähig aufgrund der speziellen Komponenten - längere Inbetriebnahmezeit durch hohen Konstruktions- und Programmieraufwand - fehlerhafter Prüfvorgang aufgrund eines nicht automatisierten Prüfablaufs wahrscheinlich

Tabelle 3.8: Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen der halbautomatischen Varianten

3.3 Zusammenfassung der unterschiedlichen Varianten

Die Betriebs- und Wartungskosten liegen bei allen Varianten im gleichen Kostenbereich und können daher als Entscheidungsfaktor vernachlässigt werden. Ebenso sind Kosten für Leitungen, Kleinteile, Taster und Leitungsschutzschaltern bei allen Varianten nicht zu berücksichtigen. Die Kosten unterscheiden sich nur unwesentlich. Die angegebenen Preise, sind Preisangaben die durch Nachfrage bei Lieferanten zustande kamen und dienen lediglich als Richtwert. Teilweise wurden auch Preisangaben auf Internetseiten der jeweiligen Vertriebspartner ermittelt. Aus der Kostenaufstellung ist zu entnehmen, dass die Variante 3 im vollautomatischen Betrieb die Preiswerteste ist. Daher wird sie von den Entscheidungsträgern favorisiert.

3.4 Nutzwertanalyse der vorgestellten Varianten

Mit dem Instrument der Nutzwertanalyse wird die Entscheidungsfindung nachvollziehbar ermöglicht. Dabei werden folgende Kriterien berücksichtigt:

- die Auswahl zwischen mehreren Alternativen durch eine Systematisierung der Einzelbewertungen zu erleichtern,
- unterschiedliche Kriterien in ihrer Komplexität zu strukturieren,
- gleichzeitige Berücksichtigung qualitativer und quantitativer Kriterien,
- teilweise subjektive Wertvorstellungen zu objektivieren,
- Bewertungen und Auswahlentscheidungen transparenter zu gestalten[15].

Die Methode der Nutzwertanalyse wird immer dann angewendet, wenn Investitionsentscheidungen zwischen mehreren Alternativen vorliegen, bei denen die objektiven wie subjektiven Kosten-Nutzen-Kriterien unterschiedlich gewichtet bzw. ausgeprägt sind. Wenn zusätzlich mehrere Bewertungskriterien vorliegen, d.h. wenn zwischen komplex zusammengesetzten Entscheidungsalternativen die optimale Variante auszuwählen ist, ist die Nutzwertanalyse das zu wählende Mittel. Die Anwendung dieser Methode erfolgt nicht nur, wie hier bei der Auswahl und Bewertung mehrerer Realisierungsalternativen, sondern auch in der Bewertung von Kunden oder Lieferanten, aber auch in der Personalauswahl und anderen vergleichbaren Bewertungs-/Entscheidungssituationen[10]. Zur Durchführung der Nutzwertanalyse werden Entscheidungskriterien ermittelt und unter einem gegebenen Zielsystem entsprechend bewertet. Folgend ist die Vorgehensweise in Stichpunkten aufgeführt, nach der die Nutzwertanalyse durchgeführt wird.

Vorgehensweise:

1. Entscheidungsziel, Bewertungskriterien festlegen
2. Bestimmung der zu untersuchenden Alternativen
3. Gewichtungsfaktoren der Zielkriterien bestimmen
4. Nutzwert-(Punkte-) Skala mit Minimal-, Zwischen- und Maximalwerten festlegen
5. Teilnutzen je Alternative und Kriterium bestimmen
6. Teilnutzen je Alternative und Kriterium auf Punktwerte (Scores) übertragen
7. Gesamtnutzen der Alternativen durch Addition der Punktwerte ermitteln
8. Auswahl der optimalen (gesamtnutzenmaximale) Alternative[10]

Um die unterschiedlichen Varianten bewerten zu können, wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Anhand der Auswahlkriterien wird ein Gewichtungsgrad festgelegt. Automatisierungsgrad, Bediensicherheit und Kosten sind wichtige Entscheidungsfaktoren und bekommen die höchste Gewichtung. Die Summe der Gewichtung muss eins sein. Der Zielertrag gibt Auskunft in wie weit die Vorgaben erfüllt sind. Die Zahl zehn stellt dabei die maximale Erfüllung der Anforderung dar. Das aus der Nutzwertanalyse gewonnene Ergebnis entscheidet darüber, welche Variante zu favorisieren ist. Die endgültige Entscheidung liegt allerdings beim Bereichsleiter. Die Ergebnisse der durchgeführten Nutzwertanalyse folgen in Tabelle 3.9.

3.5 Auswertung der gewonnenen Ergebnisse aus der durchgeführten Nutzwertanalyse

Aus der Nutzwertanalyse geht hervor, dass Variante 3 in der vollautomatischen Ausführung den größten Nutzwert besitzt. Die Nutzwerte der halbautomatischen Ausführungen sind wesentlich geringer als die der Variante 3 VA. Dies liegt daran, dass der Grad der Automatisierung zu gering ist und sich dadurch das Gesamtergebnis verschlechtert. Die Varianten 1 VA und 2 VA sind zu kostspielig und verhindern somit ein besseres Gesamtergebnis. Als Realisierungsvorschlag gegenüber den Entscheidungsträgern wird daher die Variante 3 VA vorgestellt. Um die endgültigen Kosten ermitteln zu können, werden erste Konstruktionszeichnungen und Stromlaufpläne erstellt. Auf dieser Grundlage aufbauend können die Kosten für alle Komponenten ermittelt werden. Anhand erster Zeichnungen und Rücksprache mit Lieferanten wurde die nachfolgende Stückliste erstellt. Nach Rücksprache mit dem Hersteller des Frequenzumrichters für die dreiphasigen Motoren wurde bestätigt, dass dieser keine unsymmetrische Belastung verträgt und sich abschaltet. Somit wird ein zusätzlicher Frequenzumrichter zur Bereitstellung der Motorenspannung der einphasigen Motoren notwendig. In der Tabelle 3.10 werden die benötigten Komponenten des Motorenprüfstandes aufgeführt.

Kriterien	Gewichtung	VA Variante 1		VA Variante 2		VA Variante 3	
		Zielertrag	Teilnutzen	Zielertrag	Teilnutzen	Zielertrag	Teilnutzen
Grad der Automatisierung	0,3	10	3	10	3	8	2,4
Zeit der Einsatzbereitschaft	0,1	3	0,3	3	0,3	7	0,7
Bedienfehlersicherheit	0,2	9	1,8	9	1,8	7	1,4
Zuverlässigkeit	0,1	5	0,5	5	0,5	8	0,8
Erweiterungsfähigkeit	0,05	9	0,45	8	0,4	6	0,3
Zeit für Umsetzung	0,05	4	0,2	4	0,2	7	0,35
Kosten	0,2	2	0,4	3	0,6	8	1,6
			6,65		6,8		7,55

Kriterien	Gewichtung	HA Variante 1		HA Variante 2		HA Variante 3	
		Zielertrag	Teilnutzen	Zielertrag	Teilnutzen	Zielertrag	Teilnutzen
Grad der Automatisierung	0,3	3	0,9	3	0,9	5	1,5
Zeit der Einsatzbereitschaft	0,1	8	0,8	8	0,8	4	0,4
Bedienfehlersicherheit	0,2	5	1	5	1	7	1,4
Zuverlässigkeit	0,1	8	0,8	8	0,8	6	0,6
Erweiterungsfähigkeit	0,05	6	0,3	5	0,25	6	0,3
Zeit für Umsetzung	0,05	7	0,35	7	0,35	4	0,2
Kosten	0,2	7	1,4	8	1,6	7	1,4
			5,55		5,7		5,8

Tabelle 3.9: Nutzwertanalyse der möglichen Realisierungsformen

Resultierende Stückliste des Motorenprüfstandes

Pos.	Gerät	Hersteller	Typ	Menge	Preis in €	Merkmal
1	Frequenzumrichter	Power Electronics	SD25309	1St	500,00	Volt:400 (3Ph); Amp.:9,0; KW:4,0; mit Netzfilter
2	Frequenzumrichter	POPHOF Antriebstechnik	ODE1-12075-DE	1St	250,00	Volt:230 (1Ph); Amp.:4,3; KW:0,37;
3	Steuerung	SIEMENS LOGO!	LOGO! TD Starter Box 6ED1 057-3BA10-0AA0	1St	300,00	8 Eingänge davon 4 Analog; 4 Relaisausgänge; 200 Logikblöcke
4	Steuerungserweiterung	SIEMENS LOGO!	Digitale Erweiterung DM8 12 / 24R	1St	75,00	4 Eingänge; 4 Relaisausgänge
5	Steuerungserweiterung	SIEMENS LOGO!	LOGO! AM2 AQ	1St	126,00	2 analoge Ausgänge
6	Stromwächter	Weidmüller	WAZ1 CMA 1/5/10A ac	3St	161,00	transformatorisch;Ie=0..10A AC; Ausgang:0(4)...20mA; 0...10V
7	Umschalter	Krauss Naimer	CG4 A220-600 E	1St	16,00	Schalterstellung 1-2; Schild: 1P-3P
8	Umschalter	Krauss Naimer	CG4 A220-600 E	1St	16,00	Schalterstellung 1-2; Schild: S-Band/X-Band
9	Umschalter	Krauss Naimer	CG4 A220-600 E	1St	16,00	Schalterstellung 1-2; Schild: 50Hz-60Hz
10	Stufenschalter	Krauss Naimer	CG4 A230-600 E	1St	22,00	Schalterstellung 1-2-3; Schild: 230V-400V-440V
11	Ausschalter	Krauss Naimer	KG10A T202/04 E	1St	26,00	3-polig
12	Not Aus-Schalter	Krauss Naimer	P SN-PV-K01	1St	22,00	Rückstellung durch ziehen
13	Ausschalter	Krauss Naimer	CG4 A290-600 E	1St	16,00	Schalterstellung 0-1; Schild: Steuerung AUS-EIN

weiter auf der nächsten Seite

Pos.	Gerät	Hersteller	Typ	Menge	Preis in €	Merkmal
14	Drucktaster flach	Krauss Naimer	P SN-WD0001	1St	15,00	Ein-Taster grün
15	Drucktaster flach	Krauss Naimer	P SN-WD0002	1St	15,00	Aus-Taster rot
16	RCD	ABB	F204 A-40/0,03	1St	30,00	40A/30mA/4-polig
17	Schaltkasten	Lentz	GH60-210	1St	110,00	Türmasse:478 x 598
18	Schütz	Moeller	DILM12-10 (400V50HZ, 440V60HZ)	1St	30,50	Art.Nr. 276845 Contactor, 5,5kW/400V, AC-operated
19	DC/DC-Wandler	Phoenix Contact	MCR-VDC-UI-B- DC	2St	130,00	Art.Nr. 2811116; ±0...10V/0...20mA
20	Abdeck- u. Ein- fassprofil	SMT	S208AEPSCHW	12m	1,76	8 schwarz, 2m
21	Nutenstein	SMT	S208NSOS6	10St	0,25	8, ohne Steg, M6
22	Nutenstein	SMT	S208NSMS8	10St	0,24	8, mit Steg, M8
23	Nutenstein	SMT	S208NSMS5	10St	0,24	8, mit Steg, M5
24	Magnet- verschluss	SMT	S208MV	1St	1,24	8 PA
25	Handgriff	SMT	S208HG160PA	1St	2,25	8 PA 160
26	Scharnier	SMT	S208SCHPAR	4St	1,62	8 PA rechts
27	Gelenkwinkel	SMT	S208GW	2St	2,59	8 40x40
28	Abdeckkappe	SMT	S208WAK40	12St	0,37	
29	Lenkrolle	SMT	S208L75A	2St	12,32	D75 antistatisch
30	Lenkrolle	SMT	S208LDF75A	2St	14,82	D75 Doppelfeststeller antistatisch
31	Halbrundschraube	SMT	S208HS830	30St	0,25	M8x30
32	Halbrundschraube	SMT	S208HS816	10St	0,20	M8x16
33	Profil	SMT	S1084040L	12St	9,48	8 40x40 leicht
34	Stromversorgung			1St	136,00	240VAC/24VDC/10

weiter auf der nächsten Seite

Pos.	Gerät	Hersteller	Typ	Menge	Preis in €	Merkmal
35	Leitungsschutzschalter			1St	14,00	FAZ; B16A;3 pol
36	Leitungen, Hut-schienen und Kabelkanal aus fertigungsnaher Lagerung			1St	50,00	
37	Relais			5St	8,11	24V AC/DC
38	Sicherungsklemme			5St	1,82	20mm

Summe: 2803,70

Tabelle 3.10: Stückliste des Motorenprüfstandes

Kapitel 4

Realisierung des Motorenprüfstandes

4.1 Technische Umsetzung

Nachdem die Form der Realisierung festgelegt und eine Stückliste erstellt wurde, kann die Umsetzung des Motorenprüfstandes beginnen. Dafür werden endgültige Konstruktionszeichnungen in AutoCad 2006 erstellt¹. Mit deren Hilfe können Mitarbeiter der Fertigung den Schaltkasten für den Motorenprüfstand bauen. Die Positionen der Durchbrüche und die Positionen der Komponenten werden in einer weiteren Zeichnung festgelegt. Um die elektrischen Komponenten miteinander zu verbinden, werden in Eplan 5.7 Stromlaufpläne erstellt². Das Steuerungsprogramm wird in einer LOGO implementiert. Dafür existiert eine eigene Software des Herstellers. In LOGO!Soft Comfort V6.1 wird die Steuerung erstellt³. Dies erfolgt mit Hilfe von Funktionsblöcken. Abschließend werden diverse Parameter an den zwei Frequenzumrichtern, Stromwandlern und der Steuerung parametriert⁴. Bevor mit allen Arbeiten begonnen werden kann, wird eine Simulation zu den Einflüssen der Frequenzumrichter auf die Motoren durchgeführt. Es soll vermieden werden, dass der Motorenprüfstand, Motoren als defekt erkennt, welche jedoch keinen Defekt aufweisen. Auf die entstehenden negativen Auswirkungen, während des Einsatzes von Frequenzumrichtern und die damit verbundene Problematik, wird im Anhang A3 näher eingegangen. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern entstehen Netzrückwirkungen sowie damit verbundene EMV-Einflüsse[16]. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass diese Problematik bekannt ist. Aufgrund der im Anhang A3 aufgeführten Probleme, wie den Schaltvorgängen und der Netzrückwirkung, werden Simulationen in Simplorer durchgeführt. Dies verdeutlicht die EMV-Auswirkungen auf die Motoren und das Spannungsnetz in der Produktion. Zusätzlich werden die Harmonischen untersucht. Diese Untersuchung klärt, ob der Einsatz eines Frequenzumrichters negative Auswirkungen auf den Motor haben könnte. Bedingt durch Harmonische überlagern sich Frequenzspektren. Diese Überlagerung führt zu einem Stromanstieg. Dieser erhöhte Strom führt allmählich zu Isolationsschäden, welche sich negativ auf die Lebensdauer der Motoren auswirken könnte, wenn der Motor nicht für diese Ströme ausgelegt ist.

¹Konstruktionszeichnungen im Anhang B3

²Stromlaufpläne im Anhang B2

³Steuerung im Anhang B1

⁴Liste der Parameter im Anhang B4

4.2 Notwendigkeit der Simulation beim Einsatz eines Frequenzumrichters

Wie in Kapitel 4.1 erwähnt führen Netzrückwirkungen zu großen Problemen in den Energieversorgungsnetzen und den daran angeschlossenen Geräten. Die Auswirkungen auf Geräte und deren Komponenten sind vielfältig und können nicht allgemein betrachtet werden. Es kommt zu Abweichungen der Kenngrößen von Spannungsamplitude, Frequenz sowie Spannungs- und Stromform. Aufgrund der unterschiedlichen Auswirkungen, sind Lösungsmöglichkeiten auch immer separat zu betrachten. Maßnahmen um die Auswirkungen von Oberschwingungen innerhalb der Anlage zu reduzieren, müssen nicht unbedingt die im Netz verursachten Verzerrungen reduzieren. Es gibt mehrere verbreitete Probleme die durch Oberschwingungen verursacht werden. Einige sind hier stichpunktartig aufgeführt[16].

Durch Oberschwingungsströme in Anlagen verursachte Probleme:

- Überlastung von Neutralleitern,
- Fehlauslösung von Leitungsschutzschaltern / Leistungsschaltern,
- Skineffekte,
- Überbeanspruchung von Kompensations-Kondensatoren,
- Verstärkung der Probleme mit magnetischen Wechselfeldern die durch nicht EMV-gerechte Elektroinstallationen entstehen.

Durch Oberschwingungsspannungen verursachte Probleme:

- Spannungsverzerrungen,
- Überhitzung und Hochlaufschwierigkeiten von Drehfeldmotoren,
- Nulldurchgangsstörungen (bei elektronischen Betriebsmitteln, die sich an den Null-durchgängen orientieren).

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschreibt das Verhältnis zwischen der maximal auftretenden Störung und dem maximal tolerierbaren Störpegel zur Wahrung der Funktion eines Gerätes. Im Bereich des Elektroenergienetzes werden Störgrößen bis zu einer Frequenz von 2kHz nach VDE 0838 betrachtet. Einige der im EMVG92 geregelten Einflussgrößen für die EMV sind hier stichpunktartig aufgeführt.

Einige Einflussgrößen für die EMV:

- Netzurückwirkungen,
- Blitzeinwirkungen,
- Elektrische Felder,
- Korona-Entladungen,
- Magnetische Felder,
- Elektrostatische Entladung,
- Elektromagnetische Felder.
- Elektrische Korrosion.

Bei dem Motorenprüfstand treten bedingt durch den Frequenzumrichter und Asynchronmotor überwiegend Harmonische auf. Diese werden durch nichtlineare Verbraucher wie Induktivitäten hervorgerufen. Wenn das Signal periodisch ist, besteht es aus Sinusschwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache ($n = 0, 1, 2, \dots$) der Grundfrequenz f_1 sind. Die Grundfrequenz hat die gleiche Periodendauer wie das Gesamtsignal (Abbildung 4.1). Diese Komponenten bezeichnet man als Harmonische mit der Ordnungszahl n . Durch leistungselektronische Geräte wie Frequenzumrichter entstehen überwiegend Transiente. Dies sind Störimpulse, die beim Abschalten von induktiven Lasten entstehen. Da sich Schaltkontakte von elektronischen Bauelementen, wie zum Beispiel IGBT's, nur endlich schnell öffnen können, erzeugt die induzierte Spannung in der Induktivität einen Funkenüberschlag über dem geöffneten Schaltkontakt. Nachdem der Stromfluss durch Erlöschen des Funkens zusammengebrochen ist, bildet sich über dem Kontakt wiederum eine Spannung, die erneut zu einem Funkenüberschlag führt. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Energie der Induktivität nicht mehr ausreicht.

Durch Harmonische und Transiente treten Überströme auf, die zur Zerstörung von Kondensatoren im Frequenzumrichter führen können. Durch die Überlagerung von Grund- und Oberschwingungen können Sicherungen und Schutzrelais, bedingt durch Überhitzung ausgelöst werden. Nach DIN VDE 0839 kann der Motorenprüfstand in die Umgebungsklasse 1 eingeordnet werden. Dazu zählen geschützte Versorgungen mit niedrigeren Pegeln wie im öffentlichen Versorgungsnetz (Labore, Schutzeinrichtungen, Datenverarbeitung). Dies bedeutet das Spannungsschwankungen nicht größer als $\pm 8\%$ auftreten dürfen. Nach der VDE 0838 Teil 2 wird der Motorenprüfstand zusätzlich in die Geräteklasse A eingestuft, die für symmetrische dreiphasige Betriebsmittel gilt. In der VDE 0838 Teil 2 ist festgelegt, wie hoch die zulässigen Oberschwingungsströme in Niederspannungsnetzen für Betriebsmittel mit einem Eingangsstrom $\leq 16A$ maximal sein dürfen. Die zulässigen Stromüberschwingungen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Des Weiteren ist die VDE 0839 Teil 2 wichtig. Darin enthalten sind in Tabelle 4.2 die zulässigen relativen Grenzwerte für Spannungsüberschwingungen in Niederspannungsnetzen.

Ordnung n Max	Oberschwingungsstrom in A
Ungerade	Klasse A
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15...39	$0,15 \cdot 15/n$
Gerade	Klasse A
2	1,08
4	0,43
6	0,3
8..40.	$0,23 \cdot 8/n$

Tabelle 4.1: Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen der Geräteklasse A, bei einem Eingangsstrom < 16A nach VDE 0838 Teil 2

Ordnungszahl n	Verträglichkeitspegel in %
	ungeradzahlige, nicht durch 3 teilbare Werte von n
5	6,0
7	5,0
11	3,5
13	3,0
$17 \leq n \leq 49$	$2,27 \cdot (17/n) - 0,27$
	ungeradzahlige, durch 3 teilbare Werte von n
3	5,0
9	1,5
15	0,4
21	0,3
$21 < n \leq 45$	0,2
	geradzahlige Werte von n
2	2,0
4	1,0
6	0,5
8	0,5
10	0,5
$10 < n < 50$	$0,25 \cdot (10/n) + 0,25$
	Gesamtverzerrung der Spannung
THD(%)	8

Tabelle 4.2: Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen der Spannung in Niederspannungsnetzen nach VDE 0839 Teil 2

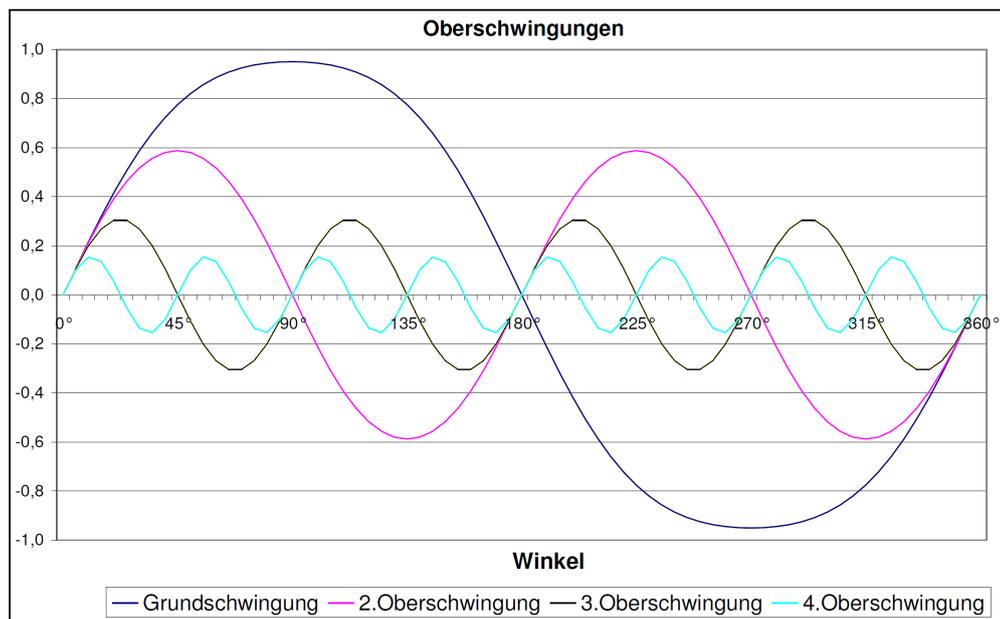


Abbildung 4.1: Grundschwingung und die dazugehörigen Harmonischen

4.3 Simulation der Auswirkungen des Frequenzumrichters auf die Motoren

In der Simulation mit dem Programm Simplorer 5.0 wird ein Frequenzumrichtermodell aufgebaut. Das Modell kann variabel an den jeweiligen Frequenzumrichter angepasst werden. Weiterhin besteht das Modell aus einem Versorgungsnetz in dem die Impedanzen und Spannungen angepasst werden können sowie eine veränderbare ohmsche-induktive Last. Auf Grund fehlender Parameter der verwendeten Motoren wie Statorwiderstand, Rotorwiderstand, Statorstreuinduktivität, Rotorstreuinduktivität und Trägheitsmoment kann kein Modell einer Asynchronmaschine verwendet werden, welches realitätsnäher ist als die ohmsche-induktive Last. Aus dem Datenblatt des Frequenzumrichters (SD250) ist bekannt, dass die Pulsweitenmodulation (PWM) mit einer Pulsfrequenz von 3kHz getaktet wird. Das Signal wird mittels Sinus-Dreieck-Vergleich erzeugt. Dabei hat der Sinus die Netzfrequenz von 50Hz und das Dreiecksignal die Pulsfrequenz. Je höher diese Pulsfrequenz ist, umso geringer wird der Einfluss der Unsymmetrie, welche bedingt durch die Gegentaktung der Wechselrichterzweige auftritt. Ab einer Frequenz von 2kHz ist diese praktisch nicht mehr nachweisbar [16]. Die Ansteuerung des Gates der IGBT's erfolgt mit Hilfe von Petrinetzen. Der Frequenzumrichter an sich ist aus einer ungesteuerten B6-Gleichrichterbrückenschaltung, einem Zwischenkreis mit Glättungskondensator sowie einem selbstgeführten Stromrichter aufgebaut. Ob der Stromrichter aus den hier verwendeten IGBT's besteht ist nicht bekannt. Dies ist für eine Simulation nicht relevant, da sich MOSFET's, GTO's oder IGBT's nur in der Schaltzeit und der Mindestpausenzeit, bevor die Bauteile wieder schalten dürfen, unterscheiden. Dies kann mit einer Pausenzeit in den Petrinetzen berücksichtigt werden. Die Halbleiterbauelemente könnten mit Hilfe von Exponentialkennlinien an die realen Bauteile angepasst werden, wenn die Charakteristik der Bauteile bekannt ist. Für die Nachbildung aller relevanten elektrischen Größen wird

in der Simulation ein 3x400V/50Hz-Motor mit einer Leistung von 180W verwendet. Dieser wird ebenso in den späteren Messungen und der Fast-Fourier-Transform-Analyse (FFT-Analyse) verwendet.

Nach VDE 0838 Teil 3, EN61000-3-3, dürfen Impedanzen im Stromversorgungsnetz Werte in L1,L2 und L3 von $0,16\Omega/0,318mH$ nicht überschreiten. Im N-Leiter sind es $0,24\Omega/0,478mH$. Auf dieser Grundlage werden die Netzimpedanzen wie in Abbildung 4.2 gewählt. Die ohmschen und induktiven Werte der Last werden am Motor gemessen und dann errechnet. Mit dem Multimeter Fluke 177 (SAM Prüfnummer: 1808605216) wird ein Gesamtwiderstand von 165Ω ermittelt. Aufgrund der Dreieckschaltung beträgt der Strangwiderstand $247,5\Omega^5$. Dieser ist an allen drei Strängen gleich. Daraus resultierend wird unter Angaben des Herstellers die Induktivität der Motorwicklungen bestimmt. Der Motor nimmt einen Strom von $0,32A$ bei $400V$ in ROT1 auf. Dies sind Aufgrund von

$I_{Str} = \frac{I_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{0,32A}{\sqrt{3}} = 0,185A$ pro Phase. Da $Z = \frac{U}{I_{Str}} = \frac{400V}{0,185A} = 2162,2\Omega$ ergibt, kann X_L durch

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ermittelt werden. X_C ist bedingt durch die Wicklungen beim Motor gegenüber X_L vernachlässigbar klein. Somit kann der Einfachheit halber

X_L durch $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{2162,2^2\Omega - 247,5^2\Omega} = 2148\Omega$ bestimmt werden.

Die Induktivität kann durch $L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{2148\Omega}{2\pi \cdot 50Hz} = 6,837H$ ermittelt werden.

In der folgenden Abbildung 4.2 ist das Netzwerk in Simplerer zu sehen, mit dem der Frequenzrichter nachgebildet wird. Alle eingestellten Parameter sind an den jeweiligen Symbolen zu sehen. Die Spannungsquellen weisen eine Phasenverschiebung von jeweils 120° auf. Diese Spannung wird mit der B6-Brücke gleichgerichtet und mit einem Kondensator geglättet. Je größer diese Kapazität ist, desto geringer wird die Welligkeit der erzeugten Gleichspannung. Dadurch würde sich jedoch die Mittelkreisspannung erhöhen und langsamer auf den Wert von $563V$ absinken. Mit den Volt- und Amperemetern werden die wichtigsten Größen überprüft. Der Stromrichter wird durch das Petrinetz gesteuert. Die Weiterschaltbedingungen werden an den Transitionen dargestellt. Der Modulationsgrad aus dem Dreieck- und Sinussignal bestimmt die Höhe der Ausgangsspannung des Stromrichters. Je größer der Modulationsgrad, umso größer wird Spannung an der Last. Auf das Verfahren der PWM mittels Sinus-Dreieckvergleich wird nicht näher eingegangen, da dies detailliert in diversen Fachbüchern und Artikeln nachzulesen ist[5]. Wichtig bei der Erzeugung der PWM ist, dass die Sinusträgersignale eine Phasenverschiebung von 120° aufweisen müssen.

In Abbildung 4.3 ist das Ergebnis der Simulation zu sehen. Dargestellt sind die Amplituden. Angegeben sind die Effektivwerte. Die Zwischenkreisspannung (VG_Kreis.V) mit $563V$, die Spannung an der Last (VL_L1L2.V) zwischen den Phasen L1 und L2 wo deutlich das PWM-Muster zu erkennen ist, die Spannung eingangsseitig (VN_L1.V) an L1 mit $230V$, der relativ sinusförmige Laststrom (AL_L1.I) an L1 mit $294mA$ und der Strom eingangsseitig (AN_L1.I) an L1 von $60mA$ der Transiente aufweist. in Kapitel 4.4 werden die Signale detailliert ausgewertet.

⁵Berechnung siehe Anhang A2

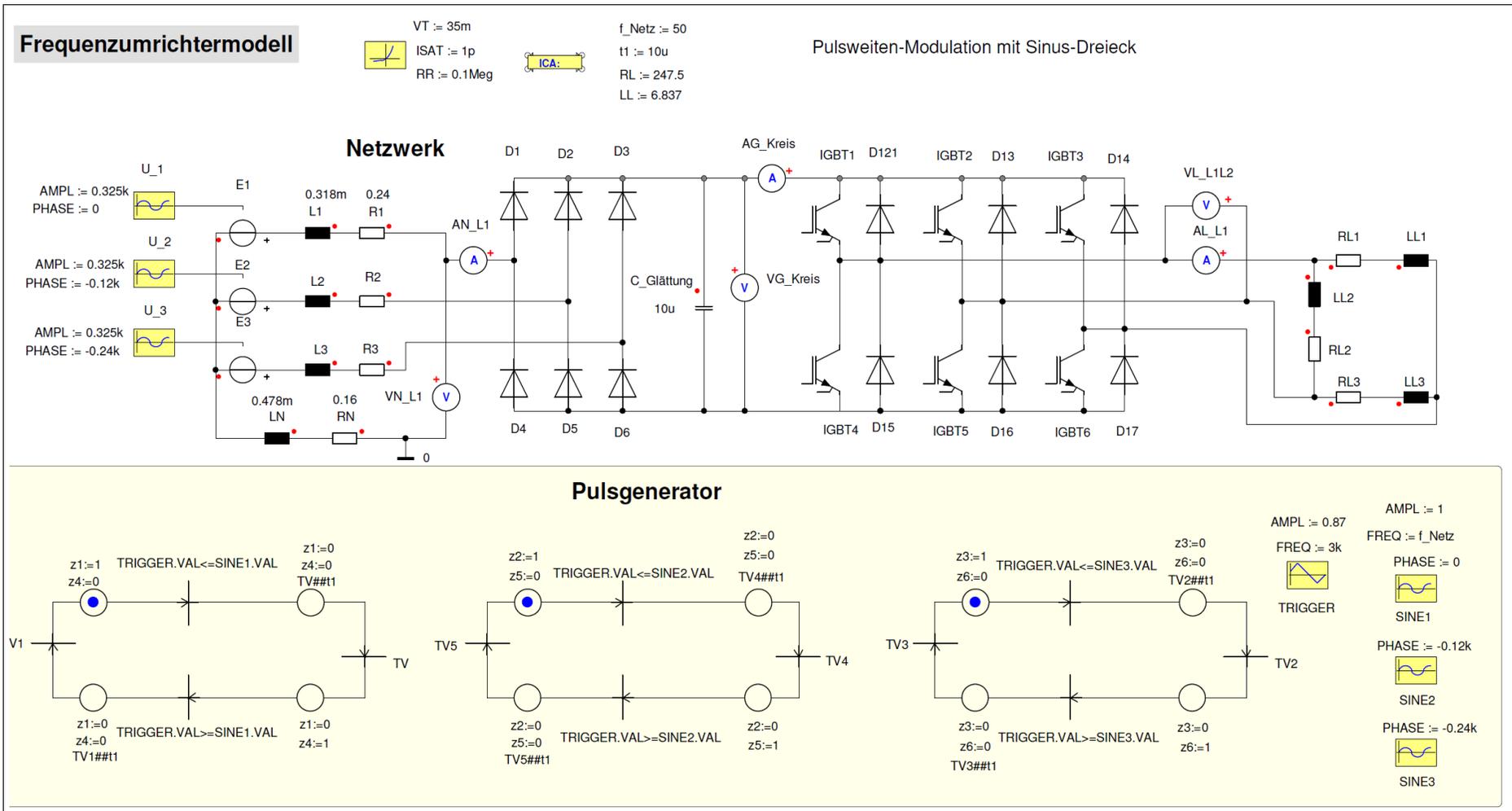


Abbildung 4.2: Simplermodell für einen Frequenzumrichter

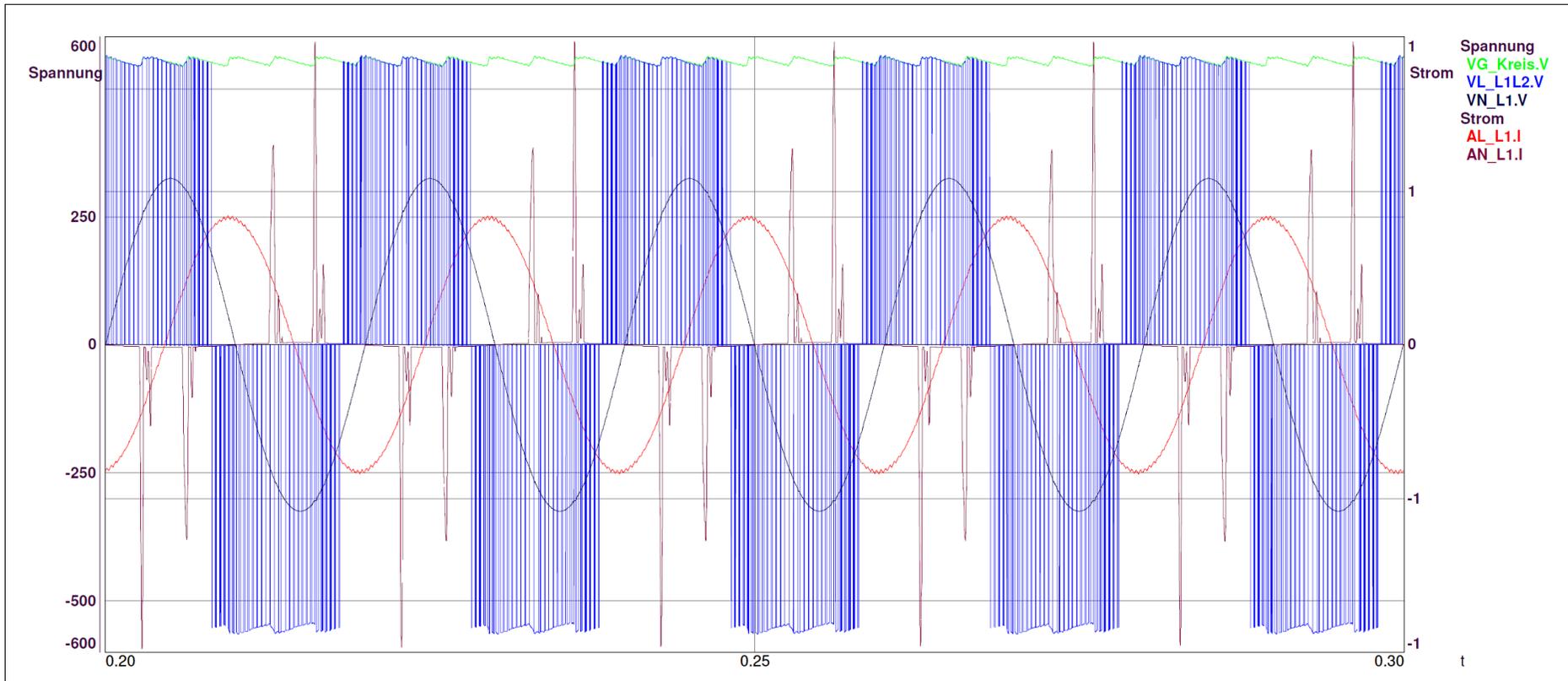


Abbildung 4.3: Simplerersimulationsergebnisse des Frequenzumrichters

4.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Simulation wurde im DAY Post Prozessor näher untersucht. In Abbildung 4.4 sind fünf Signale abgebildet. Die Zwischenkreisspannung $V_{G_Kreis.V}$ weist eine leichte Welligkeit auf. Diese entsteht durch die B6-Brücke. Dadurch sind pro Periode sechs Wellen zu sehen. Der Spannungswert von 563,4V kommt durch

$$\hat{u} = \sqrt{6} \cdot U_{Str} = \sqrt{6} \cdot 230V = 563,4V \text{ zustande.}$$

Die Netzspannung $V_{N_L1.V}$ beträgt $u = \hat{u} = 324,8V$. Dies ist eine der drei Phasenspannungen von 229,67V, welche sich durch $\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 229,67V$ ergibt.

Auf der Lastseite ist das Signal $V_{L_L1L2.V}$ abgebildet. Deutlich ist das PWM-Spannungssignal zu erkennen, dessen Maximalwert den der Zwischenkreisspannung entspricht.

Der zugehörige Strom an der Last ist $A_{L_L1.I}$ und hat einen Wert von $\hat{i} = 416mA$. Der Effektivwert wird durch $i = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = 294mA$ bestimmt. Zu sehen ist ein nahe zu sinusförmiger Strom. Dadurch kann der Effektivwert mit $\sqrt{2}$ berechnet werden. Je höher die PWM-Frequenz ist, umso sinusförmiger wird das Signal. Zur besseren Darstellung ist das Signal skaliert um einen Faktor von 1000.

Das zweite Stromsignal ist der Eingangsstrom $A_{N_L1.I}$ und ebenfalls um 1000 skaliert. Deutlich zu sehen sind die Transienten, die durch abschalten von Induktivitäten entstehen. Das Signal hat einen Effektivwert von 60mA. Der Wert wird in Simploter bestimmt, da die Ermittlung des Effektivwertes schwieriger als zuvor ist. Zu sehen sind einige Stromspitzen mit Werten bis zu 981mA. Diese Spitzen sind die Transienten und treten periodisch auf, bedingt durch das Abschalten der induktiven Lasten durch die IGBT's. Je größer der Kondensator im Zwischenkreis dimensioniert ist, desto geringer werden diese Stromspitzen. Dies liegt an der größer werdenden Zeitkonstante und der größeren Kapazität, die Energie der Induktivitäten speichert.

In Abbildung 4.5 sind der Übersicht halber alle Spannungen nochmals dargestellt. Zusätzlich ist nun der Effektivwert von U_{m_PWM} dargestellt. Dieser berechnet sich durch

$$U_{m_PWM} = \frac{m_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{G_Kreis.V}}{2} = 228,9V.$$

Die zugehörige Amplitude ist in u_{m_PWM} dargestellt und hat einen Wert von $\hat{u} = 338V$. Dieses Signal wird mit Hilfe von

$$u_{m_PWM} = m_a \cdot \frac{V_{G_Kreis.V}}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \text{ gebildet, wobei}$$

$$m_a \text{ der Modulationsgrad } m_a = \frac{\hat{u}_{sin}}{\hat{u}_{\Delta}} = \frac{1}{0,87} = 1,15 \text{ ist.}$$

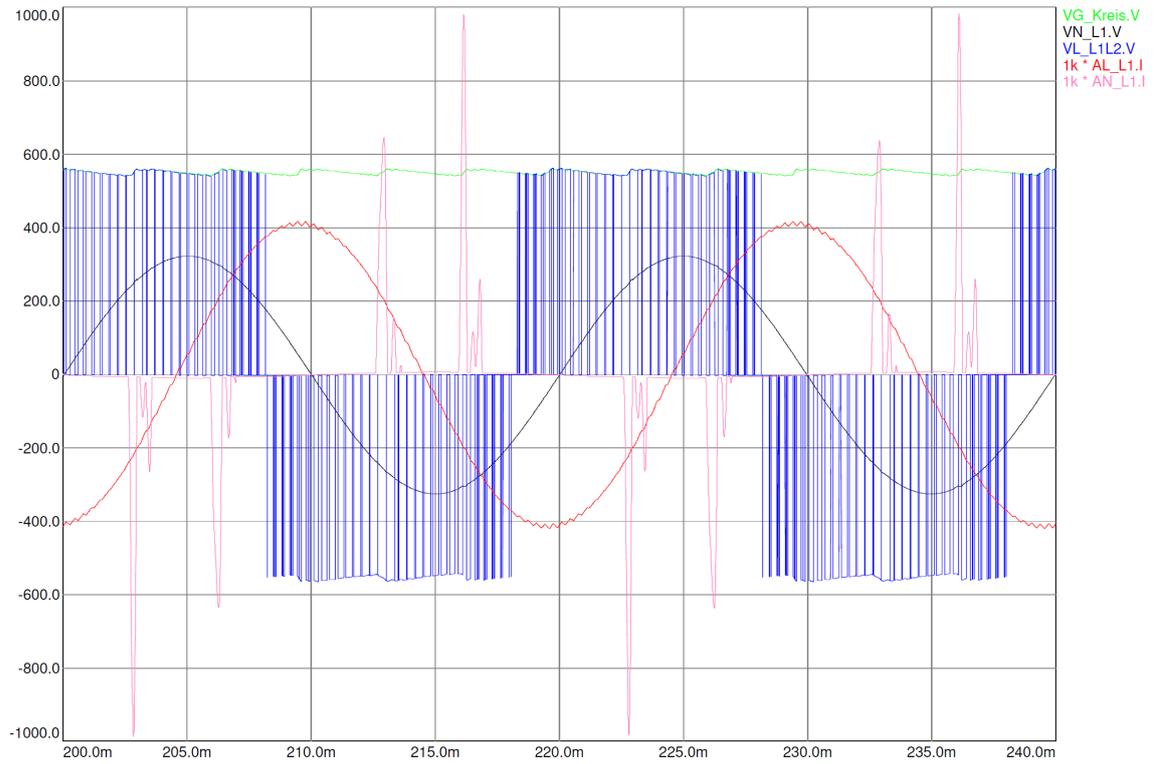


Abbildung 4.4: Signale aus der Simulation des Frequenzumrichters

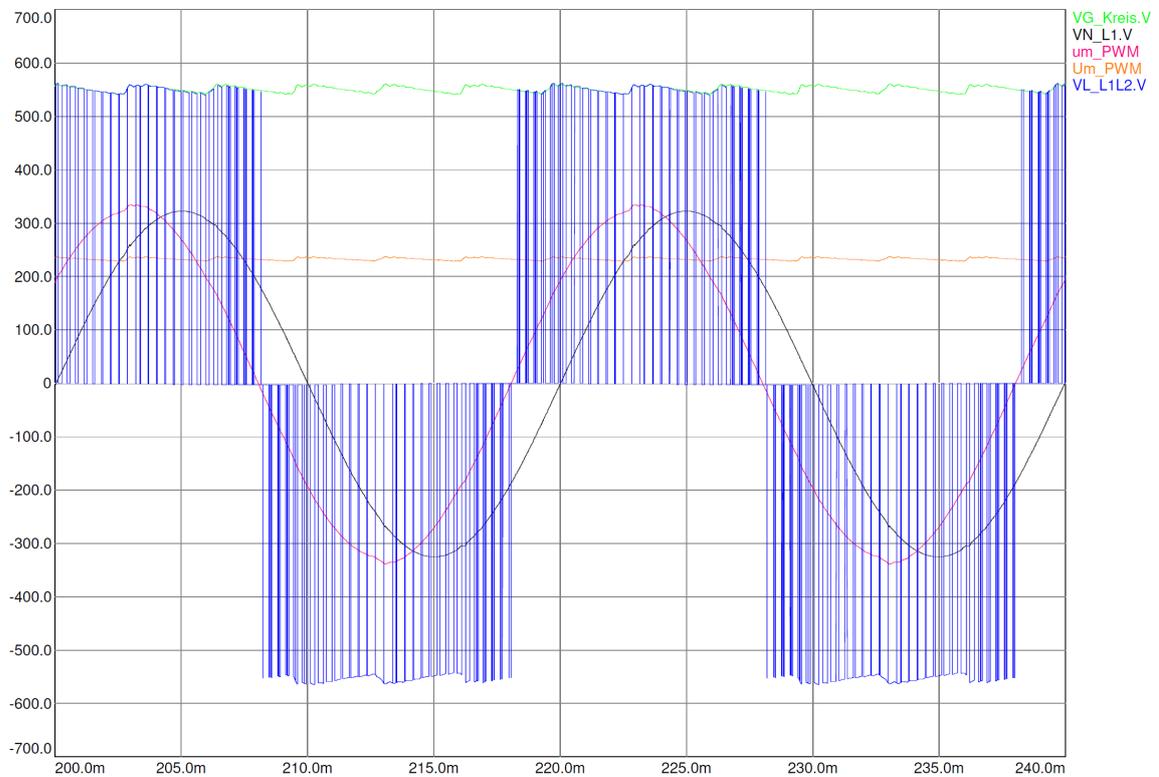


Abbildung 4.5: Effektivwert und Amplitude vom PWM-Signal des Frequenzumrichters

In Abbildung 4.6 ist eine FFT-Analyse des Stromes auf der Netzeingangsseite AN_L1.I durchgeführt. Zu sehen sind die Oberschwingungsanteile der Amplitude. Bedingt durch die Transienten sind die Anteile der 5., 7., 11., 13., 17. und 19. stark ausgebildet. Die Berechnung des THD in Simplorer ergab einen Wert von 2,4%. Dieser ist hoch, jedoch im Rahmen der erlaubten Toleranz nach Tabelle 4.2. Verbessert werden könnte dieser Wert mit einem größeren Glättungskondensator im Zwischenkreis. Was die Messung in der Realität ergibt, wird sich in Kapitel 6.2 zeigen.

Der Gesamte harmonische Verzerrung (THD-Wert) gibt Auskunft darüber wie hoch die nichtlinearen Anteile in einem Signal sind. Also die Verzerrungen eines elektrischen Signals. Dies hat Ähnlichkeit mit dem üblichen Klirrfaktor. Der THD definiert sich wie folgt:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + \dots} \cdot 100\%}{x_1} \quad (4.1)$$

Dabei ist x durch das jeweilige Signal zu ersetzen. Zum Beispiel, wenn das Spannungssignal untersucht werden soll, wird x durch U ersetzt. Nach VDE 0838 wird die Berechnung bis zur 40. Ordnung durchgeführt, wie in der Formel 4.2 dargestellt.

$$THD_U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} \cdot U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

In Abbildung 4.7 ist eine FFT-Analyse der Ausgangsspannung VL_L1L2.V durchgeführt. Diese ergab einen THD von 0,0106%, was einen sehr guten Wert darstellt und auf sehr wenige Oberschwingungsanteile hindeutet. Das das PWM-Signal mit einer Trägerfrequenz von 3kHz erzeugt wird, ist gut zu erkennen. Bei jeweils 2,9kHz und 3,1kHz treten Störsignale auf. Diese Wiederholen sich mit kleiner werdenden Amplitude bei 5,9kHz und 6,1kHz. Bedingt durch die Modulation, wie das PWM-Signal erzeugt wird, treten diese Störungen bei den markanten Frequenzen auf. Der THD ist so gut, weil er bis zu einer Frequenz von 2kHz errechnet wird. Bis zu dieser Frequenz sind fast keine Oberschwingungsanteile zu finden.

Die anderen Signale sind für die FFT-Analyse weniger wichtig.

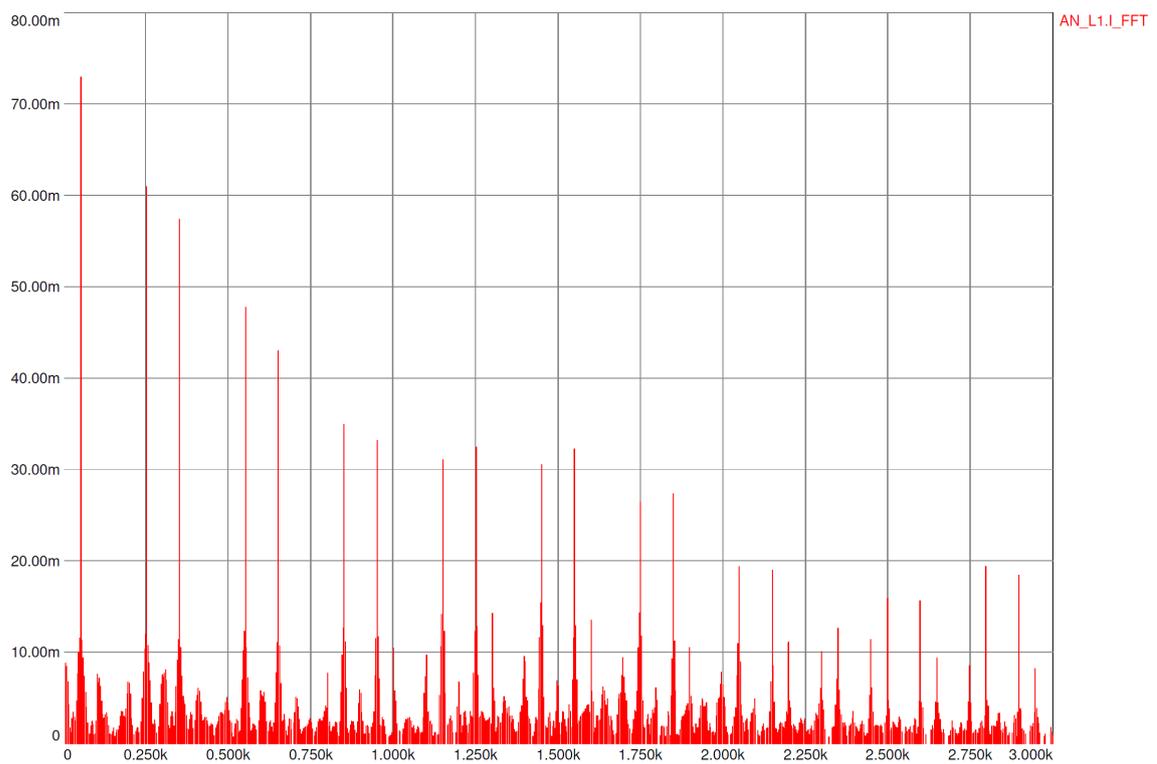


Abbildung 4.6: FFT-Analyse des Eingangsstromes

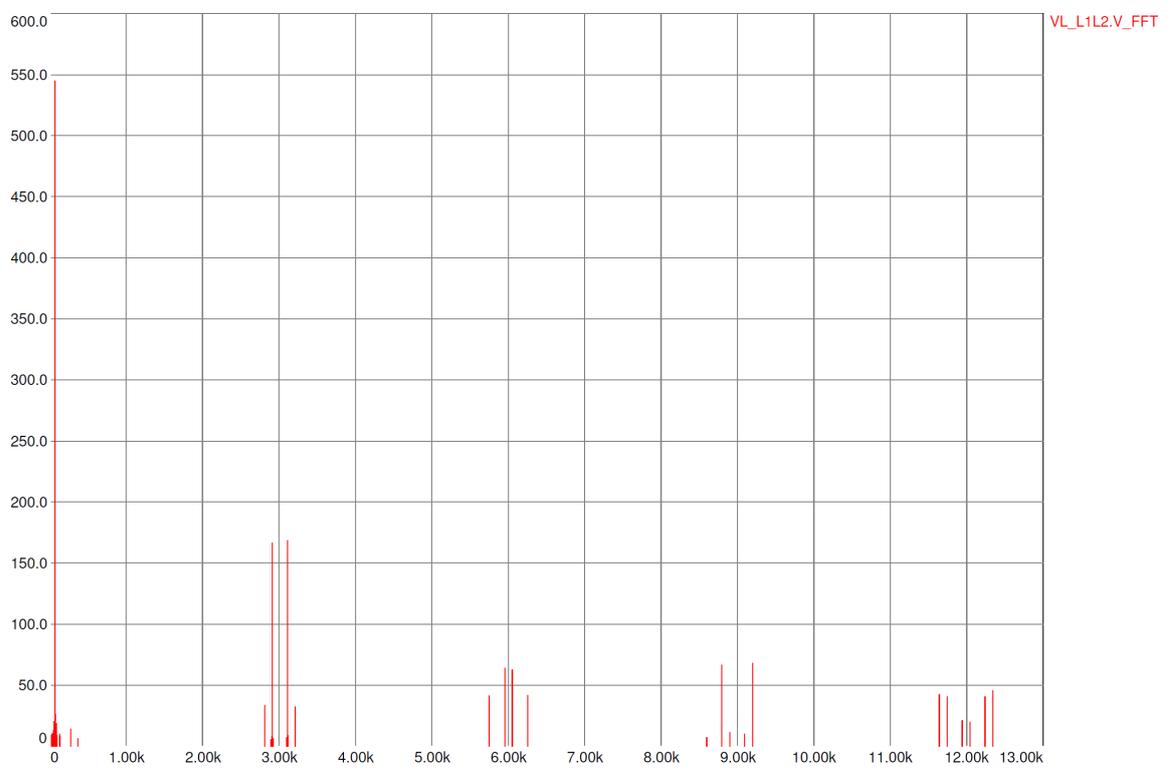


Abbildung 4.7: FFT-Analyse der Lastspannung

4.5 Schlussfolgerung

Die Analyse der Signale ergab, dass keine Verletzung der Vorschriften und Normen vorliegt. Der Motorenprüfstand kann bedenkenlos zur Prüfung der Motoren gefertigt werden und für die spätere Prüfung der Motoren verwendet werden. Was jedoch die anschließende Inbetriebnahme für Ergebnisse liefert, ist an dieser Stelle noch unklar.

4.6 Erstellung der technischen Unterlagen

Entwurf der Steuerung

Nachdem die Form der Realisierung feststeht, kann mit dem Steuerungsentwurf begonnen werden. Um den Entwurf zu vereinfachen wird ein Flussdiagramm⁶ erstellt, welches den ungefähren späteren Prüfablauf wiedergibt. Aufbauend auf dem Flussdiagramm wird eine Entwicklungsmethodik für die Steuerung ausgewählt. Neben Ablaufsteuerungen und Automaten wie Mealy und Moore, ist aufgrund von praktischer Erfahrung, die Entscheidung für "Steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze" (SIPN) gefallen. Diese sind aus der Vorlesung Steuerungstechnik bekannt und eignen sich gut, um daraus späteren Code zu generieren. Aus der Analyse der Anforderungen in Kapitel 2, sind die notwendigen Programminhalte bekannt. Darauf hin kann mit der Erstellung des SIPN's begonnen werden. In jeder Steuerung ist ein Programmkopf notwendig, in dem die Initialisierung sowie sicherheitsrelevante Funktionen wie Not-Aus untergebracht sind. Danach erfolgt die Auswahl des zu prüfenden Motors. Ist dies geschehen, kann die Prüfung der Motoren beginnen. Aus Kapitel 2.2 sind die Anforderungen bekannt und es wird nach folgendem Ablauf die Prüfung durchgeführt,

1. der Anlaufstrom ist in Ordnung,
2. der Betriebsstrom bei ROT1 ist in Ordnung,
3. das Headmarkersignal und Azimut-/Pulsersignal ist in Ordnung,
4. der Betriebsstrom bei ROT2 ist in Ordnung.

Nach Erfüllung der Testbedingungen wird die Prüfung beendet und alle Ergebnisse werden auf dem Display ausgegeben⁷. Auf den kommenden Seiten folgen zwei Flussdiagramme. In der Abbildung 4.8 ist der Prüfablauf dargestellt und in Abbildung 4.9 die Motorenauswahl. Danach folgt in Abbildung 4.10 das SIPN der Logosteuerung.

⁶siehe Abbildung 4.8

⁷siehe Abbildung 6.2 und 6.3

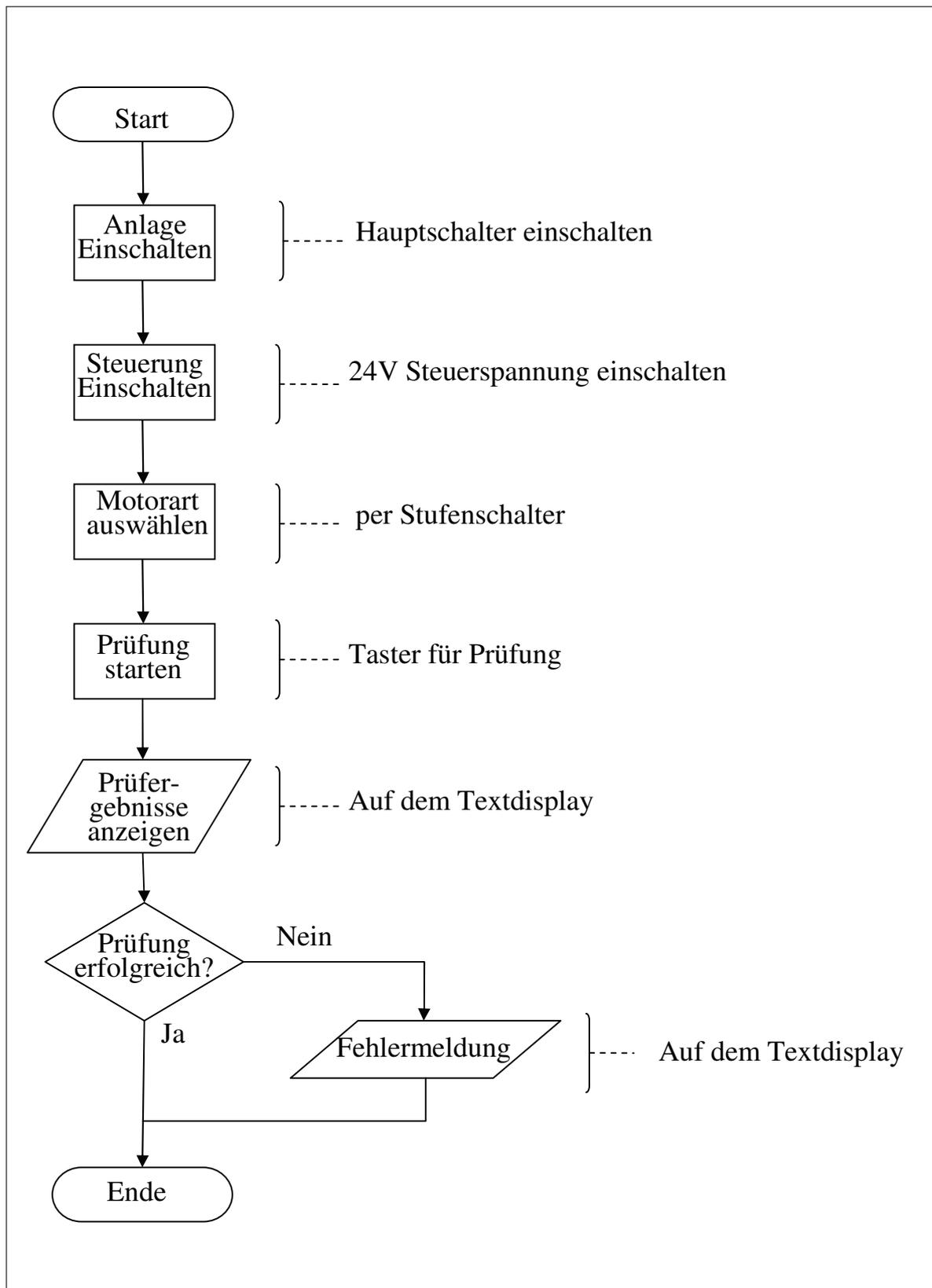


Abbildung 4.8: Flussdiagramm des Prüfablaufs

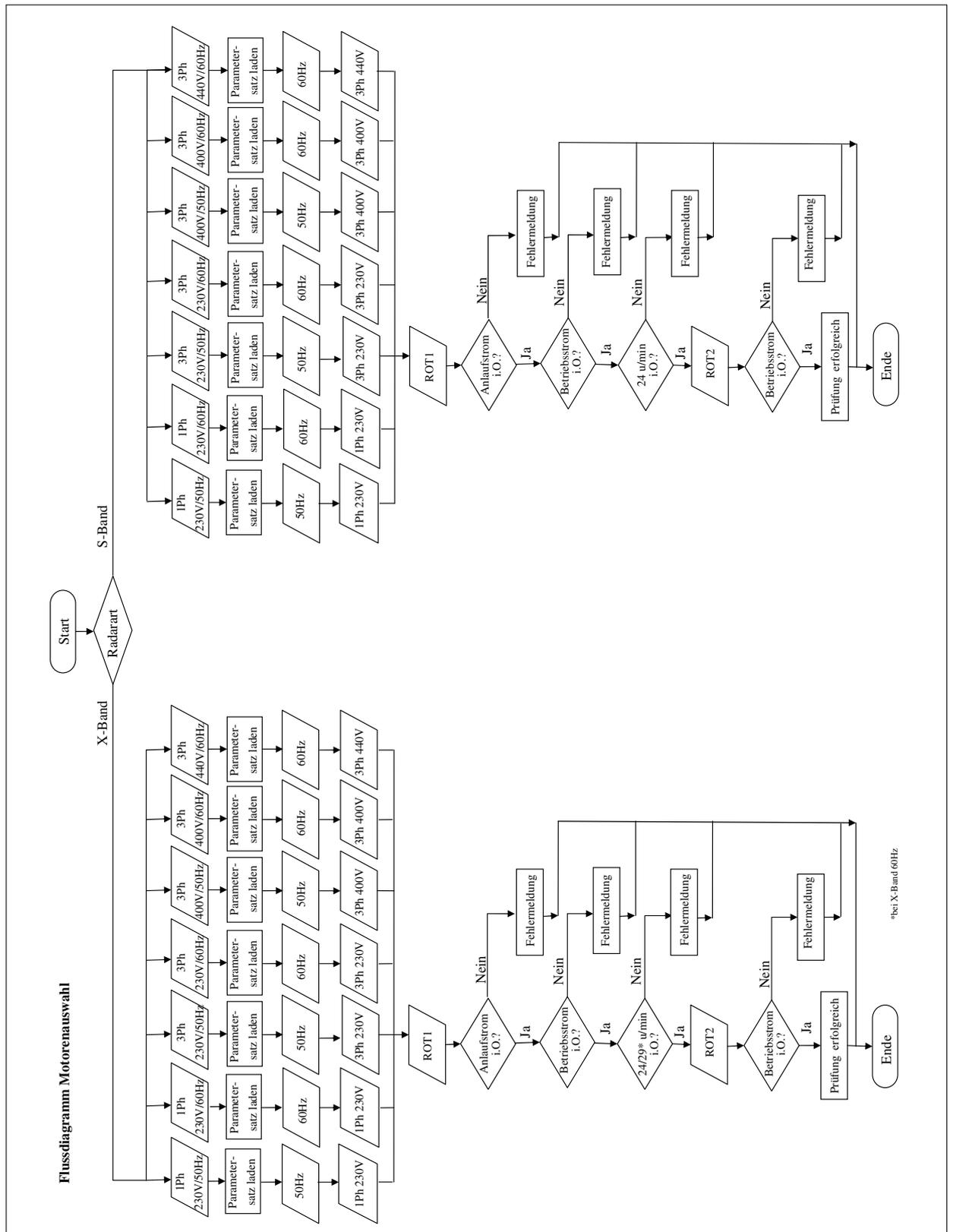


Abbildung 4.9: Flussdiagramm der Motorenauswahl

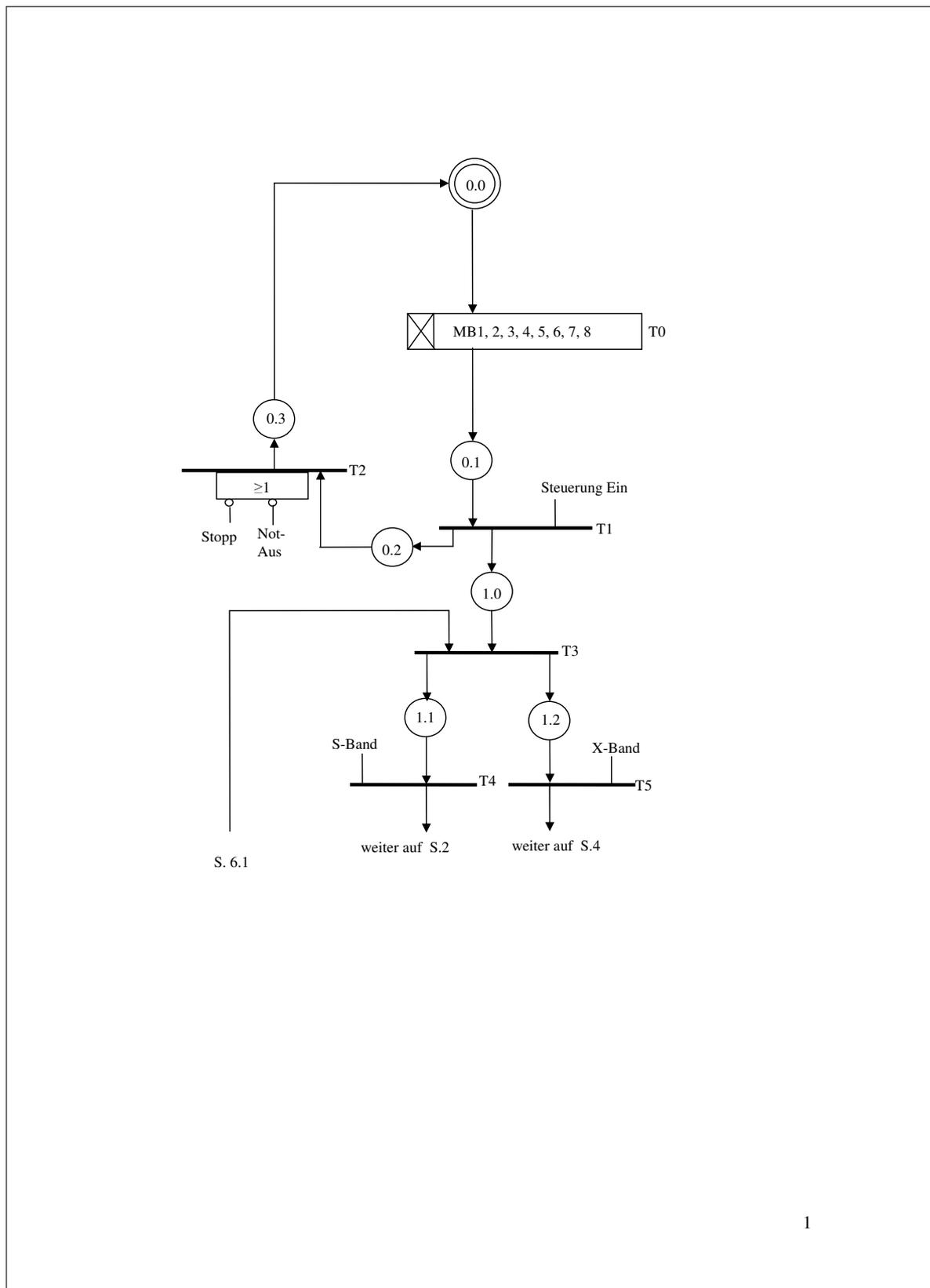
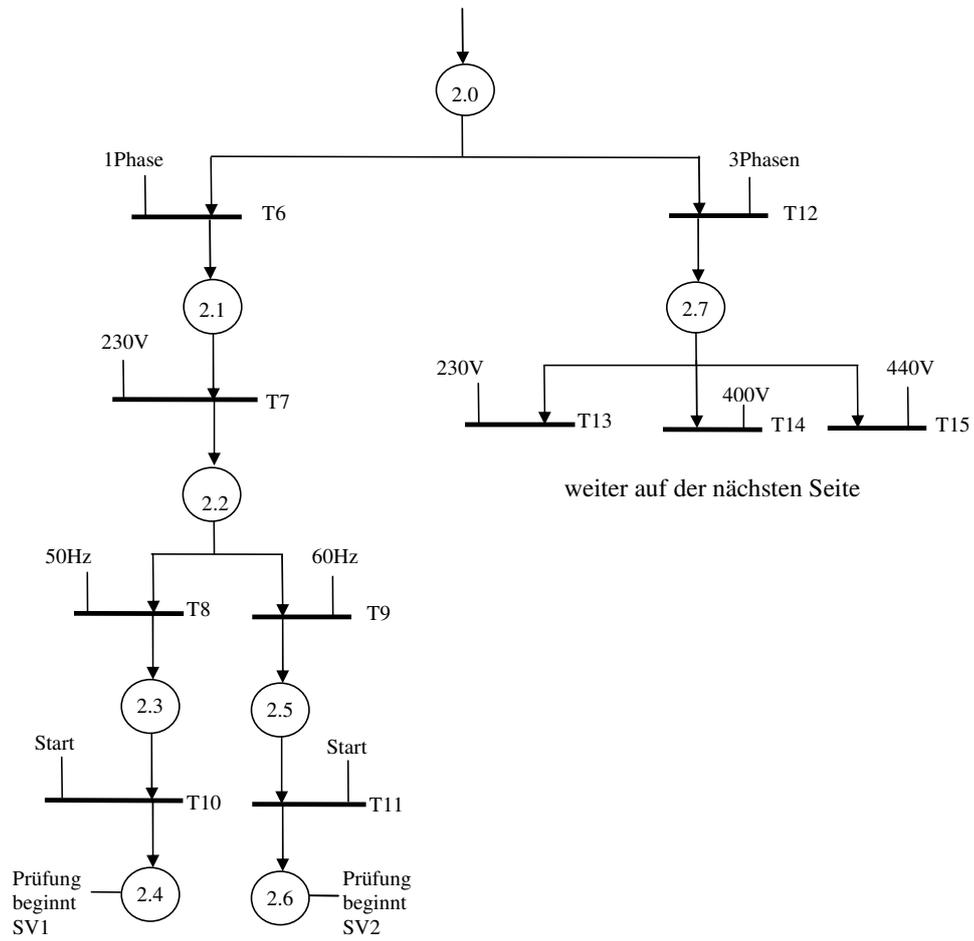
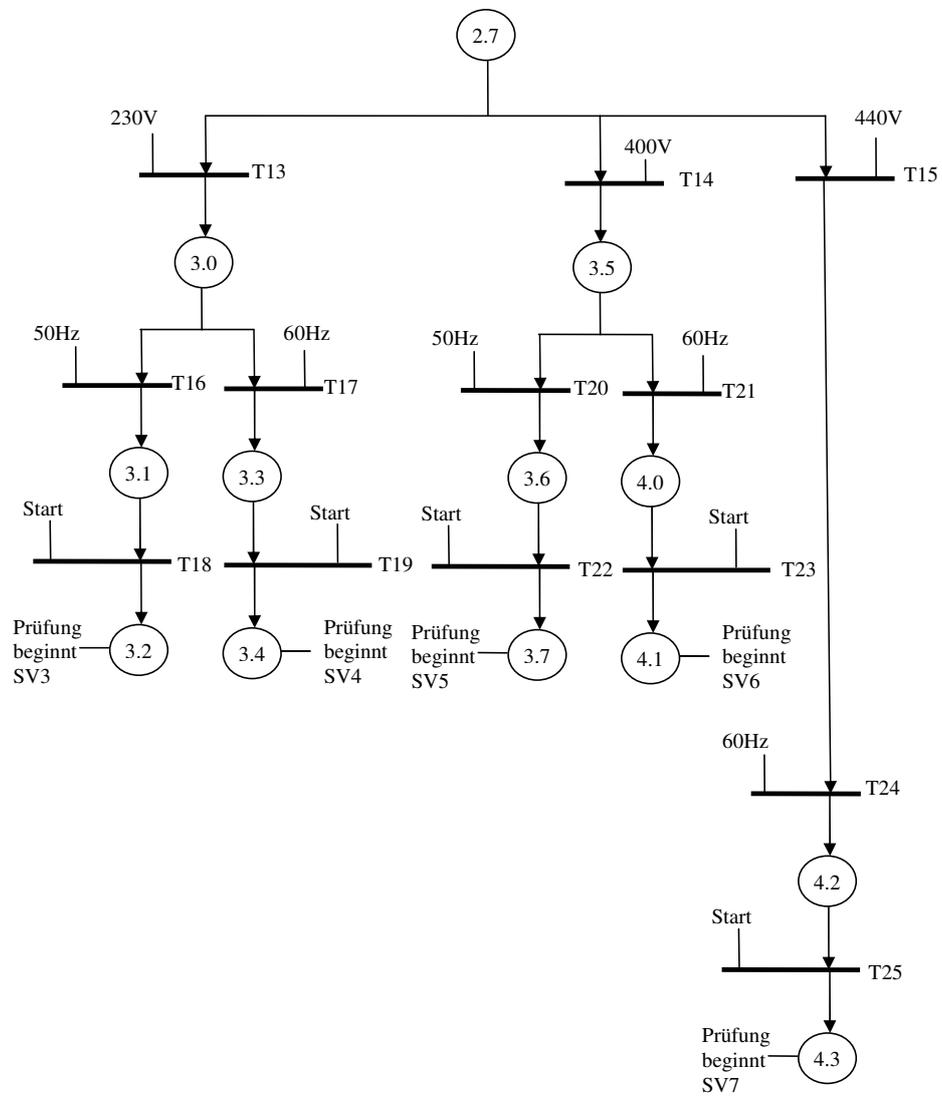


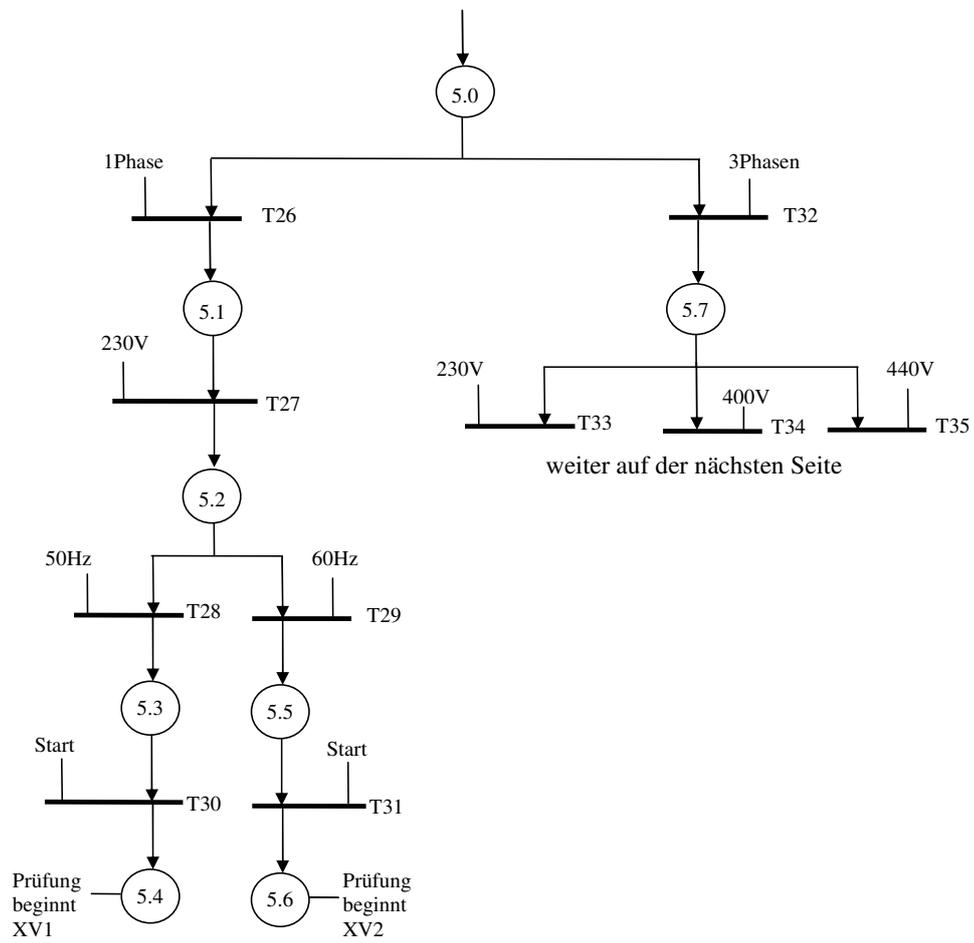
Abbildung 4.10: SIPN der Logosteuerung

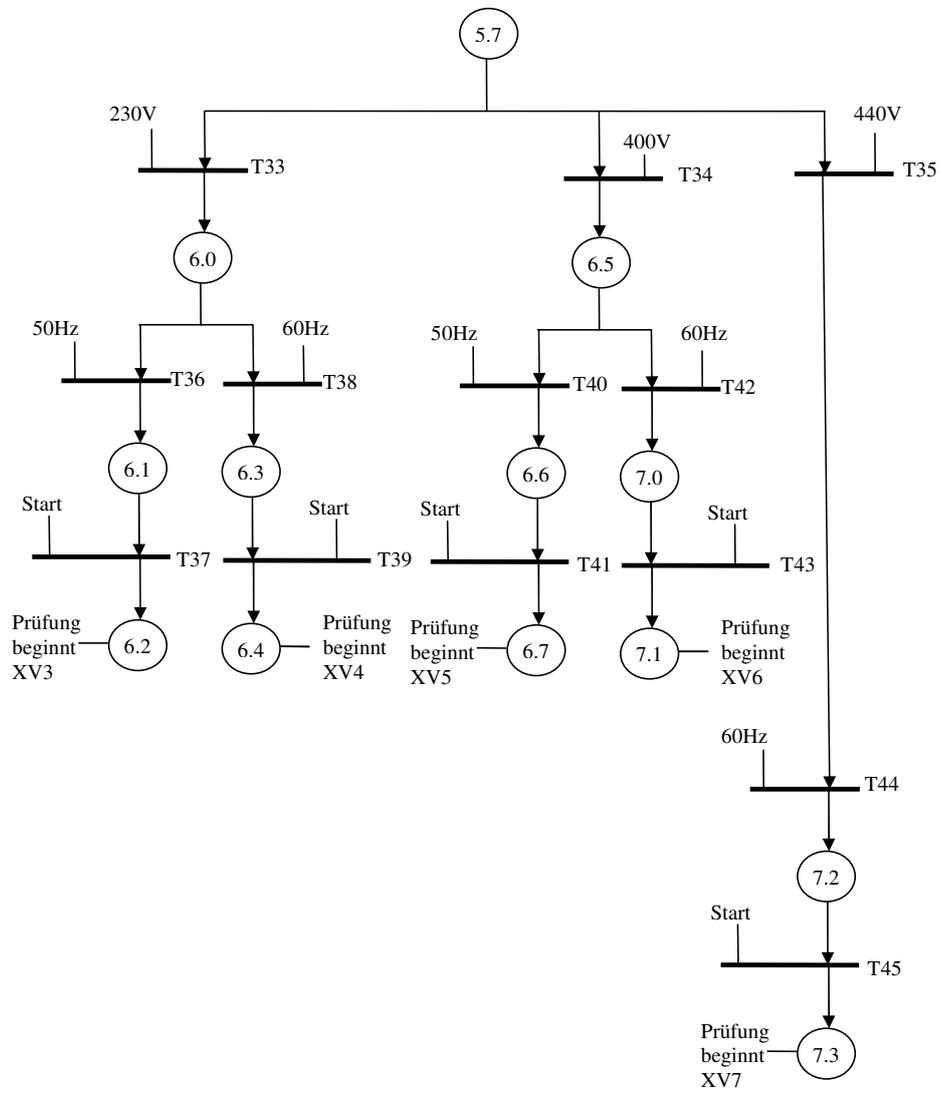
S-Band



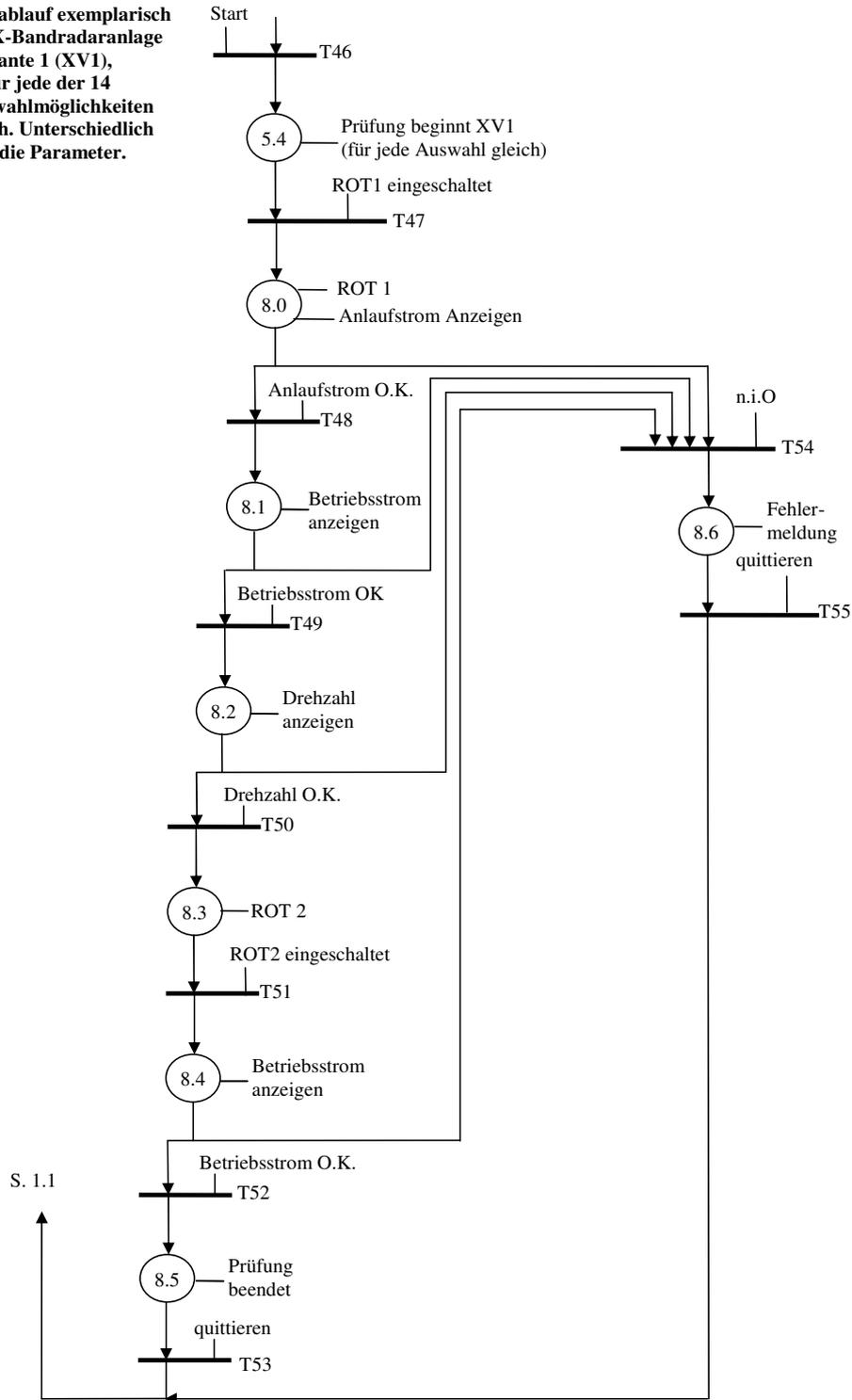


X-Band





Prüfablauf exemplarisch für X-Bandradaranlage Variante 1 (XV1), ist für jede der 14 Auswahlmöglichkeiten gleich. Unterschiedlich sind die Parameter.



Nach Fertigstellung der Flussdiagramme und des Petrinetzes wird mit der Programmierung begonnen. Für die LOGO! existiert eine eigene Software mit der das Steuerungsprogramm erstellt werden kann. Die Bedienung ist intuitiv gehalten und somit selbsterklärend. Das negative an der LOGO! sind die begrenzten Ressourcen. Dadurch ist eine strikte Optimierung notwendig sowie ein Umdenken während des Steuerungsentwurfes. Es stehen in der Steuerung 200 Funktionsblöcke, 27 Merker zur Verfügung und jedes logische Gatter besitzt vier Eingänge. Damit sind die Programmressourcen schnell erschöpft. Die Auswahl des jeweiligen Motors und somit die Parameterfestlegung wird mit Und- sowie Oder-Gattern realisiert. In Differenzschwellwertschaltern können die jeweiligen Werte für die Anlaufströme sowie den Betriebsströmen bei ROT1 und ROT2 abgelegt werden. Wenn die Messwerte der Stromwächter in den zuvor abgelegtem Wertebereich der Differenzschwellwertschaltern liegen, schalten diese Funktionsblöcke und können weiter ausgewertet werden. Die Messwerte liefern Stromwächter, welche an den Analogeingängen der Steuerung I1, I7 und I8 liegen. Die Frequenzumrichter werden mit jeweils einem Analogausgang angesteuert. Als Signal dient dabei ein Spannungspegel von 0V...10V. Darauf hin stellt sich am Frequenzumrichter die gewünschte Motorenspannung ein. Die Ansteuerung der jeweiligen analogen Ausgänge erfolgt mit einem Multiplexer, welche zuvor durch Und- und Oder-Gattern den jeweiligen Wert für die Motorenspannung laden. Die internen Steuerungswerte von 1000 entsprechen dabei einer Ausgangsspannung von 10V.

Die Überprüfung des Azimut-/Pulsersignals bzw. HM-Signal erfolgt mit Zählern. Diese zählen während eines bestimmten Zeitfensters von 2,5 sec. die Pulse und vergleichen diese mit den Vorgaben aus der GR3040PA und GR3041PA. Die Zeit von 2,5 sec. wurde gewählt, weil dies genau einer Umdrehung der Antenne bei ROT1 entspricht. Die Prüfung des Anlaufstromes erweist sich mit der LOGO! als schwierig. Dafür wurde ein Schaltungsaufbau aus Multiplexern, Komparatoren sowie Zählern gewählt, deren Funktionsweise im Zusammenspiel nicht sofort zu erkennen ist. Die momentanen Ströme werden mit einem Komparator überprüft. Dieser entscheidet, ob der Aktualwert größer oder kleiner ist, als der zuvor ermittelte Wert. Ein Zähler wird so lange erhöht, bis der Aktualwert mit dem Zählerwert übereinstimmt. Ist der momentane Wert hingegen kleiner als der Zählerwert, behält der Zähler diesen Wert. Somit ist in dem Zähler der maximale Wert dauerhaft hinterlegt. Dieser Wert entspricht gleichzeitig dem maximalen Strom, welcher mit dem Anlaufstrom gleich zu setzen ist. Bei Betätigung des Austasters werden alle Zähler gelöscht. Ist das Programm der Steuerung bereit, wird der Programmmerker M8 gesetzt und ausgewertet. Danach wird ein Meldetext ("Motorenprüfstand bereit AUS drücken") an das Display übertragen und die Prüfung der Motoren kann beginnen.

Alle anderen Werte werden für den Bediener mit Hilfe eines Meldetextes auf einem Textdisplay angezeigt⁸. Erst nachdem die jeweilige Prüfung bestanden ist, wird mit der nächsten Prüfung begonnen. Der Bediener muss die jeweiligen Messwerte auf dem Bedienerpanel quittieren, bevor mit einer erneuten Prüfung begonnen werden kann. Dies soll sicherstellen, dass die ermittelten Werte zur Kenntnis genommen wurden. In Abbildung 4.11 folgt eine grobe Teilübersicht der gesamten Steuerung.

⁸siehe Abbildung 6.2 und 6.3

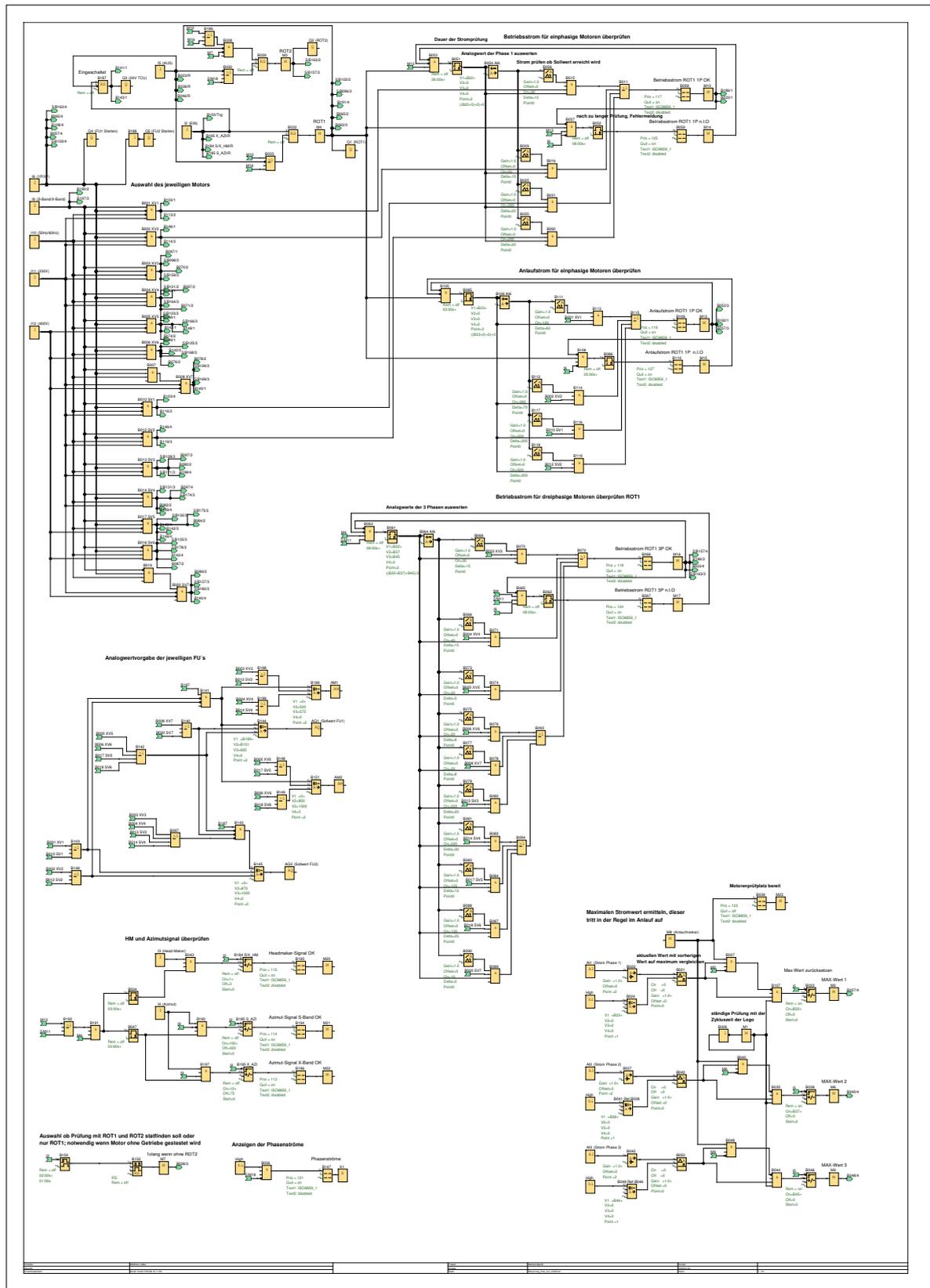


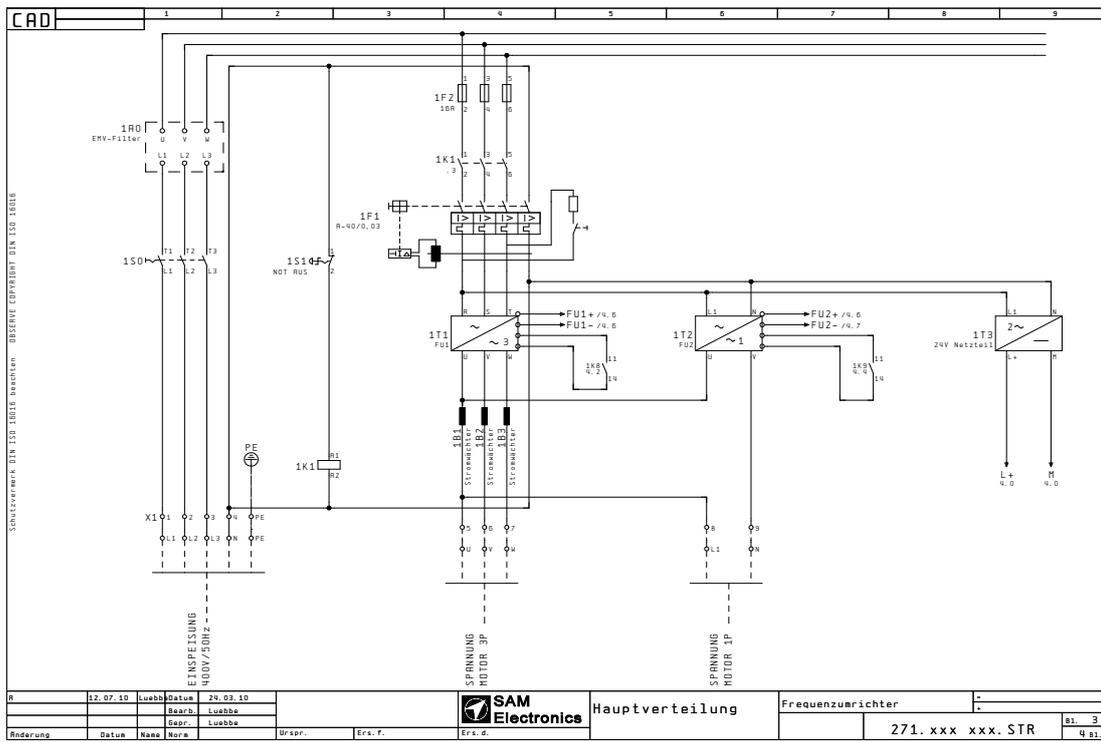
Abbildung 4.11: grobe Übersicht eines Teils der Logosteuerung, detailliertere Zeichnungen sind im Anhang B1

Entwurf der Stromlaufpläne

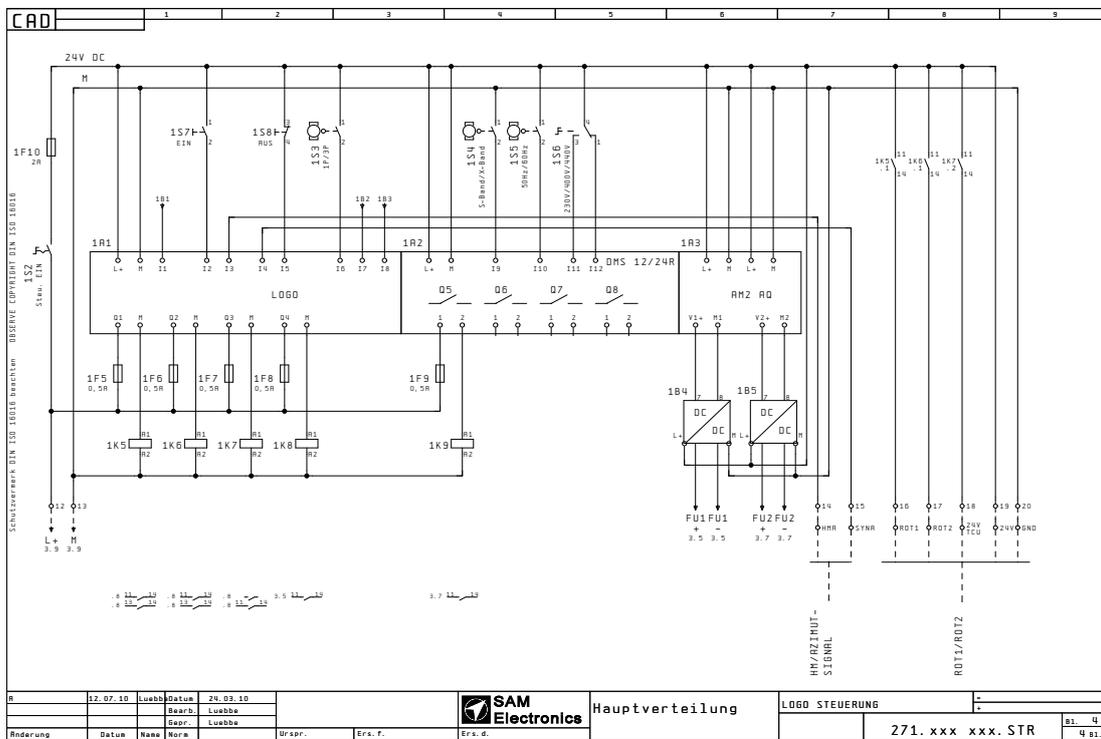
Das Zeichnen der Stromlaufpläne erfolgt mit Eplan 5.7. Dies ist ein gängiges Tool, um unter Einhaltung von DIN-Normen Schaltpläne zu erstellen. DIN 40712 für Allgemeine Schaltzeichen, DIN 40719 für Beschriftung von Betriebsmittel oder DIN 40717 für Schaltzeichen für Installationspläne sind nur einige Beispiele. Das Programm beinhaltet vorgefertigte Bauteilbibliotheken und Symbole. Somit sind die gefertigten Unterlagen entsprechend der Norm und können von jeder Fachkraft umgesetzt werden. Die Reihenfolge und Anordnung der Bauteile der benötigten Komponenten werden nach Herstellerangaben, IEC 364-4-1 (Schutzeinrichtung und Abschaltbedingungen) und weiteren Vorschriften durchgeführt. Dabei sind Leitungsquerschnitte, Selektivität und Sicherheitsvorschriften zu beachten. Die Werte der Sicherungselemente sind vom jeweiligen Hersteller und der Norm vorgeschrieben[3]. Unten folgen in Abbildung 4.12 die Stromlaufpläne.

Entwurf der Konstruktionszeichnungen

Konstruktionszeichnungen werden mit dem Programm AutoCad 2008 angefertigt. Dieses Programm unterstützt den Konstrukteur bei der Zeichenarbeit und erleichtert ihm die Einhaltung der nötigen DIN-Normen, die für technische Zeichnungen gelten. Einige Normen wie die DIN 406 für Maßeintragungen, DIN 1356 für Darstellung von Linien und Schraffuren in Bauzeichnungen oder DIN 6771 für Zeichenblattformate seien hier exemplarisch erwähnt. Bauteile können aus vorhandenen Bauteilbibliotheken genommen werden und in der Zeichnung abgelegt werden. Durch variable Anordnung der Bauteile kann die Größe des Schaltkastens bestimmt werden und der Bauteilplatz optimal ausgenutzt werden. In Abbildung 4.13 folgen die Konstruktionszeichnungen.



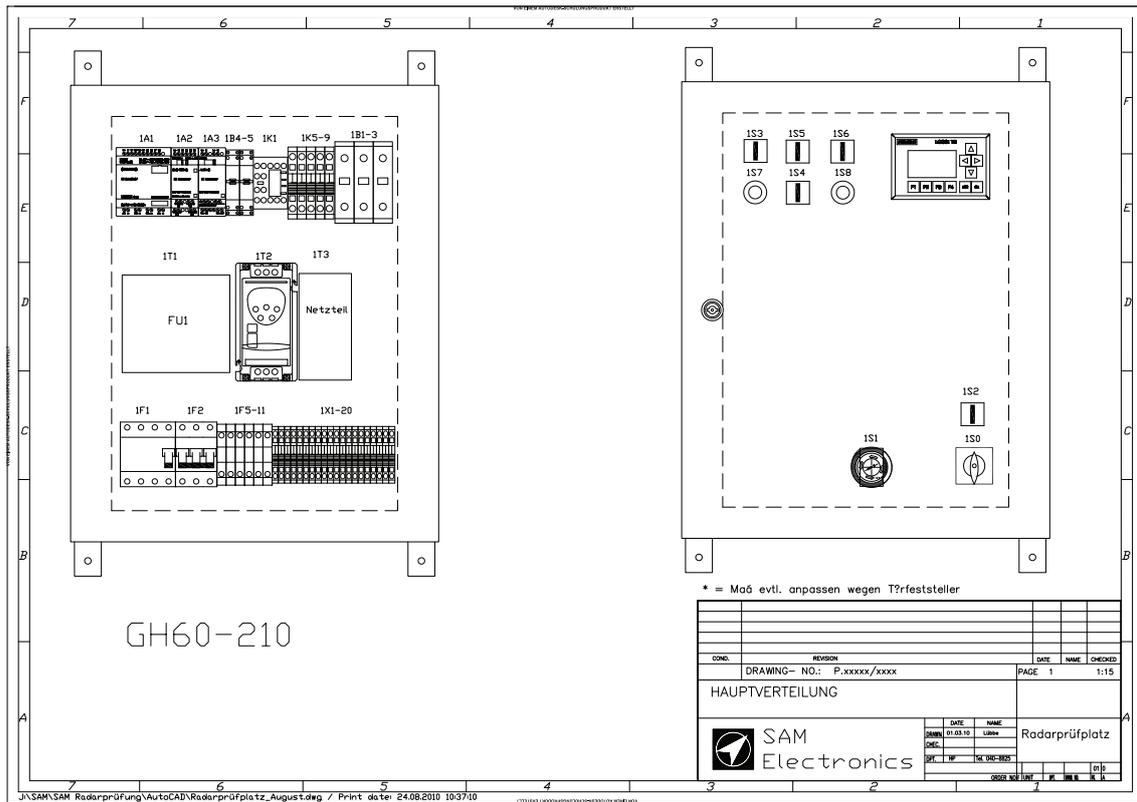
(a) Energieverteilung⁹



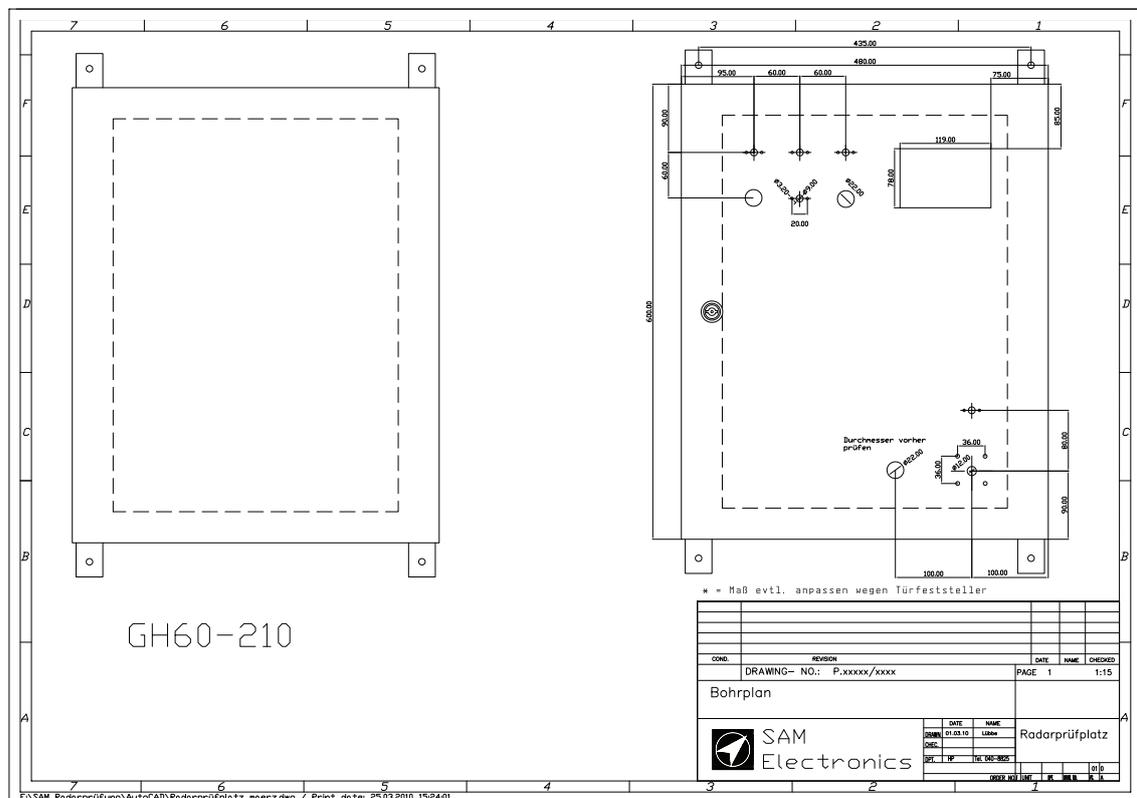
(b) Logosteuerung

Abbildung 4.12: Stromlaufpläne

⁹detailliertere Zeichnungen sind im Anhang B2



(a) Zeichnung der Bauteilanordnung¹⁰



(b) Zeichnung der Durchbrüche

Abbildung 4.13: AutoCad-Zeichnungen

¹⁰detailliertere Zeichnungen sind im Anhang B3

Kapitel 5

Funktionsprüfung des Motorenprüfstandes

Nach dem der Motorenprüfstand fertig gestellt wurde, erfolgt wie bei jeder anderen elektrischen Anlage eine Funktionsprüfung. Diese soll klären, ob alle geforderten Funktionen gegeben sind und alle Geräte einwandfrei funktionieren. Um dies sicher zu stellen wird eine Inbetriebnahme sowie Erstprüfung nach DIN VDE 0100-600 durchgeführt. Anschließend erfolgt ein exemplarischer Test des Motorenprüfstandes mit einer geprüften Radaranlage aus der Fertigung. Danach werden die Auswirkungen des Motorenprüfstandes auf die Motoren sowie Messergebnisse untersucht.



Abbildung 5.1: Neu entwickelter Motorenprüfstand

5.1 Inbetriebnahme des Aufbaus

Die Inbetriebnahme des Aufbaus dient zur Sicherstellung, dass der Motorenprüfstand ordnungsgemäß funktioniert und den gängigen Sicherheitsvorschriften entspricht. Diese soll Verdrahtungsfehler und fehlerhafte Bauteile erkennen. Besonders wichtig ist hierbei, dass der Motorenprüfstand alle elektrotechnischen Sicherheitsanforderungen, wie zum Beispiel Fehlerspannung und Berührungsspannung, Potentialausgleich, Schutzleiter, Leitungsschutzschalter erfüllt. Dabei wird sich nach der DIN VDE 0100-600 gerichtet, welche für die Erstprüfung von elektrischen Anlagen gilt. Diese ist in drei Punkte unterteilt:

- Besichtigung,
- Erprobung und Messung,
- Funktionsprüfung.

Weitere Details sind in der Norm nachzulesen. Hier seien nur wesentliche Punkte erwähnt.



Abbildung 5.2: Schaltkasten des neu entwickelten Motorenprüfstandes

5.1.1 Besichtigung

Bei der Besichtigung der Anlage wird darauf geachtet, dass diese bei abgeschalteter Anlage durchgeführt wird. Dies sollte besonders sorgfältig erfolgen. Dabei sind zu überprüfen dass:

- alle fest angeschlossenen Betriebsmittel den Sicherheitsanforderungen entsprechend ausgewählt wurden (Dimensionierung von Leitungsschutzschaltern passen zu den Leitungsquerschnitten) und entsprechend installiert wurden (Niederspannung getrennt von Steuerspannung, Abstand der Bauteile untereinander),
- Betriebsmittel ohne erkennbare Schäden (geplatzte Gehäuse in Folge zu fest angezogener Schrauben) sind,
- der Schutz gegen elektrischen Schlag erfüllt ist,
- wärmeerzeugende Betriebsmittel nicht stören,
- Schutz gegen direktes Berühren gegeben ist,
- Schutzisolierung vorhanden ist,
- Zielbezeichnung der Leitungen im Verteiler sowie Leitungsverlegung in Ordnung ist,
- Hauptpotentialausgleich vorhanden ist.

Nach DIN VDE 0100-410 muss eine Schutzeinrichtung immer aus zwei unabhängigen Schutzvorkehrungen bestehen. Diese sollte einen Basisschutz und einen Fehlerschutz beinhalten. Zu dem Basisschutz gehören Isolierungen, Abdeckungen und Umhüllungen, die das Berühren aktiver Teile verhindern. Deshalb sind Isolierungen nicht zu beschädigen (kein Anschneiden der Aderisolation), abisolierte Adern sind so weit in die Klemmen einzuführen, dass kein Leitermaterial berührt werden kann und Abdeckungen oder Umhüllungen müssen fest angebracht sein, so dass diese nur mit Werkzeug geöffnet oder entfernt werden können.

Da bei der Netzform des TN-Systemes (Sternpunkt des speisenden Transformators ist geerdet) die gefährliche Berührungsspannung schon direkt gegen Erde entsteht, ist bei diesen Systemen ein Schutzpotentialausgleich Voraussetzung für ein Funktionieren der Abschaltung im Fehlerfall. Beim Besichtigen muss vorab die Sicherheit durch Abschaltung überprüft werden. Dabei kommt es auf die Zuordnung der Abschaltorgane, Leitungsquerschnitte, Leitungslängen, Potentialausgleich und so weiter an[9]. Zu dem Fehlerschutz zählt eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit einem Bemessungsdifferenzstrom $\leq 30mA$. Diese ist durch Betätigen des Testtasters zu überprüfen. Zusätzlich gehören zum Fehlerschutz auch Überstromschutzeinrichtungen, welche in der DIN VDE 0100-430 festgelegt sind. Darin enthalten sind Kabel und Leitungen mit Überstromschutzeinrichtungen, die gegen zu hohe Erwärmung geschützt werden müssen, die sowohl durch betriebsmäßige Überlast als auch bei vollkommenem Kurzschluss auftreten können. Jeder Stromkreis ist mit einer eigenen Sicherung am Anfang des Stromkreises abzusichern. Die Größe der Sicherung richtet sich nach der Belastung des Stromkreises, dem Leiterquerschnitt, der Verlegeart der Leitung und der Häufung. Bei der Besichtigung ist zu überprüfen, ob die Überstromschutzeinrichtungen vorhanden und richtig dimensioniert bzw. eingestellt sind.

5.1.2 Erprobung und Messung

Nach DIN VDE 0100-600 ist das Erproben und Messen vorzugsweise in nachfolgender Reihenfolge durch zu führen. Dies erfolgt nun bei eingeschalteter Anlage und somit ist besondere Sorgfalt gefordert,

- Durchgängigkeit der Schutzleiter und der Verbindungen des Hauptpotentialausgleichs,
- Isolationswiderstand der elektrischen Anlage,
- Schutz durch sichere Trennung der Stromkreise bei SELV, PELV und Schutztrennung,
- Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung (Leitungsschutzschalter),
- zusätzlicher Schutz (RCD, NOT-AUS),
- Spannungspolarität,
- Spannungsfestigkeit,
- Phasenfolge der Außenleiter (beeinflusst Drehrichtung des Motors).

Im Falle eines festgestellten Fehlers sind Erprobungen und Messungen, die durch diesen Fehler möglicherweise beeinflusst wurden, nachdem dieser Fehler behoben wurde, zu wiederholen. Die einzelnen Messmethoden seien nicht näher erläutert. Durchgeführt wurden die Messungen mit dem Metratester 5+ (SAM Prüfnummer: 271189465).

5.1.3 Funktionsprüfung

In der Funktionsprüfung wird nun die Anlage eingeschaltet und auf alle Funktionen hin überprüft. Dazu muss mit dem Einstellen der Knebelschalter, auch die richtige Auswahl des Motorentypes durch die Steuerung erfolgen und sich daraufhin die benötigte Motorenspannung am Ausgang des jeweiligen Frequenzumrichters einstellen. Es wird überprüft, ob die Steuersignale korrekt an die Radaranlage von ROT1, ROT2 sowie der 24V für TCU übergeben werden und ob die Signale vom HM und Azimut/Pulser bei der Steuerung ankommen. Die Signale und Spannungen werden mit dem Multimeter Fluke 177 überprüft. Ob die Steuerung korrekt arbeitet wird mit Hilfe eines Laptops kontrolliert, welcher an die LOGO! mit einem Kabel angeschlossen ist und die momentanen Betriebszustände der Funktionsblöcke, den Zustand von Merkern, Eingängen und Ausgängen wiedergibt. Nach dem alle Prüfungen erfolgreich bestanden und einige Verdrahtungsfehler beseitigt wurden, erfolgt ein exemplarischer Test einer Radaranlage.

Kapitel 6

Exemplarischer Test einer Radaranlage

Für den Funktionstest des Motorenprüfstandes wurde eine aus der laufenden Produktion stammende Radaranlage gewählt. Die Motordaten der X-Bandradaranlage sind 3x400V/50Hz. Nach der Prüfanweisung GR3040PA werden die Steckverbinder im ausgeschalteten Zustand des Motorenprüfstandes angeschlossen. Der Motorentyp wird mit Hilfe der Knebelschalter eingestellt und die Prüfung mit dem Starttaster begonnen. Nachstehend folgen Abbildungen des Prüfablaufes mit den gemessenen Werten.



Abbildung 6.1: X-Bandradaranlage ohne Antenne

6.1 Testergebnisse der X-Bandradaranlage

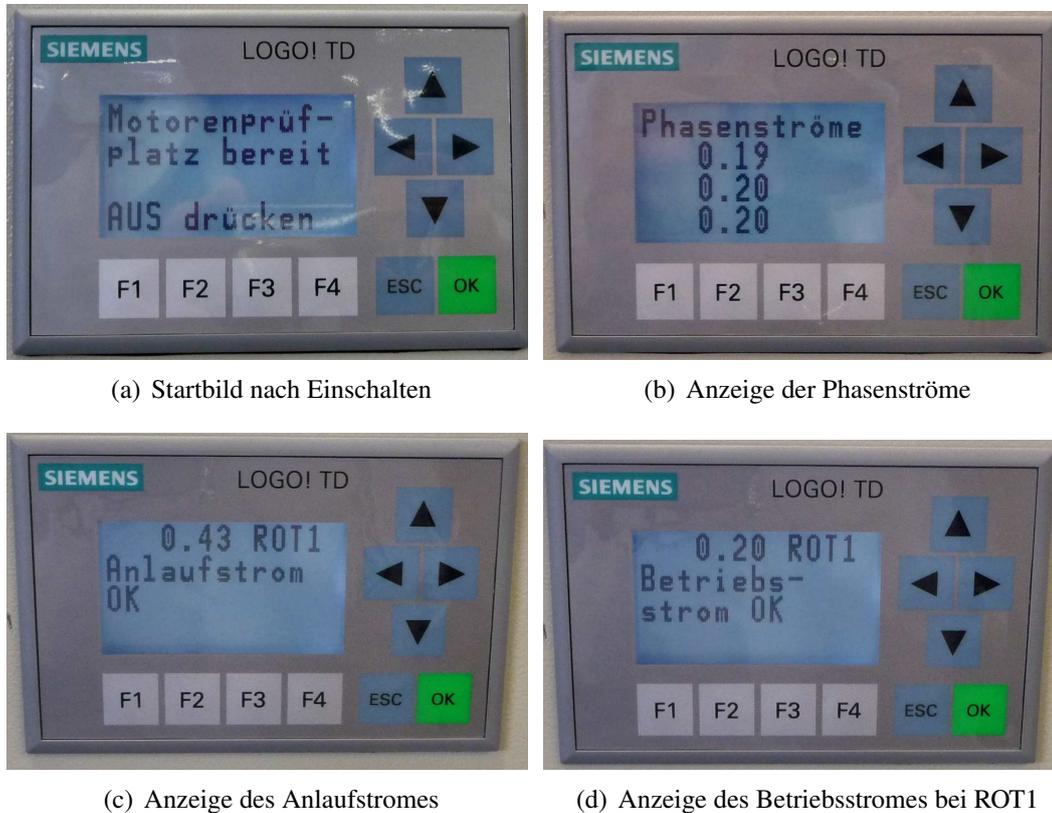


Abbildung 6.2: Prüfergebnisse der X-Bandradaranlage Teil A

Nach dem Einschalten des Hauptschalters sowie der Steuerspannung, laufen die Steuerung sowie die Frequenzrichter hoch. Danach ist die Steuerung betriebsbereit und es wird eine Textmeldung auf dem Display ausgegeben, dass mit der Prüfung begonnen werden kann (Abbildung 6.2a). Nachdem diese Meldung mit "OK" quittiert ist, werden die Phasenströme dauerhaft angezeigt (Abbildung 6.2b) so dass eine Schiffslast des Motors erkennbar wird. Nach Testbeginn wird während den ersten drei Sekunden der maximale Strom ermittelt und als Anlaufstrom ausgegeben (Abbildung 6.2c). Ist dieser nicht in Ordnung, erfolgt nach weiteren zwei Sekunden eine Fehlermeldung. Ist der Anlaufstrom in Ordnung, wird innerhalb von sechs Sekunden der Betriebsstrom ermittelt und gleichzeitig erfolgt die Überprüfung des Azimut-/Pulsersignals sowie des HM-Impuls. Nach diesen sechs Sekunden erfolgt die Ausgabe des Betriebsstromes (Abbildung 6.2d). Ist dieser nicht in Ordnung, wird nach weiteren zwei Sekunden eine Fehlermeldung ausgegeben. Ist jedoch die Messung erfolgreich, wird auf ROT2 umgeschaltet und es beginnt die gleiche Messung wie bei ROT1. Dies ist in Abbildung 6.3 zu sehen.



(a) Anzeige des Betriebsstromes bei ROT2

(b) Anzeige des Azimut-/Pulserimpulse pro Um-
drehung

(c) Anzeige des HM

Abbildung 6.3: Prüfergebnisse der X-Bandradaranlage Teil B

Innerhalb von drei Sekunden wird der Betriebsstrom für ROT2 ermittelt (Abbildung 6.3a). Ist dieser Wert OK, wird die Prüfung beendet, die Radaranlage wird abgeschaltet und es erfolgt die Ausgabe der ermittelten Werte auf dem Textdisplay. Ist die Messung nicht in Ordnung, erfolgt nach weiteren zwei Sekunden eine Fehlermeldung. Somit dauert der gesamte Messvorgang maximal zwölf Sekunden, wenn die Radaranlage keinen Fehler aufweist. Die Anzahl der Azimut-/Pulserimpulse (Abbildung 6.3b) kann sich mit Betätigung der Cursortasten “nach unten” angezeigt werden. Ebenso kann so sich das HM-Signal angezeigt werden lassen (Abbildung 6.3c). Folgend wird eine Fehlerbetrachtung der gewonnen Messergebnisse betrieben.

6.2 Auswirkungen des Frequenzumrichters auf die Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen des Frequenzumrichters auf die Messergebnisse untersucht. Dafür werden Messwerte mit dem alten Prüfgerät, dem neuen Motorenprüfstand, einem Oszilloskop und einem Multimeter aufgenommen. Die aufgenommenen Messwerte werden diskutiert und auf Abweichungen hin untersucht. Dafür wird die gleiche Radaranlage benutzt, welche auch im exemplarischen Test verwendet wurde.

Die Phasenströme werden mit dem Multimeter Fluke 177 gemessen. Dieses Messgerät besitzt die True RMS-Fähigkeit (Effektivwertmessung). Mit dem Oszilloskop TDS 3032 von Tektronix (SAM Prüfnummer: 271189406) und einer Stromzange 1146A AC/DC Current Probe von Agilent (SAM Prüfnummer: 271189647) wird das Stromsignal dargestellt. Die Stromzange eignet sich besonders gut zur Messung von Oberschwingungen, da sie einen linearen Frequenzverlauf von 0Hz bis 2kHz bei einer Verstärkung von 100mV/A aufweist[19]. Dies ist wie in Kapitel 4.2 erwähnt das Frequenzband, welches nach der DIN VDE 0847 Teil 4-7 auf Harmonische hin untersucht werden muss.

Der Messfehler der Stromzange beträgt $\pm 3\%$ vom Messwert[19].

Vom Oszilloskop beträgt der Messfehler bei Mittelwertbildung, welche für das alte Prüfgerät verwendet wird[20]

$$\pm 0,02^3 \cdot \text{Messwert} + 0,1 \text{ division.}$$

Bei normaler Samplinganwendung, welche für den Motorenprüfstand verwendet wird, beträgt der Messfehler[20]

$$\pm 0,02^3 \cdot \text{Messwert} + 0,15 \text{ division} + 1,2 \text{ mV.}$$

Alle Messwerte wurden am Außenleiter L1 aufgenommen.

Fehler der Stromzange bei Betriebsstrom ROT1

$$\pm 3\% \cdot 608 \text{ mA} = \pm 18,24 \text{ mA}$$

$$\pm 3\% \cdot 620 \text{ mA} = \pm 18,6 \text{ mA}$$

altes Prüfgerät

neues Prüfgerät

Fehler des Oszilloskops bei Betriebsstrom ROT1

$$\pm 0,02^3 \cdot 608 \text{ mA} (\pm 18,24 \text{ mA}) + 0,1 \cdot 200 \text{ mA} = \pm 20 \text{ mA}$$

$$\pm 0,02^3 \cdot 620 \text{ mA} (\pm 18,6 \text{ mA}) + 0,15 \cdot 200 \text{ mA} + 12 \text{ mA} = \pm 42 \text{ mA}$$

altes Prüfgerät

neues Prüfgerät

Fehler der Stromzange beim Anlaufstrom

$$\pm 3\% \cdot 3500 \text{ mA} = \pm 105 \text{ mA}$$

$$\pm 3\% \cdot 3200 \text{ mA} = \pm 96 \text{ mA}$$

altes Prüfgerät

neues Prüfgerät

Fehler des Oszilloskops beim Anlaufstrom

$$\pm 0,02^3 \cdot 3500 \text{ mA} (\pm 105 \text{ mA}) + 0,1 \cdot 500 \text{ mA} = \pm 50 \text{ mA}$$

$$\pm 0,02^3 \cdot 3200 \text{ mA} (\pm 96 \text{ mA}) + 0,15 \cdot 500 \text{ mA} + 12 \text{ mA} = \pm 87 \text{ mA}$$

altes Prüfgerät

neues Prüfgerät

Das Multimeter kann einen Effektivwechselstrom im Bereich von 45Hz bis 1kHz messen. Dabei beträgt der Messfehler $\pm 1,5\% + 3$ vom Messwert.

Fehler des Multimeters beim Betriebsstrom ROT1

$$\pm 1,5\% \cdot 218mA + 3 = \pm 6,27mA$$

altes Prüfgerät

$$\pm 1,5\% \cdot 209mA + 3 = \pm 6,14mA$$

neues Prüfgerät

In folgender Tabelle 6.1 werden die gemessenen Werte der Prüfvorrichtungen, mit den Messergebnissen des Oszilloskops gegenüber gestellt. Es wird ersichtlich, dass die Mes-

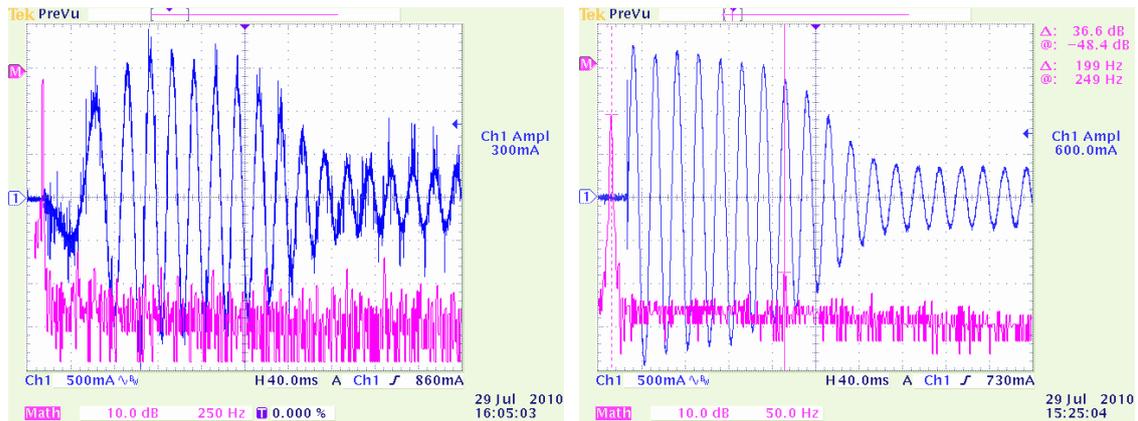
	gemessene Werte vom		Messwerte des Oszilloskops vom	
	alten Prüfgerät	neuen Motorenprüfstand	alten Prüfgerät	neuen Motorenprüfstand
Anlaufstrom	nicht bestimmbar	0,42A	1,24A±0,05A	1,15A±0,09A
Betriebsstrom bei ROT1	0,23A	0,20A	0,21A±0,02A	0,22A±0,04A
Betriebsstrom bei ROT2	0,16A	0,14A	nicht erforderlich	

Tabelle 6.1: Stromwerte für den X-Bandradarmotor dreiphasig 400V/50Hz

sung der Phasenströme mit beiden Prüfvorrichtungen ausreichend genau ist. Beide weisen zwar eine Differenz von 30mA auf, diese liegt jedoch im Bereich der Messgenauigkeit. Der Hersteller der Motoren schreibt eine Abweichung von $\pm 10\%$ bei einem Nennstrom von 0,32A vor[14]. Da die Prüfung bei Leerlauf statt findet, kann dieser Wert nicht erreicht werden. Als bester Referenzwert für die Strommessung bei ROT1, dient der Stromwert des Multimeters. Dies ist durch die True RMS-Fähigkeit am genauesten. Die Messergebnisse sind:

218mA ± 6,27mA für das alte Prüfgerät und 209mA ± 6,14mA für das neue Prüfgerät. Die Bestimmung des Anlaufstromes bei dem neuen Motorenprüfstand ist ungenau und stimmt nicht mit den Angaben des Herstellers überein (0,8A...1,2A). Hauptgrund für die Messgenauigkeit ist die langsame Datenerfassung. Die Analogwerte der LOGO! sowie der Stromwächter sind nicht für die Bestimmung kurzer Stromspitzen wie Anlaufströme ausgelegt. Nach der Definition ist der Anlaufstrom der höchste Stromwert der während einer Periode ermittelt werden kann. Der Stromverlauf ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

In den Abbildungen 6.5a und 6.7a ist die Stromverzerrung, hervorgerufen durch die Leistungselektronik des Frequenzumrichters, deutlich zu sehen. Eine Messung der Harmonischen hat ergeben, dass die Stromverzerrungen keine negativen Einflüsse auf den Motor haben und zu keiner nennenswerten zusätzlichen Belastung der Wicklungen führen. Die Messdaten liegen in der Toleranz nach DIN VDE 0838 Teil 2. Die Stromwerte aus Tabelle 4.1 werden zu keiner Zeit überschritten. Wenn die Messung mit einem größeren S-Bandmotor durchgeführt worden wäre, kann die prozentuale Abweichung der 5.Oberschwingung zur Grundschwingung errechnet werden durch $\frac{16A}{100\%} = \frac{1,14}{4,81\%}$. Danach wäre der Anteil der 5.Oberschwingung mit 1,74% von der Grundschwingung (Abbildung 6.5d) innerhalb der Norm. Im direkten Vergleich zwischen alten Prüfgerät und neuen Motorenprüfstand wird ebenfalls ersichtlich, dass die Anteile der Oberschwingung mit dem Einsatz des Frequenzumrichters zunehmen (Abbildung 6.5a und 6.9a), jedoch nicht viel größer werden als beim direkten Betrieb am Netz (Abbildung 6.5d mit 35,2dB und 6.9 mit



(a) Anlaufstrom des neuen Motorenprüfstandes

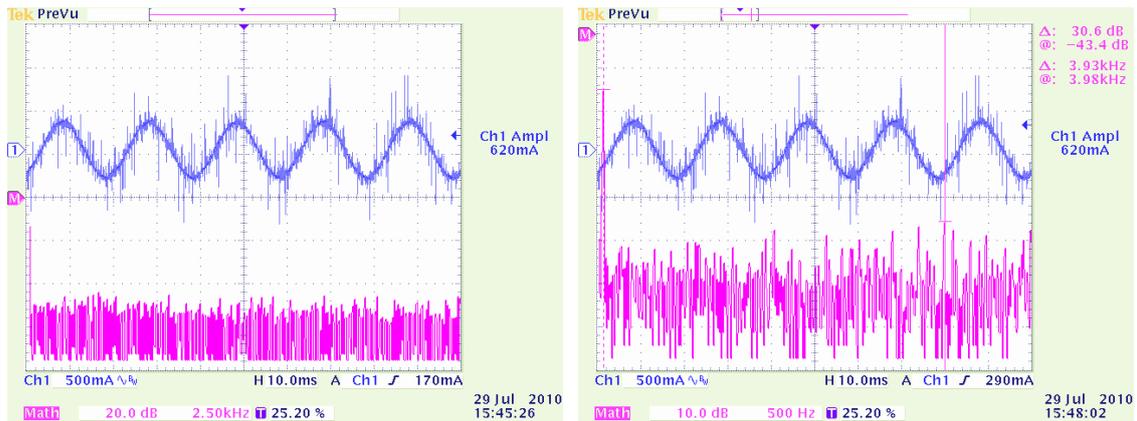
(b) Anlaufstrom der alten Prüfvorrichtung

Abbildung 6.4: Anlaufströme der X-Bandradaranlage

37,8dB). Wesentlich kritischer zu betrachten ist die mangelnde Kühlung des Motors durch den Lüfter in der Radaranlage. Die Radaranlage ist luftdicht verschlossen und verhindert somit Frischluftzufuhr. Diese Auswirkungen können nicht betrachtet werden, wirken sich an warmen Sommertagen gravierend auf die Erwärmung der Motorenwicklungen aus. Die folgenden Oszilloskopabbildungen werden mit einem Tektronix Oszilloskop TDS 3032, einer Stromzange 1146A AC/DC Current Probe von Agilent mit einem Teilerverhältnis von 100mV/A und einem Tastkopf von TESTEC TT-HV 250 mit der Teilung 1:100 aufgenommen. Der Tastkopf wurde vor der Messung abgeglichen. Für die FFT-Analyse wird ein Erweiterungsmodul für das TDS 3032 verwendet. Die Einstellungen dafür sind,

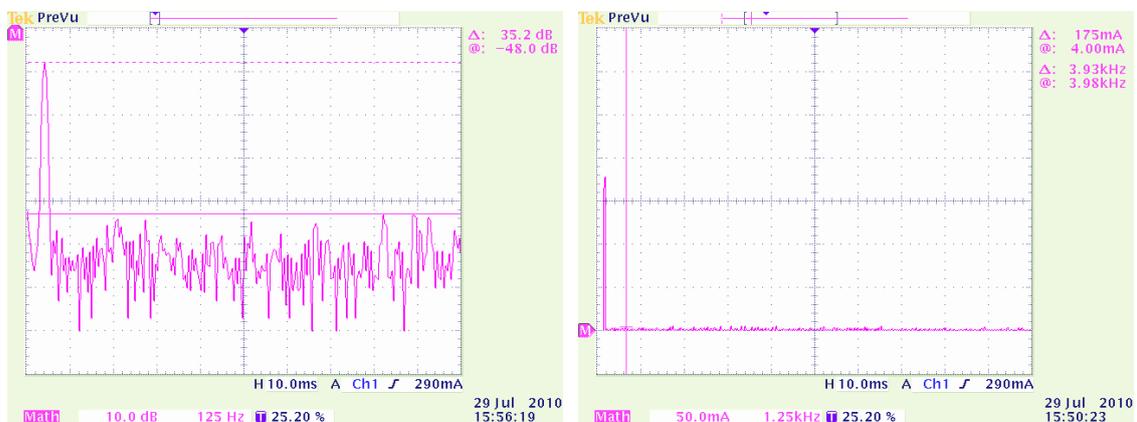
- ein Signalerfassungsmodus Normal für einen niedrigen Rauschuntergrund und eine bessere Frequenzauflösung als Signale im Fast Triggermodus,
- eine AC-Kopplung um DC-Anteile, die zu einer falschen Betragsdarstellung der Signale führen können, zu unterdrücken,
- eine Mittelung mit 32 Abtastwerten um unkorreliertes Rauschen und Aliaskomponenten zu unterdrücken,
- ein Blackman-Harris-Fenster, da die Auflösung der Beträge sehr gut ist und die Frequenzen schwächer dargestellt werden. Die Frequenzen sind weniger relevant. Diese Darstellung eignet sich jedoch sehr gut um Oberwellen zu untersuchen¹.

¹Empfehlungen aus der Bedienungsanleitung des FFT-Moduls



(a) Strom durch L1 bei ROT1 mit FFT bis 25kHz

(b) Strom durch L1 bei ROT1 mit FFT bis 5kHz

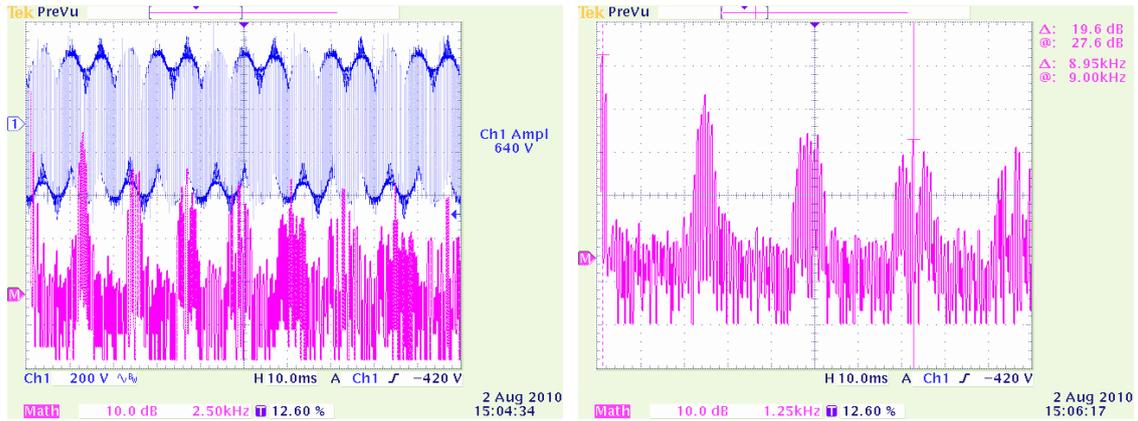


(c) FFT in logarithmischer Darstellung bis 1,25kHz

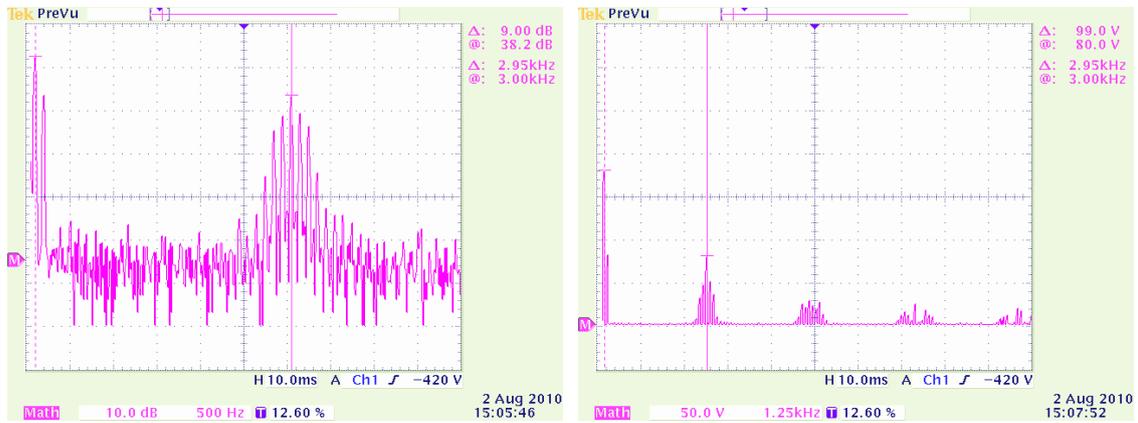
(d) FFT in linearer Darstellung bis 12,5kHz

Abbildung 6.5: Strom am Motor des Motorenprüfstandes

In Abbildung 6.5a ist die Stromamplitude und die dazugehörige FFT-Analyse abgebildet. Zu sehen ist an der Amplitude deutlich die Stromverzerrung, hervorgerufen durch die Leistungselektronik des Frequenzumrichters. Durch die FFT-Analyse wird deutlich, dass die Störungen über einen großen Frequenzbereich von 25kHz auftreten. Eine größere Auflösung bis 5kHz ist in Abbildung 6.5b zu sehen. Für die Bestimmung der Oberschwingungsanteile bis zu einem Frequenzbereich von 2kHz ist die Abbildung 6.5c hilfreich. Die 3., 5., 11. und 13. Oberschwingung sowie die 17. und 19. sind auffällig groß. Der Wert der 17. und 19. Oberschwingung beträgt 1,74%. Dies entspricht 5,4mA und ist sehr klein. Die Abbildung 6.5d zeigt eine lineare Darstellung der FFT-Analyse. Diese stellt das "wahre" Verhältnis besser dar.



(a) Spannung an L1 und N bei ROT1 mit FFT bis 25kHz (b) FFT in logarithmischer Darstellung bis 12,5kHz



(c) FFT in logarithmischer Darstellung bis 5kHz (d) FFT in linearer Darstellung bis 12,5kHz

Abbildung 6.6: Spannung am Motor des Motorenprüfstandes

Die Abbildung 6.6a zeigt die Spannungsamplitude an der Motorseite. Diese weist die Charakteristika eines PWM-Modellierten Signals auf. Zusätzlich ist eine FFT-Analyse bis zu einer Frequenz von 25kHz abgebildet. Auffällig sind die vielen und starken Spannungsverzerrungen. Eine bessere Darstellung der FFT-Analyse ist in Abbildung 6.6b zu sehen. Deutlich erkennbar sind die durch die Modulation hervorgerufen Störungen bei 3kHz, 6kHz, 9kHz und so weiter. Die Beträge der Werte nehmen kontinuierlich ab. Die Störungen sind sehr stark und bei der Simulation in Abbildung 4.7 schon aufgefallen. Wichtig für die Bestimmung des THD ist das Frequenzband bis 2kHz. Bis zu dieser Frequenz treten keine nennenswerten Störungen auf. Bei 3kHz beträgt der Oberschwingungsanteil 35,48% von der Grundschwingung. Die lineare Darstellung in Abbildung 6.6d der FFT-Analyse macht dies deutlich.

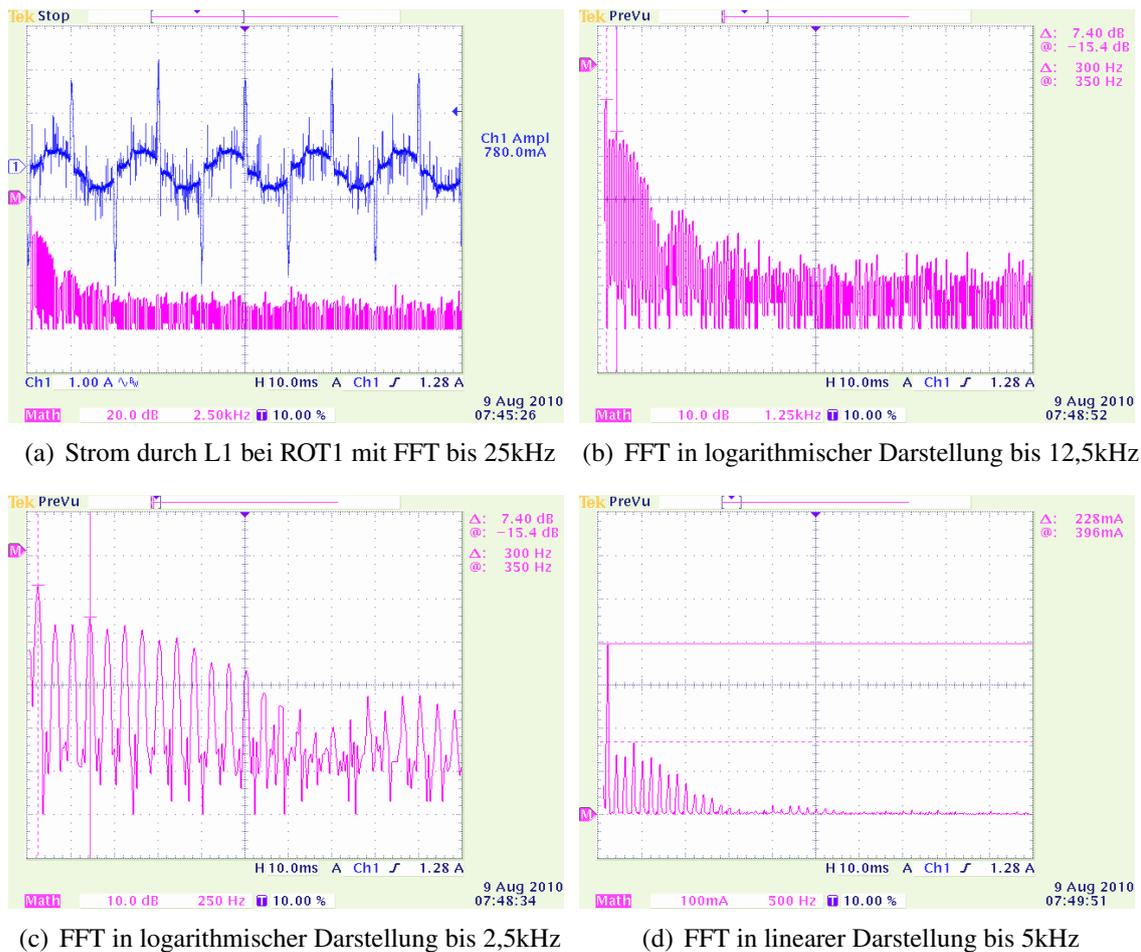
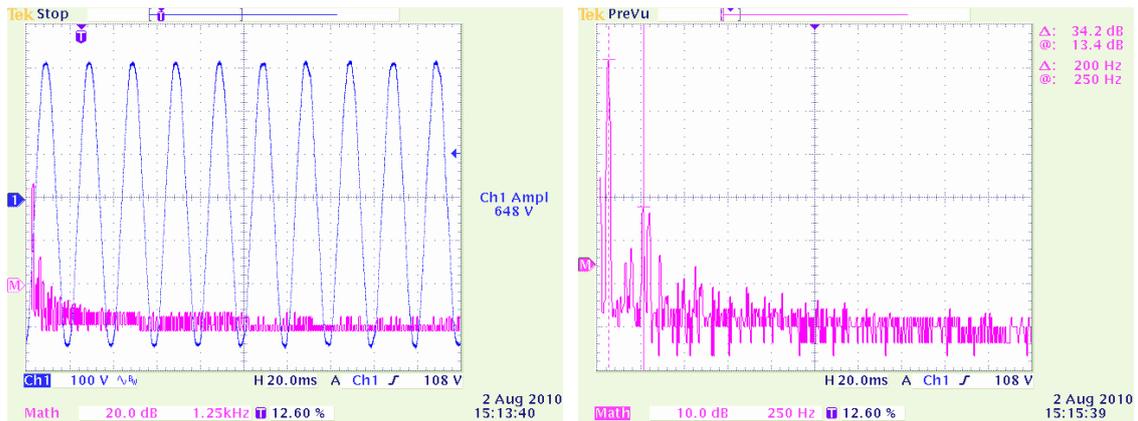
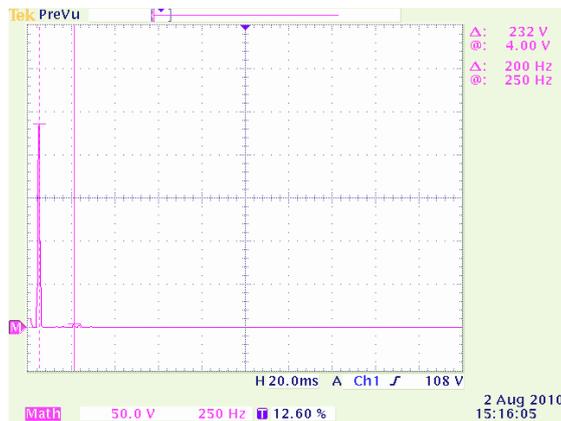


Abbildung 6.7: Strom Netzseitig des Motorenprüfstandes

Durch den Frequenzumrichter treten Netzurückwirkungen auf. Diese sind in Abbildung 6.7a zu erkennen. Markant sind die Transienten des Stroms. Zusätzlich ist eine FFT-Analyse bis 25kHz des Eingangstromes dargestellt. Diese stellt die hohen Oberschwingungsanteile dar, was aus der linearen Darstellung in Abbildung 6.7d deutlich wird. Dort ist das "wahre" Verhältnis dargestellt. Bis 1kHz sind starke Störungen erkennbar. Diese gehen allmählich zurück. In Bild 6.7c sind die Anteile der 3., 5., 7., bis hin zur 31. Oberschwingung sehr deutlich zu erkennen. Die 7. Oberschwingung hat von der Grundschwingung den größten Anteil mit 42,66%. Dies entspricht einem Strom von 117,64mA und liegt noch weit unter dem zulässigen Strom von 770mA nach Tabelle 4.1. An dieser Stelle besteht jedoch Handlungsbedarf und eine Netzdrossel ist notwendig um die Oberschwingungsanteile zu reduzieren. Deutlich werden die Auswirkungen einer nicht EMV-Gerechten Verdrahtung des Frequenzumrichters. Leitungen der Eingangsseite und der Ausgangsseite des Frequenzumrichters liegen nebeneinander. Dies verzerrt zusätzlich den netzeingangseitigen Strom. Bei der Prüfung der Motoren muss unbedingt der Schutzleiter vom Motorenprüfstand mit der der Radaranlage verbunden werden. Auch dies verringert die Stromüberschwingungen.



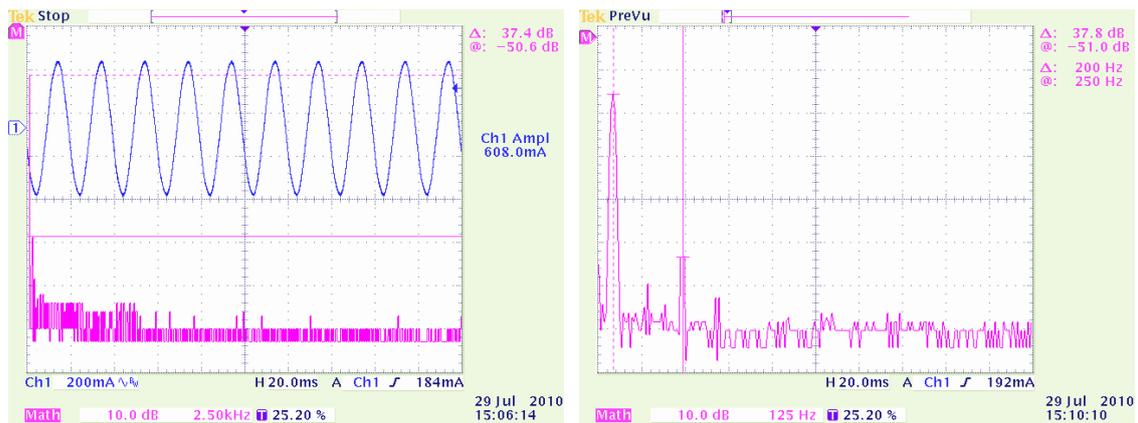
(a) Spannung an L1 und N bei ROT1 mit FFT bis 12,5kHz (b) FFT in logarithmischer Darstellung bis 2,5kHz



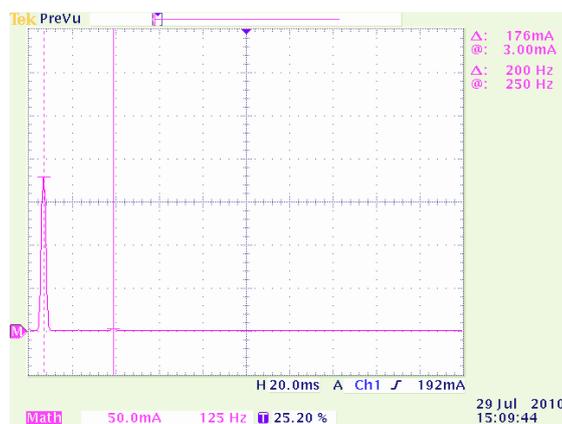
(c) FFT in linearer Darstellung bis 2,5kHz

Abbildung 6.8: Spannung Netzseitig des Motorenprüfstandes

Die Spannung wird von dem Frequenzumrichter sehr wenig verzerrt. Die Amplitude ist nahezu sinusförmig. In der Abbildung 6.8a ist dies zu erkennen. Zusätzlich ist eine FFT-Analyse bis 12,5kHz durchgeführt. Diese ist in Abbildung 6.8b besser dargestellt und zeigt eine markante 5. Oberschwingung von 1,95%. Dies liegt in der Toleranz nach Tabelle 4.2. Abbildung 6.8c zeigt eine lineare Darstellung der FFT-Analyse.



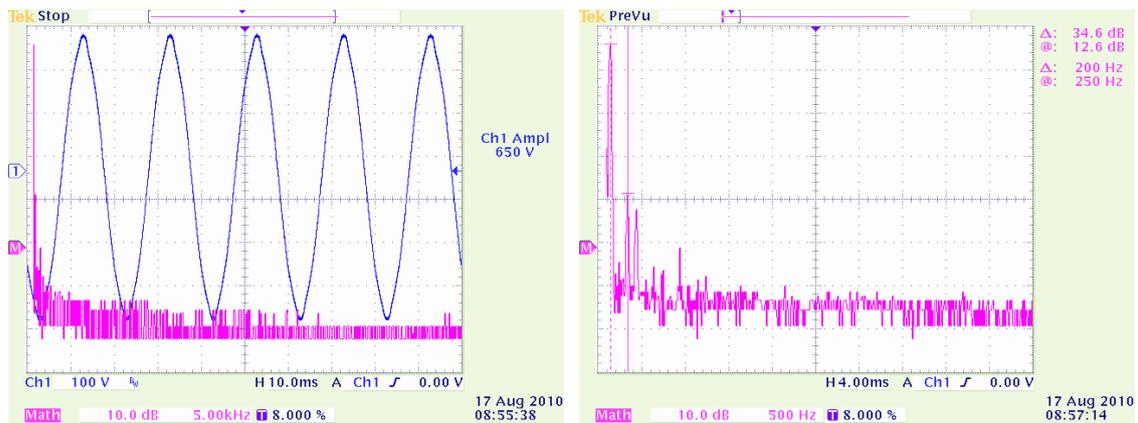
(a) Strom durch L1 bei ROT1 mit FFT bis 25kHz (b) FFT in logarithmischer Darstellung bis 1,25kHz



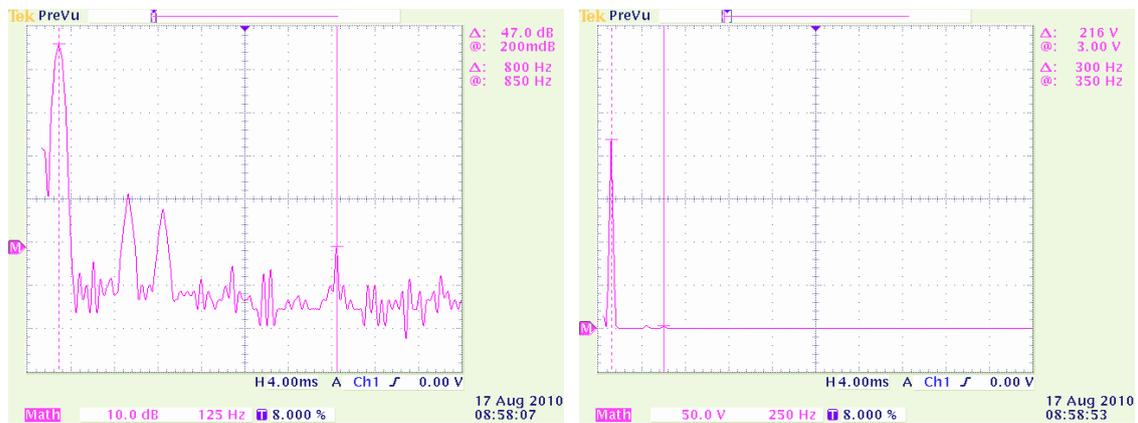
(c) FFT in linearer Darstellung bis 1,25kHz

Abbildung 6.9: Strom am Motor der alten Prüfvorrichtung

In Abbildung 6.9a ist der Strom der alten Prüfvorrichtung dargestellt. Dieser hat einen sinusförmigen Verlauf und ist frei von Störungen. Die 5.Oberschwingung weist einen Anteil von 1,29% der Grundschwingung auf. Dies entspricht 3,92mA und die dazugehörige FFT-Analyse bis 1,25kHz ist in Abbildung 6.9b dargestellt. Abbildung 6.9d zeigt eine lineare Darstellung der FFT-Analyse. Interessant ist der Vergleich der Abbildungen 6.9a und 6.5a. Das Signal in Abbildung 6.9a weist nahezu keine Verzerrungen auf. Hingegen sind die Verzerrungen in Abbildung 6.5a deutlich zu sehen. Die Stromverzerrung der 5.Oberschwingung beträgt bei beiden unter 2%. Daraus folgt die Schlussfolgerung, dass der Frequenzumrichter den Motor nicht zusätzlich belastet. Lediglich das Versorgungsnetz wird durch den Einsatz des Frequenzumrichters mit zusätzlichen Oberschwingungen belastet.



(a) Spannung an L1 und N bei ROT1 mit FFT bis 50kHz (b) FFT in logarithmischer Darstellung bis 5kHz



(c) FFT in logarithmischer Darstellung bis 1,25kHz (d) FFT in linearer Darstellung bis 2,5kHz

Abbildung 6.10: Spannung am Motor der alten Prüfvorrichtung

Die Spannung an der alten Prüfvorrichtung ist in Abbildung 6.10a dargestellt. Eine leichte Verzerrung der Spannungsamplitude ist zu erkennen. Zusätzlich ist eine FFT-Analyse bis 50kHz dargestellt. Diese zeigt bei der 5., 7. und 17. Spannungsoberschwingungen wie in Abbildung 6.10c dargestellt. Abbildung 6.10b zeigt eine FFT-Analyse bis 5kHz mit allen markanten Oberschwingungen. Abbildung 6.10d zeigt die lineare Darstellung der FFT-Analyse bis 2,5kHz. Auffällig ist die 5. Oberschwingung mit 1,86%, die 7. Oberschwingung mit 1,23% und die 17. Oberschwingung mit 0,45% der Grundschwingung. Alle Werte liegen nach Tabelle 4.2 in der Toleranz. Ein Vergleich der Versorgungsspannung vom alten Prüfgerät und neuen Motorenprüfstand in den Abbildungen 6.10a und 6.8a zeigt keine markanten Unterschiede. Die 3. und 9. Oberschwingung in Abbildung 6.8b fallen leicht auf, da diese in Abbildung 6.10c nicht vorhanden sind. Daraus resultiert die Schlussfolgerung, dass die Netzspannung nicht vom Frequenzumrichter beeinflusst wird und keine weiteren Maßnahmen ergriffen werden müssen das Spannungssignal zu verbessern.

Kapitel 7

Verbesserungsvorschlag zum Radar 1100

Während der Entwicklung und der Realisierung des Motorenprüfstandes, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Prüfung der Radaranlagen zu vereinfachen. So wie das “Radar 1100” von der SAM momentan angeboten wird, gibt es keine Möglichkeit die Prüfung zu vereinfachen. Die Prüfung wäre einfacher, wenn von den 14 Motoren einige Motoren eingespart werden könnten. Es wäre möglich, für die 230V-Variante nur einen Motor zu verwenden, statt den acht verschiedenen wie es Momentan der Fall ist. Die zur Verfügung stehende Versorgungsspannung an Bord des Schiffes wäre für die Radaranlagen unwichtig. Es kann eine Spannungsversorgung von einphasig oder dreiphasig, 50Hz oder 60Hz, vorhanden sein. Die benötigte Motorenspannung wird von einem Frequenzumrichter angepasst. Für die 400V-Variante wird dasselbe Konzept verwendet. Statt den sechs unterschiedlichen Motoren, wird einer verwendet. So wird ein Frequenzumrichter für den unteren Spannungsbereich von 230V und einer für den oberen Spannungsbereich von 400V des Bordnetzes verwendet. Die notwendigen Motoren werden auf zwei reduziert. Dies können die bisher verwendeten Motoren für dreiphasig 230V/50Hz und dreiphasig 400V/50Hz sein. Dafür kommen die leistungsstärkeren S-Bandmotoren in Frage. Diese sind in beiden Radarvarianten verwendbar. Bevor dieser Verbesserungsvorschlag weiter betrachtet werden kann, müssen zuvor einige Fragen geklärt werden.

- Sind die Umgebungsbedingungen für Frequenzumrichter nach IEC 60945 zu widrig?
- Lassen sich die größeren S-Bandmotoren in die kleineren X-Bandgehäuse einbauen?
- Ist der Umbau kosteneffizient?

7.1 Ausarbeitung des Verbesserungsvorschlages

Die Vorteile dieses Konzeptes sind vielfältig. Es werden Lagerkosten eingespart, da zwei Motoren verwendet werden statt 14 Motoren. Damit schnell auf Kundennachfrage reagiert werden kann, sind einige Motoren laufend im Lager. Wird die Anzahl der verwendeten Motoren reduziert, müssen weniger Motoren bevorratet werden. Die Stückzahlen sind pro Typ größer. Dies hat zur Folge, dass zusätzliche Rabatte ausgehandelt werden können. Das Risiko einer fehlerhaften Lieferung wird vermindert, da der Kunde zwei Motoren zur Auswahl hat. Es kommt häufiger vor, dass der Kunde eine Radaranlage bestellt und die falschen Motordaten angibt¹. An Bord des Schiffes kann dadurch die Radaranlage nicht in Betrieb genommen werden und somit keine Abnahme der Klassifizierungsgesellschaft erfolgen.

Abschließend werden die Vorteile zusammengefasst:

- Einsparung von Lagerkosten der Motoren;
- höhere Rabatte bei den Motoren durch größere Mengenabnahme;
- flexibler in der Lieferung der Radaranlagen durch Universalität;
- servicefreundlicherer Austausch defekter Motoren durch Minimierung der auszutauschenden Elemente;

Damit die in Kapitel 7 erwähnten Fragen beantwortet werden können, wird eine Berechnung der erforderlichen Motorenleistung durchgeführt. Dies soll klären, welche Leistung der Motor abgeben muss, um eine S-Bandradaranlage anzutreiben. Es werden Hersteller gesucht, die passende Frequenzumrichter anbieten die der IEC 60945 entsprechen. Der Frequenzumrichter benötigt zusätzlichen Platz im Radargehäuse. Unter Umständen reicht der vorhandene Freiraum nicht aus und es wird ein größeres Gehäuse benötigt. Notwendige Änderungen des Gehäuses werden dahin gehend bewertet.

¹bekannt aus Reklamationsberichten

7.2 Motorendimensionierung

In diesem Abschnitt wird die elektrische Leistung berechnet, die benötigt wird, so dass die Antenne unter Windlast noch andreht. Diese muss ausreichend sein, um die Antenne mit der vorgegebenen Umdrehungszahl von bis zu 48U/min bei einer Windgeschwindigkeit von 100kn anzudrehen. Die Vorgabe der Windgeschwindigkeit, bei der die Radaranlage noch andrehen muss, ist in der IEC 60936 Radar Performance Standard zu finden[11]. Die Umdrehungszahl von 48U/min ist eine Vorgabe der SAM Electronics GmbH für ihr Produkt[13]. Erforderliche Berechnungen werden mit dem Tool MathCad durchgeführt. In den Berechnungen besteht die Schwierigkeit daran, den Widerstandsbeiwert der Antennenfläche realistisch abzuschätzen und den Anteil der Verwirbelungen um die Antenne mit einzubeziehen. Des Weiteren ändert sich die Windlast in Abhängigkeit des Winkels, in der die Antenne sich zum Wind befindet. Die Form der Antenne ist nicht gleich. Somit ist das Strahlerprofil der Antennenfront aerodynamisch ungünstig. Das Profil der Antennenrückfläche hingegen ist strömungstechnisch günstiger. Dies verdeutlichen die Abbildungen 7.1 und 7.2.

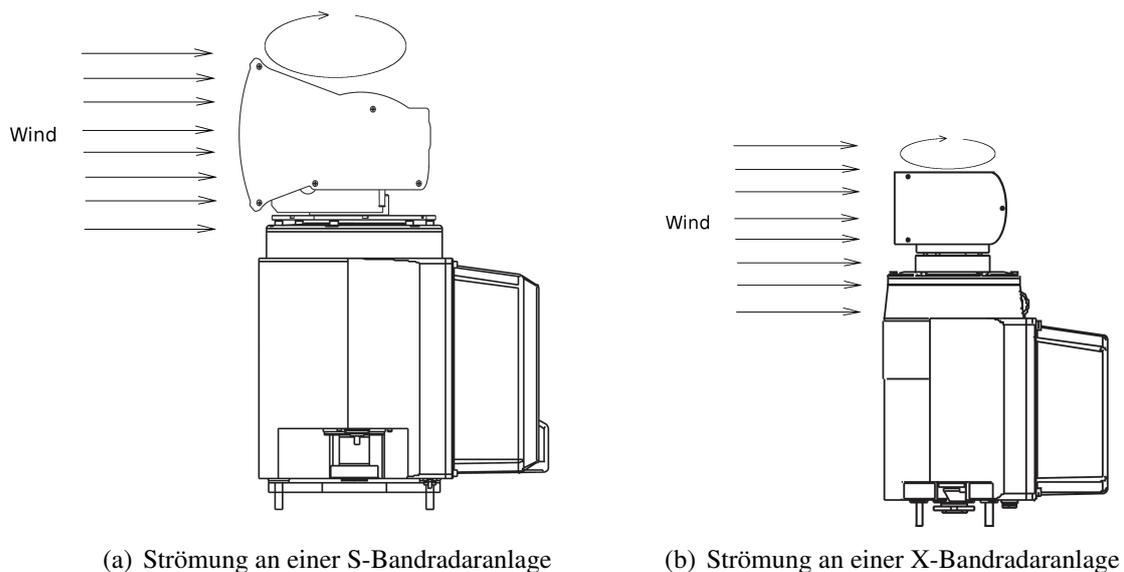


Abbildung 7.1: horizontale Windströmung

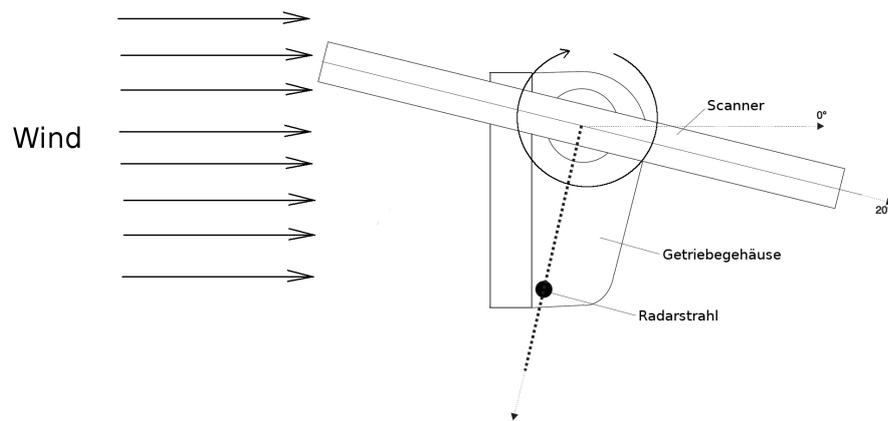


Abbildung 7.2: vertikale Windströmung

Die folgenden Berechnungen werden unter der Annahme getätigt, dass die Strömung des Windes laminar ist. Verwirbelungen und Strömungsabrisse werden nicht berücksichtigt. Diese könnten dazu führen, dass die benötigte Motorenleistung größer werden muss, um die Antenne noch anzudrehen. Dieses Risiko wird mit einem Sicherheitsfaktor berücksichtigt.

7.3 Berechnungen zur Motorendimensionierung

Alle Berechnungen wurden in Mathcad 14.0 durchgeführt und sind am Beispiel der S-Bandradaranlage dargestellt. Diese besitzt die größere Antenne und den leistungsstärkeren Motor. Die technischen Daten sind:

$R = 2,11m$	halbe Antennenlänge
$H = 0,36m$	Höhe der Antennenfläche
$T = 0,51m$	Tiefe der Antennenfläche
$m = 70kg$	Masse der Antenne[13]
$n = \frac{48}{60} \cdot \frac{1}{s}$	Antennendrehzahl
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$	Winkeldrehgeschwindigkeit der Antenne
$t = \frac{1}{n}$	Umdrehung pro Sekunde
$C_{ws1} = 0,75$	Widerstandsbeiwert für die Strahlerfläche ²
$C_{ws2} = 0,60$	Widerstandsbeiwert für die Strahlerrückfläche
$C_{ws3} = 1,1$	Widerstandsbeiwert für die Antennenendfläche

²CW-Werte sind eine Abschätzung aus der Zusammensetzung von Grundkörpern[7]

$\rho = 1,29 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Luftdichte bei 0°C
$v_w = 50 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Windgeschwindigkeit[11]
$\eta = 0,90$	Wirkungsgrad des Getriebes ³
$I = 62,5$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes

Zur Berechnung der Kraft, die auf die Antenne wirkt, wird

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (7.1)$$

berechnet. Daraus lässt sich die Motorenleistung berechnen, die im Leerlauf benötigt wird.

$$P_0 = F \cdot \frac{\omega \cdot R}{I} \quad (7.2)$$

Der Laufindex N_o dient zur Wertepaarberechnung und hilft die Graphen in Abbildung 7.3, 7.4 und 7.5 zu zeichnen.

$$N_o = 99 \quad k = 0 \dots N_o \quad \alpha(k) = 2 \cdot \frac{\pi}{N_o} \cdot k \quad \varphi(k) = \frac{360}{N_o} \cdot k$$

In Abhängigkeit der Stellung der Antenne im Winkel zum Wind ändert sich die Windkraft. So werden zwei Formeln verwendet. Eine für die Antennenfront und eine für den Antennenrücken. Für die Antennenfront gilt somit

$$dF2(r, k) = [r \cdot \omega + V_w \cdot \cos(\alpha(k))] \cdot [r \cdot \omega + V_w \cdot \cos(\alpha(k))] \quad (7.3)$$

und für den Antennenrücken gilt.

$$dF2(r, k) = [r \cdot \omega - V_w \cdot \cos(\alpha(k))] \cdot [r \cdot \omega - V_w \cdot \cos(\alpha(k))] \quad (7.4)$$

Um das Drehmoment zu bestimmen, müssen alle Momente der Antennenfläche integriert werden.

$$M_s(k) = \left[\rho \cdot \frac{C_{ws1}}{2} \cdot H \cdot \int_{0m}^R r \cdot (dF1(r, k)) dr \right] + \left[\rho \cdot \frac{C_{ws2}}{2} \cdot H \cdot \int_{0m}^R r \cdot (dF2(r, k)) dr \right] \quad (7.5)$$

Das Drehmoment an der Antennenendfläche ergibt sich dann wie folgt:

$$M_f(k) = R \cdot \cos(\alpha(k)) \cdot (V_w + R \cdot \omega \cdot \cos(\alpha(k)))^2 \cdot \rho \cdot \frac{C_{ws3}}{2} \cdot H \cdot T \cdot \sin(\alpha(k)) \quad (7.6)$$

Die Summe beider Drehmomente ist (siehe Abbildung 7.3).

$$M_w(k) = M_s(k) + M_f(k) \quad (7.7)$$

³Abschätzung aus Erfahrungswerten für Zahnriemenantriebe

Das Nenndrehmoment an der Motorachse lässt sich somit wie folgt berechnen (siehe Abbildung 7.4).

$$M_n(k) = \frac{M_w(k)}{I \cdot \eta} \quad (7.8)$$

Entscheidender für die Auswahl des notwendigen Motors ist jedoch die momentane Motorabtriebsleistung (siehe Abbildung 7.5).

$$P_e(k) = P_o + \omega \cdot M_n(k) \quad (7.9)$$

Um die Dauerbelastung zu kennen, wird die mittlere Motorabtriebsleistung wie folgt berechnet.

$$P_{av} = \frac{1}{N_o + 1} \cdot \sum_{k=0}^{N_o} P_e(k) \quad (7.10)$$

Aufgetragen ist das Drehmoment an der Antennenachse. Dieses ist notwendig, um die mechanischen Komponenten für die Radaranlage zu dimensionieren.

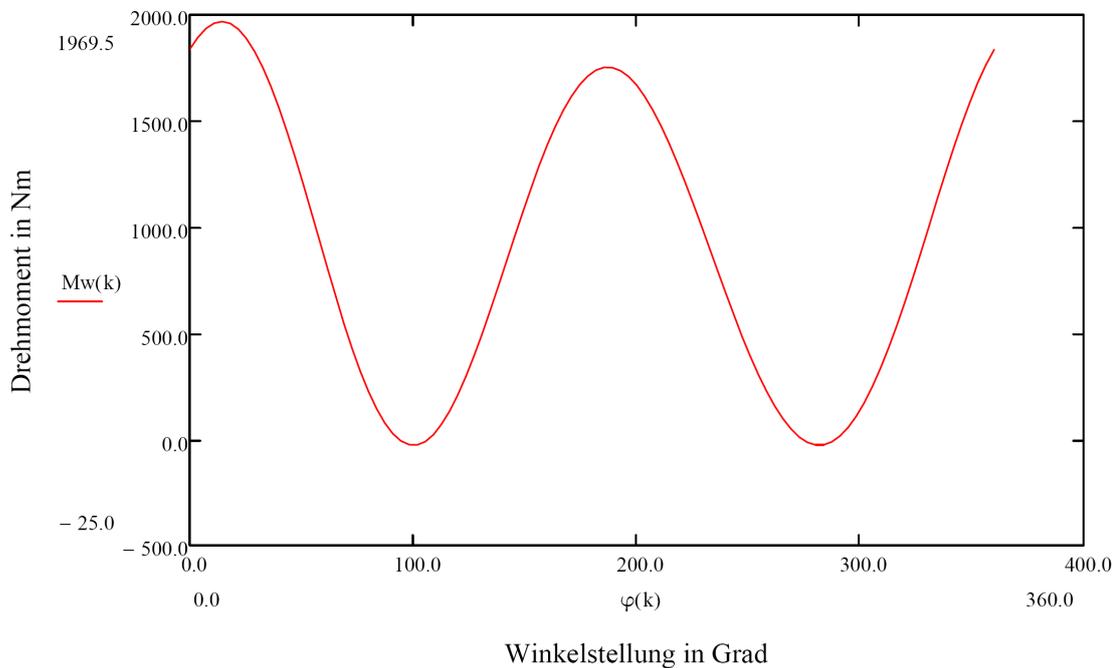


Abbildung 7.3: Drehmoment[Nm] an der Antennenachse über den Antennenwinkel α

Wichtig für die Festlegung des Motors, ist das benötigte abgegebene Drehmoment um die Antenne bei maximaler Windlast von $50 \frac{m}{s}$ anzudrehen. Aufgetragen ist das Drehmoment in Abhängigkeit der Antenne zum Wind.

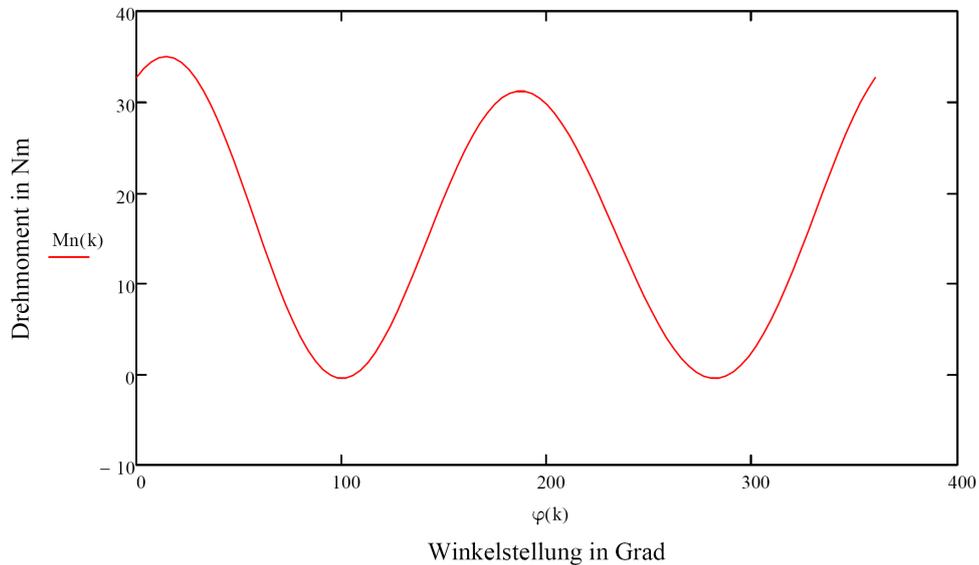


Abbildung 7.4: Nenndrehmoment [Nm] an der Motorachse über den Antennenwinkel α

Weiterhin von Bedeutung, ist die Höhe der elektrischen Leistung, um die Antenne anzudrehen. Aufgetragen ist die Motorenleistung in Abhängigkeit der Antennenstellung zum Wind. Zusätzlich ist die mittlere benötigte Leistung dargestellt.

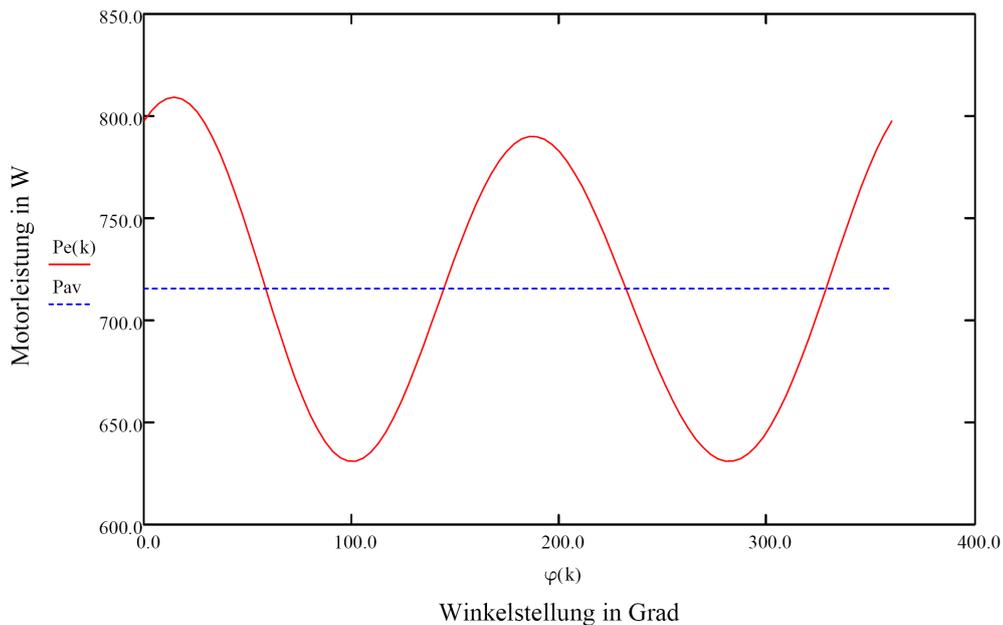


Abbildung 7.5: Motorantriebsleistung P_e [Watt] über den Antennenwinkel α

7.4 Auswertung der Berechnungen

Die Berechnungen haben ergeben, dass der bisher verwendete Motor weiterhin verbaut werden kann. Der Sicherheitsfaktor bezüglich der Leistung beträgt 1,39. Dieser ergibt sich aus der vom Motor abgegebenen Leistung von 1000W und der benötigten mittleren Leistung von 720W. Der Sicherheitsfaktor von 1,39 hat sich als ausreichend erwiesen.

7.5 Klärung der Randbedingungen

Aus den Berechnungen geht hervor, dass der zu verwendende Frequenzumrichter eine maximale Leistung von 1000W liefern muss, um den verwendeten Motor zu versorgen. Daraufhin werden Hersteller ausfindig gemacht, die den Anforderungen nach IEC 60945 genügen und diese Leistung erbringen können. In der IEC 60945 sind die Prüfvorschriften der Umweltpfung festgelegt. Diese besagen, dass Geräte im geschützten Einbau bei einer Temperatur von -15°C bis 55°C funktionsfähig sein müssen. Diese Anforderungen werden von diversen Herstellern und Geräten erfüllt. Die Modelle Micromaster, ACS55, L200 oder SD100 sind nur einige Beispiele. Die Abmaße aller Frequenzumrichter sind klein genug, damit diese zusammen mit dem Motor in das Radargehäuse der größeren S-Bandradaranlage passen. Für die X-Bandradaranlage müssen statt den bisher verwendeten X-Bandradargehäusen, die der S-Bandradaranlage verwendet werden. Das X-Bandradargehäuse ist für die 1kW Motoren und den Frequenzumrichter zu klein. Das Gewicht des Gehäuses beträgt statt 11kg nun 31,5kg[13]. Dies bedeutet eine Gewichtserhöhung von 20,5kg. Damit ergibt sich ein Kompletgewicht der X-Bandradaranlage von 63,5kg. Dies ist eine Gewichtserhöhung von 47,7%. Nach dieser Gewichtserhöhung müssen eventuell die X-Bandradarmasten stärker ausgelegt werden.

neue X-Bandradaranlage mit Gehäuse	alte X-Bandradaranlage mit Gehäuse
63,5kg	43kg

Tabelle 7.1: Gewichtsänderung der X-Bandradaranlage

7.6 Betrachtung der Kosteneffizienz des Umbaus

Wenn dieser Verbesserungsvorschlag umgesetzt werden würde, werden nun statt den 14 verschiedenen Motoren und der drei Schütze für die Dahlanderumschaltung folgende Komponenten benötigt:

- 2 Frequenzumrichter mit 1kW Ausgangsleistung vom Typ
Hitachi L200-011 NFE (230V) 186,00€
Hitachi L200-015 HFE (400V) 290,00€
- 2 Motoren mit 1kW Leistung vom Typ
Leroy Somer 4PD2923050 (3x230V/50Hz) 198€
Leroy Somer 4PD2940050 (3x400V/50Hz) 156€

Ein verwendetes Schütz kostet zirka 8€. Die würde eine Kosteneinsparung von 24€ bedeuten. Dem gegenüber stehen zusätzliche Kosten von 186,00€ und 290,00€. Diese würden durch Aushandlungen von Rabatten um zirka 30% sinken auf 130,20€ und 203,00€ für die Frequenzumrichter. Die angebotenen Motoren würden bis zu 25% günstiger werden und 148,50€ sowie 117€ kosten. Wie groß die Einsparungen an Lagerkosten wären, kann nicht genau bestimmt werden. Diese sind geringfügig im Vergleich zu den Preisnachlassen. Viel entscheidender wären die Einsparungen von unnötigen Lieferungen und Serviceeinsätzen auf Grund von falschen Bestellungen. Diese Kosten sind subjektiv zu bewerten. Zum einen liegt dies an den mangelnden Zahlen, wie viele Lieferungen und Serviceeinsätze unnötig waren sowie was für zusätzliche Kosten dadurch entstanden sind.

In folgender Tabelle 7.2 sind die Kosten der bisherigen Variante und der neuen Variante gegenüber gestellt.

	neue Variante für alle Radaranlagen		
	Motor	Frequenzumrichter	Gesamtsumme
230V	148,50€	130€	278,50€
400V	117€	203€	320€

Variante	bisherige X-Bandradaranlage			bisherige S-Bandradaranlage		
	Motor	Schütze	Gesamtsumme	Motor	Schütze	Gesamtsumme
230V	147€	24€	171€	198€	24€	222€
400V	117€	24€	141€	156€	24€	180€

Tabelle 7.2: Kostenaufstellung des Verbesserungsvorschlages

Das Einsparpotential wird in Tabelle 7.3 dargestellt.

	Gewinn	
	X-Bandradaranlage	S-Bandradaranlage
230V	-107,50€	-56,50€
400V	-179€	-140€

Tabelle 7.3: Gewinn des Verbesserungsvorschlages

Zu erkennen ist das keine Materialkosteneinsparung werden können. Die Radaranlagen sind nun fehleranfälliger durch zusätzliche Elektronik. Schütze mit dem passenden Motor sind wartungsärmer und robuster als Leistungselektronik bei schwierigen Umweltbedingungen.

Als abschließendes Fazit steht fest, dass dieser Verbesserungsvorschlag zu keiner Kosteneinsparung führen würde. Es kommt zur Verringerung von Produktionszeiten für die Radaranlagen. Dies verringert die Grenzkosten und erhöht den Gewinn, aufgrund von Reduzierung der Variantenvielfalt. Des Weiteren werden Serviceeinsätze verringert. Die Mitarbeiter stünden ohne diese unnötigen Einsätze für andere Aufträge zur Verfügung und könnten gewinnbringendere Einsätze durchführen. Es ist von dem neuen Konzept aus den genannten Gründen abzuraten und das bisherige Konzept beizubehalten.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Aufgabe der Bachelorthesis war die Neuentwicklung eines automatisierten Motorenprüfstandes zur Endprüfung der Asynchronmotoren in Radargeräten. Dafür wurden auf Grundlage der vorhandenen Prüfanweisung GR3040PA und GR3041PA diverse Anforderungen an den zu entwerfenden Motorenprüfstand gestellt. Auf dieser Grundlage sind unterschiedliche Realisierungsvarianten erarbeitet worden und einer Nutzwertanalyse unterzogen worden. Die Variante mit dem besten Nutzwert wurde für die Realisierung des Motorenprüfstandes umgesetzt. Für die Realisierung sind technische Zeichnungen erstellt und notwendige Programme für die Steuerung entwickelt worden. Nach der Fertigstellung des Motorenprüfstandes wurde ein exemplarischer Test durchgeführt. In diesem wurde eine X-Bandradaranlage einer Prüfung unterzogen und die Parameter sowie die Stromwerte abschließend angepasst. Es folgte eine Untersuchung, ob die erhaltenen Messergebnisse und der Motorenprüfstand für die Endprüfung verwendbar sind. Zusätzlich wurde ein Verbesserungsvorschlag erarbeitet, wie die Prüfung der Radaranlagen zukünftig vereinfacht werden kann.

Zusammenfassend ist die Arbeit sehr erfolgreich verlaufen und der Motorenprüfstand kann für die Endprüfung der Radaranlagen verwendet werden. Es sind drei Radaranlagen sowie die dazugehörigen einzelnen Motoren erfolgreich geprüft worden. Nach der Inbetriebnahme des Motorenprüfstandes, ist der Frequenzumrichter für die einphasigen Motoren ausgefallen und es konnten keine einphasigen Radaranlagen einer Prüfung unterzogen werden. Bis jetzt hat der Hersteller des Frequenzumrichters nicht mitgeteilt, was den defekt verursacht hat. Es sprechen jedoch keine Gründe gegen eine spätere erfolgreiche Prüfung der einphasigen Radaranlagen. Eine Prüfung aller Radarvarianten wurde aufgrund des Ausfalls des Frequenzumrichters nicht durchgeführt. Des Weiteren sind bis zu diesem Zeitpunkt nicht alle Radarvarianten produziert und somit nicht einem Test unterzogen worden.

8.1 Ausblick

Aufgrund der knappen Ressourcen des Motorenprüfstandes besteht wenig Raum für eine spätere Weiterentwicklung oder Verbesserung, wenn sich die Anforderungen an eine Prüfung der Radaranlagen ändern. Bis zu diesem Zeitpunkt sind keine Fehler oder Probleme aufgetreten. Die Verdrahtung sollte geändert werden damit sich die Netzurückwirkungen reduzieren. Abschließend kann der entwickelte Motorenprüfstand für die Endprüfung der Radaranlagen verwendet werden und benötigt keine technischen Änderungen.

Literaturverzeichnis

- [1] BRÖDEL, Anton: *Tabellenbuch Mechatronik*. Verlag Gehlen, 2004. – ISBN 3-441-92120-8
- [2] http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~crewell/vorles/radarmet/radarmet_ss04_einfuehrung.pdf
- [3] <http://www.moeller.net/binary/schabu/f0200-004de.pdf>
- [4] FARTSCHI, Ali: *Elektromaschinen in Theorie und Praxis*. VDE Verlag, 2001. – ISBN 3-8007-2563-0
- [5] http://www.pe.tu-berlin.de/lehrbetrieb/simulationsverfahren/pdf/le_sim_script_v2.1.pdf
- [6] HÄBERLE, Gregor D. ; HÄBERLE, Heinz O. ; SCHONARD, Armin: *Elektrische Antriebe und Energieverteilung*. Verlag Europa-Lehrmittel, 2006
- [7] JIRKA, Gerhard H.: *Einführung in die Hydromechanik*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2007. – ISBN 978-3-8664-158-3
- [8] LUDOLFF, A.: *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. Vieweg+Teubner, 2008. – ISBN 978-3-8348-0597-3
- [9] http://www.gossenmetrawatt.com/resources/marcom/merkbuch/2009_merkbuch1_12.pdf
- [10] MÖRIKE, M. ; TEUFEL, S.: *Kosten & Nutzen von IT-Sicherheit*. Dpunkt.Verlag, 2006. – ISBN 3-89864-380-8
- [11] NORMEN, IEC: *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems -Radar-*, 1998-10
- [12] PALOTAS, Prof. Dr.-Ing. Dr. Techn. L.: *Elektronik für Ingenieure*. Vieweg Verlag, 2003. – ISBN 3-528-03915-9
- [13] SAM, Electronics: *Radar1000 Manual 10-2004*. Behringstr. 120, 22763 Hamburg, 2004
- [14] SAM, Electronics: *GR3040 PA*. Behringstr. 120, 22763 Hamburg, 2010-03
- [15] SCHOPPE, R.: *Die Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe im Beschaffungsmanagement*, HAW Hamburg, Diplomarbeit, 2004
- [16] SCHULZ, Dr.-Ing. D.: *Netzurückwirkung - Theorie, Simulation, Messung und Bewertung*. VDE Verlag GmbH, 2004. – ISBN 3-8007-2757-9
- [17] SENDLINGER, Dr. A.: *Universal Grosswörterbuch Englisch-Deutsch/Deutsch-Englisch*. Compact Verlag München, 2006. – ISBN 3-8174-7637-X

-
- [18] SOLAS: *SOLAS Carriage Requirements*, 2004-05. <http://www.theradarreflectorsite.org/StandardsAndRequirements.htm>
- [19] TECHNOLOGIES, Agilent: *User's Guide*, 2005-05. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/01146-92003.pdf>
- [20] TEKTRONIX: *Serie TDS3000C Benutzerhandbuch*, 2009-01. <http://www2.tek.com/cmswpt/madetails.lotr?ct=MA&cs=mur&ci=15579&lc=DEf>
- [21] TKOTZ, Klaus: *Fachkunde Elektrotechnik*. Verlag Europa-Lehrmitte, 1999. – ISBN 3-8085-3162-2

Anhang A

Zusätzliche Informationen

A.1 Informationen zu S-Band und X-Band

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{A.1}$$

Typ	Frequenzband nach ITU	Frequenzbereich f von SAM	Wellenlänge λ
S-Band	2 – 4GHz	3,05GHz ± 10MHz	9,836cm ± 0,0641cm
X-Band	8 – 12GHz	9,375GHz ± 30MHz	3,2cm ± 0,0205cm

Tabelle A.1: Frequenzbänder von S- und X-Band

Die S-Bandradaranlage wird auch als ‘‘Schlecht-Wetter-Radar’’ bezeichnet[8]. Durch die größere Wellenlänge, gegenüber der X-Bandradaranlage, kann das Radarkeul durch Wolken dringen und ermöglicht auch bei bedecktem Himmel das Erkennen von Objekten durch Wolkenschichten. Nachteil gegenüber der X-Bandradaranlage ist die geringere Auflösung der erfassten Objekte. Die X-Bandradaranlage kann durch die kurze Wellenlänge eine bessere Auflösung liefern. So können zum Beispiel Küstenumrisse und die Größe, der sich auf dem Gewässer befindlichen Objekte, wesentlich besser bestimmt werden. Eine größere Wellenlänge, bedeutet einen größeren Hohlleiter. Aufgrund der mechanischen Ausmaße muss auch die Mechanik stabiler und somit schwerer ausfallen. Die logische Schlussfolgerung ist, dass der Antriebsmotor der S-Bandradaranlage leistungsstärker ausfallen muss, als bei der X-Bandradaranlage.

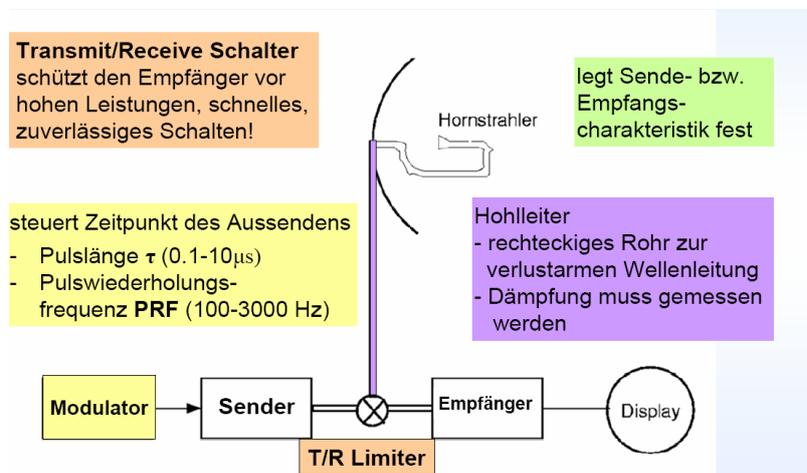


Abbildung A.1: Prinzipaufbau einer Radaranlage[2]

A.2 Informationen zu DahlanderMotoren

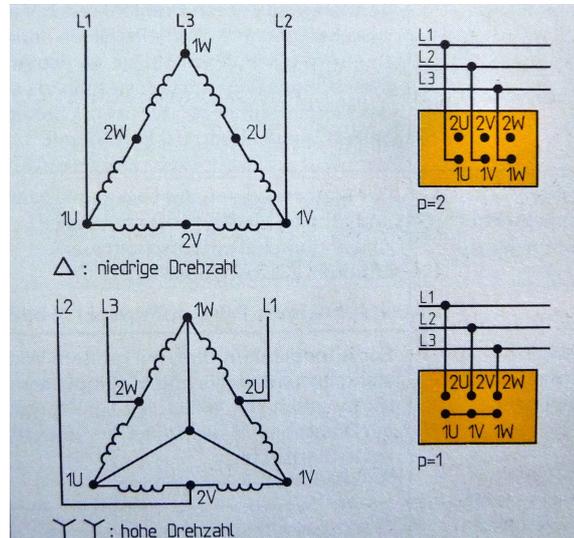


Abbildung A.2: Polumschaltbarer Motor mit Dahlanderwicklung[21]

Nach ihrem Erfinder benannt, ist bei der Dahlanderschaltung jeder Strang der Ständerwicklung in zwei Wicklungsteile unterteilt. Durch Umschalten aus der Reihenschaltung in die Parallelschaltung wird die Polzahl halbiert und somit die Drehfeldfrequenz verdoppelt. Das Klemmbrett dieser Motoren besitzt für jede Polzahl drei Klemmen, weil die Wicklungsteile meist in der Ständerwicklung zusammenschaltet sind. Damit kann der Motor nur an einer Netzspannung betrieben werden. Die Klemmen 1U, 1V, 1W werden für die niedrige Drehzahl gekennzeichnet. 2U, 2V, 2W hingegen steht für die hohe Drehzahl. Übliche Ausführungen sind $\Delta / \Upsilon\Upsilon$.

Die Strangwiderstände können durch die Zusammenschaltung der Wicklungen nicht direkt gemessen werden, sondern müssen sich aus dem Messwert errechnet werden. Dazu wird zwischen den Strängen 1U und 1V der Widerstand der gesamten Motorenwicklungen gemessen. Durch die vorhandene Parallelschaltung kann der Strangwiderstand nach Formel A.4 berechnet werden, vorausgesetzt der Widerstand aller Wicklungen ist gleich.

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R+R} \quad (\text{A.2})$$

Nach der Erweiterung mit R ergibt sich

$$\frac{R}{R_{ges}} = 1 + \frac{1}{2} \quad (\text{A.3})$$

Die Umstellung nach R führt zu folgender Formel

$$R = \frac{3}{2} \cdot R_{ges} \quad (\text{A.4})$$

A.3 Entstehende Problematik beim Einsatz von Frequenzumrichtern

A.3.1 Allgemeine Problematik des Frequenzumrichters

Frequenzumrichter werden insbesondere an Drehstrommotoren eingesetzt, um deren Anlauf- und Drehzahlverhalten zu verbessern[6]. Der Frequenzumrichter generiert aus einem Wechsel- oder Drehstrom, mit einer bestimmten Spannung und Frequenz, eine in Amplitude und Frequenz veränderbare Spannung. Mit dieser umgerichteten Spannung wird dann die Maschine betrieben. Frequenzumrichter bestehen aus einem Gleichrichter, der einen Gleichstrom- oder Gleichspannungszwischenkreis speist und aus einem Wechselrichter. Die Gleichrichter werden dabei als ungesteuerte, wie auch gesteuerte B6-Brücken, ausgeführt. Nach Stand der heutigen Technik besitzen Wechselrichter einen Gleichspannungszwischenkreis mit einer Induktivität und einem Kondensator zur Entstörung und Glättung.

Der Wechselrichter arbeitet ausschließlich mit leistungselektronischen Schaltern. Üblich sind je nach benötigter Ausgangsleistung MOSFET's oder IGBT's. Letztere kommen zum Einsatz, wenn hohe Leistungen im Bereich von mehreren 100KW benötigt werden. Dabei geht allerdings die Entwicklung ständig weiter. Mit einer Pulsweitenmodulation erzeugt der Wechselrichter eine veränderliche Spannung. Die Höhe der resultierenden Ausgangsspannung und deren Frequenz können in weiten Bereichen eingestellt werden. Frequenzumrichter erzeugen durch ihre Elektronik starke elektrische Störsignale. Diese treten sowohl auf der Motorzuleitung, wie auch auf der Netzzuleitung auf. Diese Störungen können nicht nur andere Verbraucher stören, sondern auch im Motor zu einer erhöhten Isolierstoffbelastung führen[4]. Die Motorzuleitung muss zur Vermeidung von Störabstrahlungen geschirmt werden. Dafür werden Sinusfilter zwischen Umrichter und Motor eingesetzt.

A.3.2 EMV-Problematik

Bedingt durch die hohen Wirkungsgrade arbeiten Frequenzumrichter mit steilen Schaltflanken. Dadurch wird die Verlustleistung minimiert und die hohen Wirkungsgrade von 98% erzielt¹. Durch das schnelle Umschalten der IGBTs in einer Größenordnung von wenigen 100ns kommt es, bedingt durch den Kapazitätsbelag der Motorzuleitung, zu Umladeströmen[12]. Diese summieren sich bei langen Motorleitungen und erreichen mehrere Ampere. Umladeströme treten auch bei Frequenzumrichtern mit geringen Leistungen auf und belasten den Frequenzumrichter erheblich.

Wie in Kapitel A3.1 erwähnt besteht ein Frequenzumrichter netzseitig aus einem ungesteuerten Gleichrichter und einem Gleichspannungs-Zwischenkreis mit Elektrolytkondensatoren als Energiespeicher und zur Glättung der Zwischenkreisspannung. Bedingt durch den Gleichrichter werden das Spannungsnetz und der Zwischenkreis aufeinander geschaltet. Dies führt zu impulsartigen Ladeströmen, die das Netz stark belasten können. Die Ladeströme hängen von der Leistung des Frequenzumrichters ab. Durch das Vorschalten von Netzdrosseln lassen sich Netzurückwirkungen verringern. Wird der Frequenzumrichter direkt an das Netz angeschlossen, führt dies zu einer starken Belastung von Netz und Zwischenkreis und reduziert somit die Lebensdauer des Frequenzumrichters[21]. Die zulässigen Netzurückwirkungen für Frequenzumrichter sind in EN61000-3-2 festgelegt.

¹Herstellerangabe aus dem Manual vom Frequenzumrichter SD250 der Firma Power Electronics

A.4 Eigenkonstruktion eines Transportwagens

Es besteht auch die Möglichkeit einen selbst konstruierten Transportwagen zu fertigen. Dies hat eine längere Fertigungszeit zur Folge, ermöglicht aber eine Anpassung an die Bedürfnisse des Motorenprüfstandes. Der Transportwagen wird zum einem günstiger und zum anderen ist er an die notwendigen Bedürfnisse angepasst. Darunter fallen die optimale Anbringung der Bedien- und Steuerelemente für den Prüfer und die Vermeidung einer eventuellen Kopfflastigkeit der Konstruktion. Um einen Transportwagen zu fertigen, werden folgende Komponenten benötigt:

Lfd.-Nr.	Gerät	Menge	Preis in €	Merkmale
1	Abdeck- u. Einfassprofil	14m	1,76	8 schwarz, 2m
2	Acrylglas XT	4m ²	47,35	Stärke 6mm farblos
3	Nutenstein	10St	0,25	8, ohne Steg, M6
4	Nutenstein	10St	0,24	8, mit Steg, M8
5	Magnetverschluss	1St	1,24	8 PA
6	Handgriff	1St	2,25	8 PA 160
7	Scharnier	2St	1,62	8 PA rechts
8	Gelenkwinkel	2St	2,59	8
9	Abdeckkappe	6St	0,37	8 40x40
10	Lenkrolle	4St	11,50	D75 Doppelfeststeller
11	Halbrundschrabe	30St	0,25	M8x30
12	Profil	14m	9,48	8 40x40 leicht

Summe: 419,29

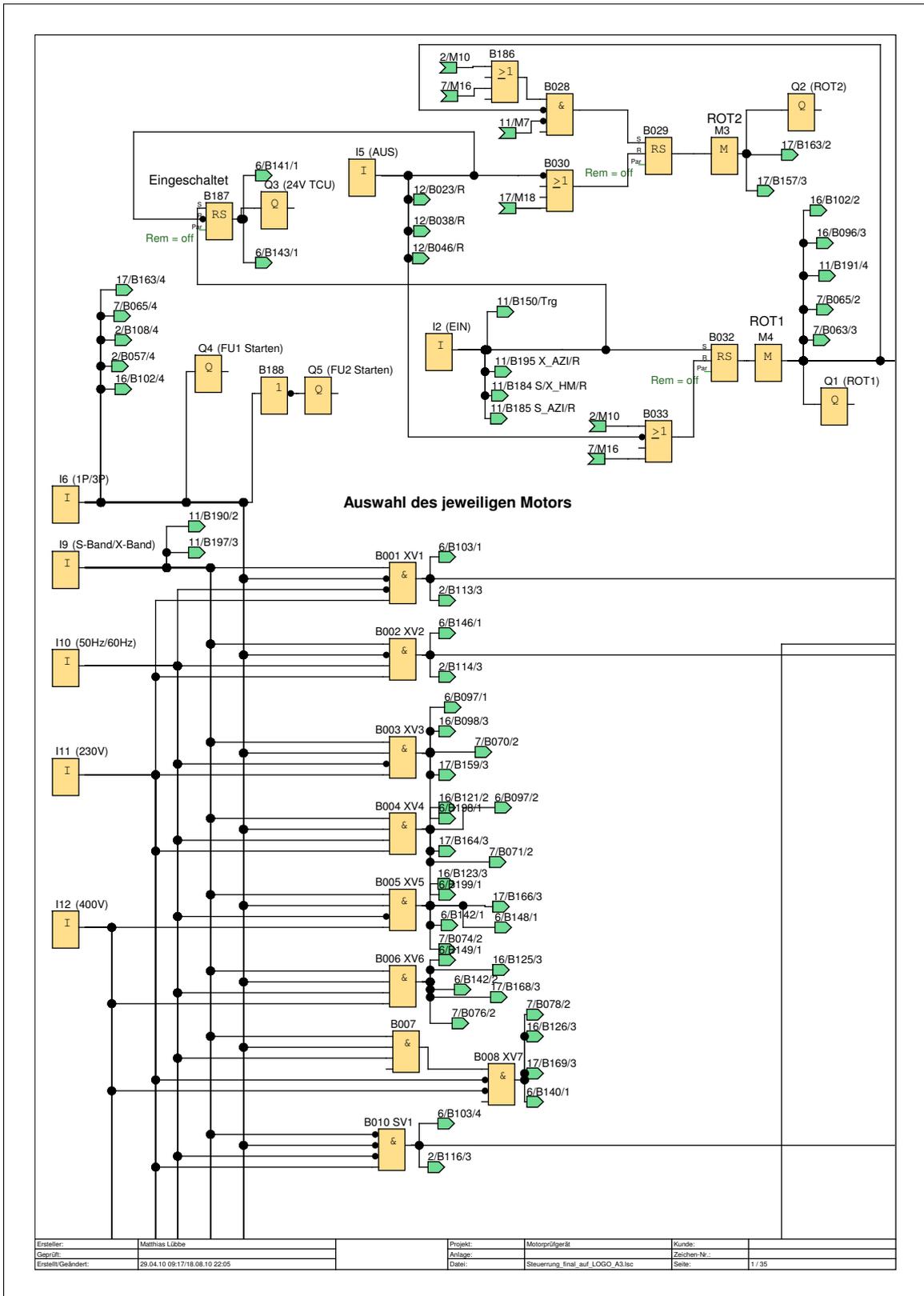
Tabelle A.2: Stückliste für die Fertigung des Transportwagens

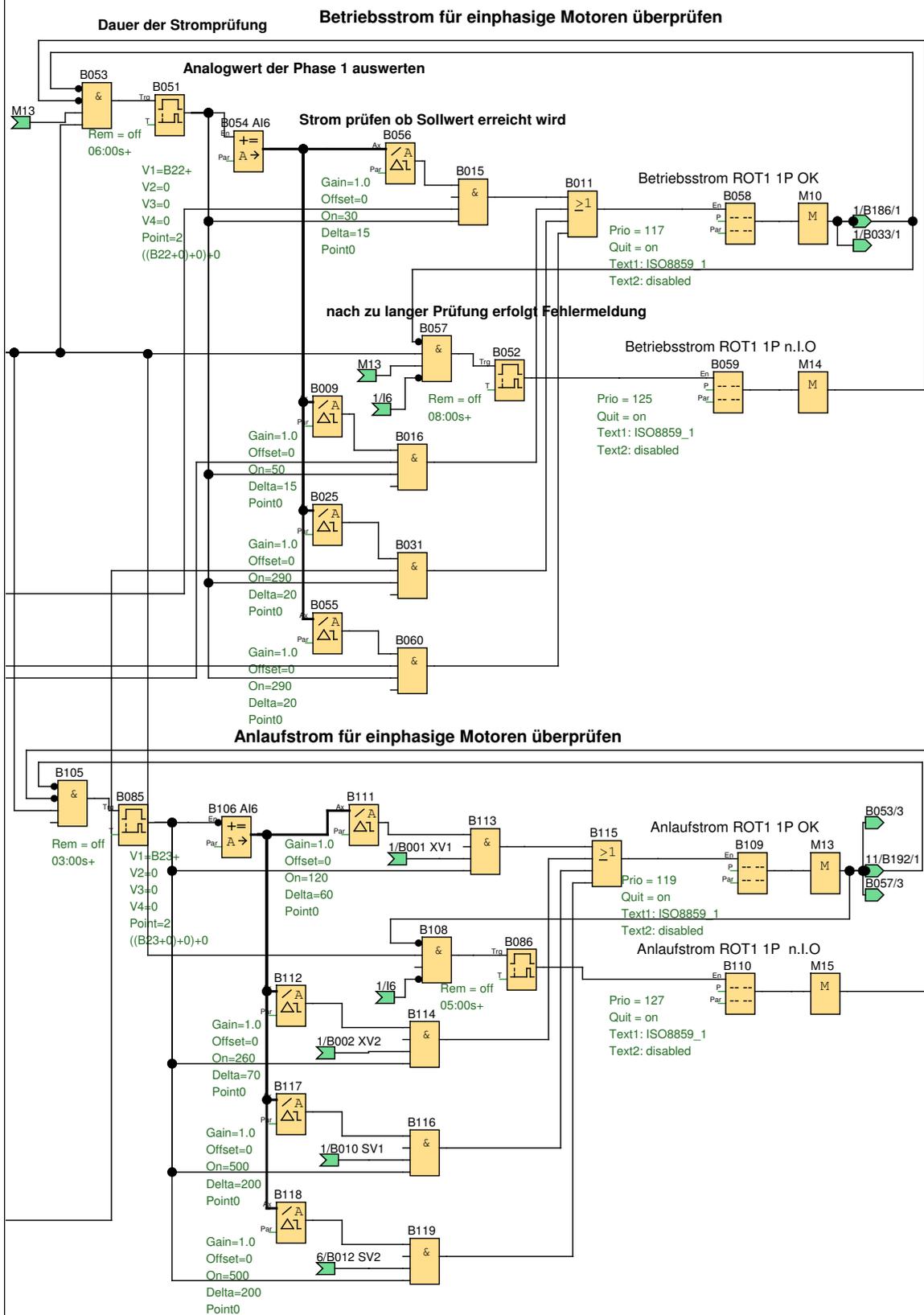
Anhang B

Zeichnungen

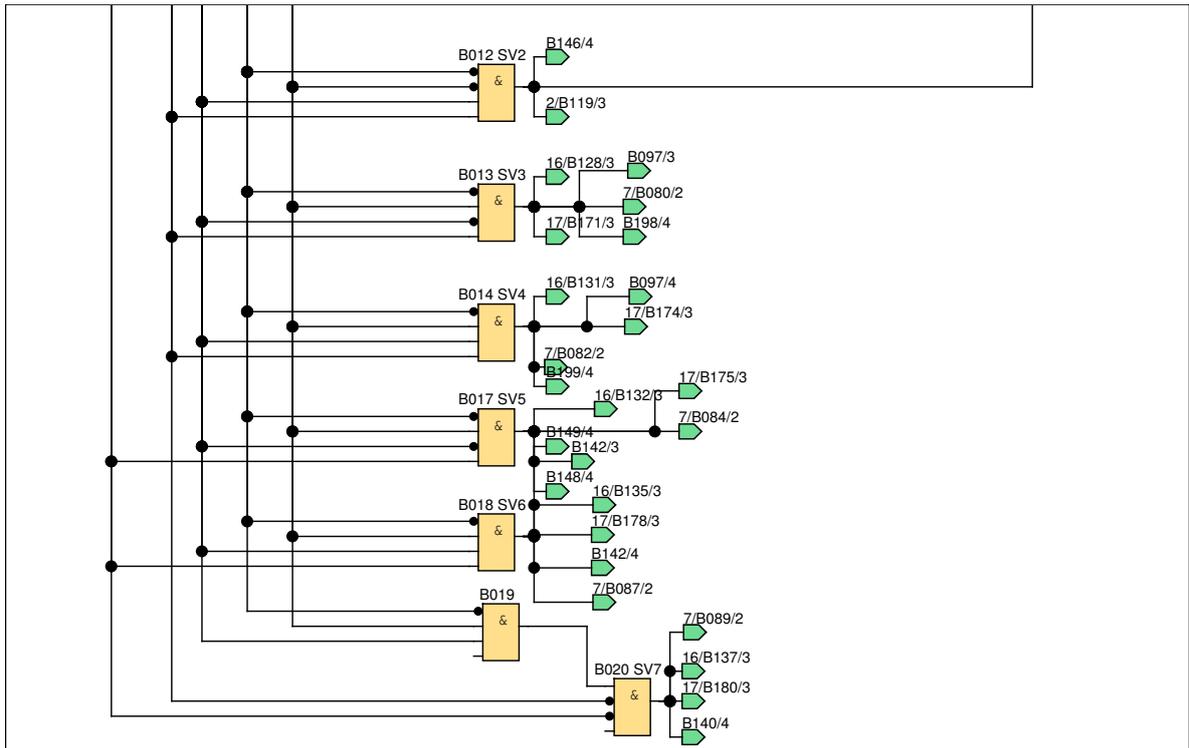
Alle Anhänge befinden sich auf der beigelegten CD unter CD:/Anhang.

B.1 LOGO!-Steuerung

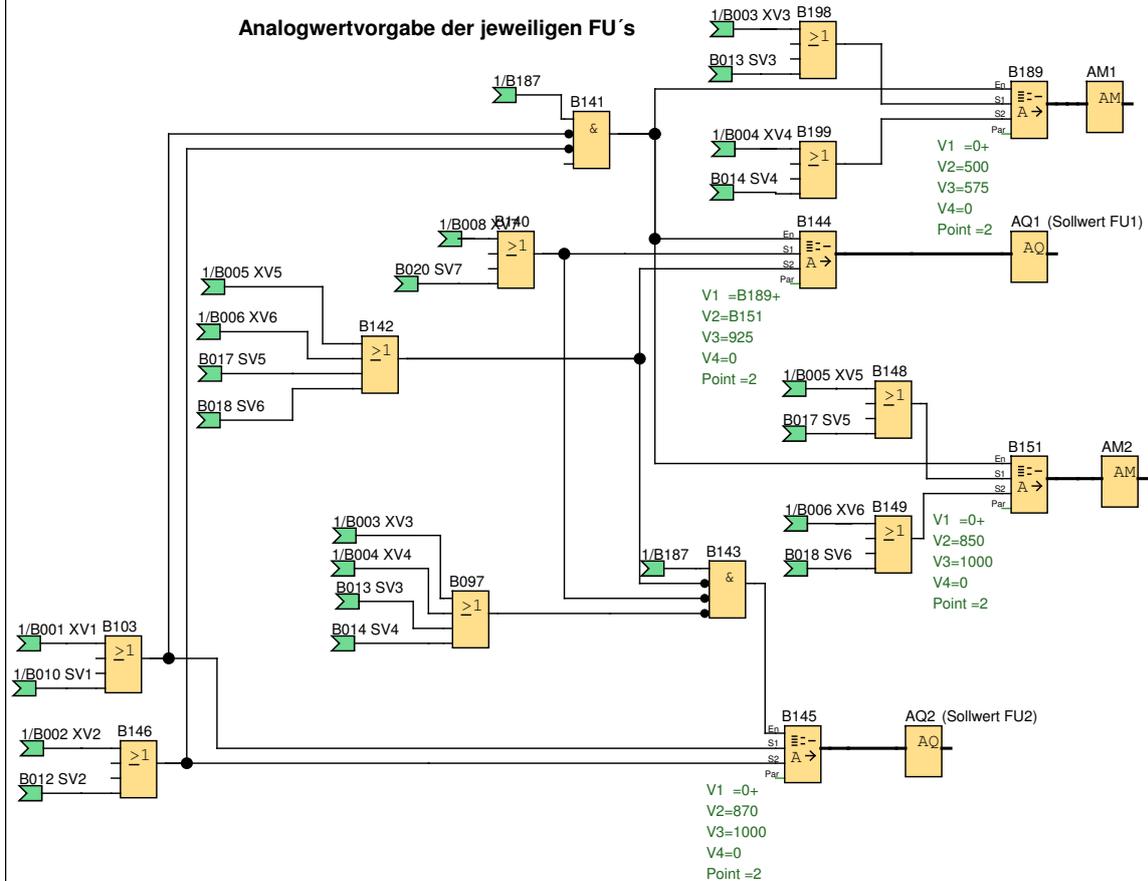




Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:		Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.lsc	Seite:	2 / 35



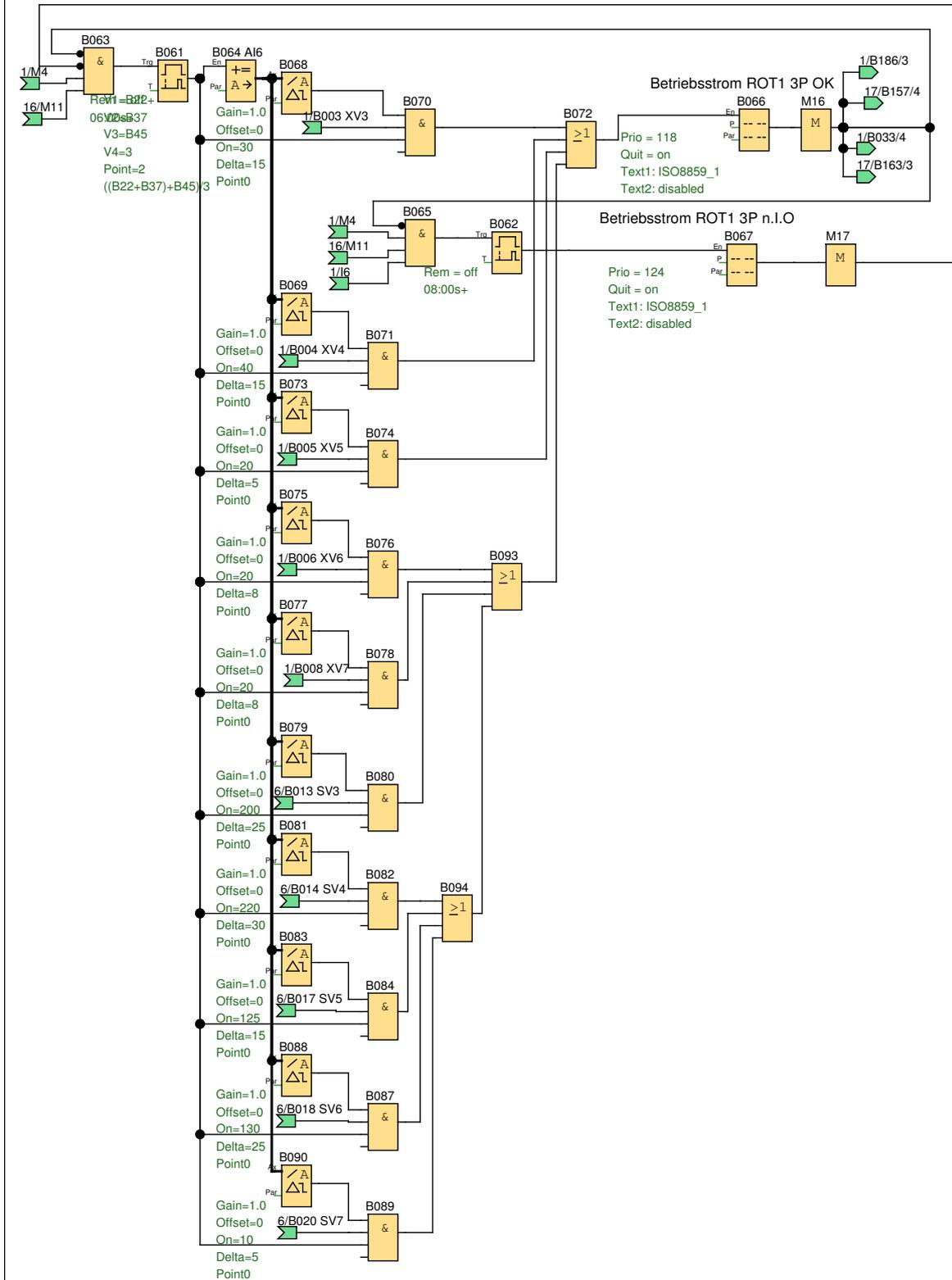
Analogwertvorgabe der jeweiligen FU's



Ersteller:	Matthias Lübbe	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.tsc	Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:		Seite:	6 / 35

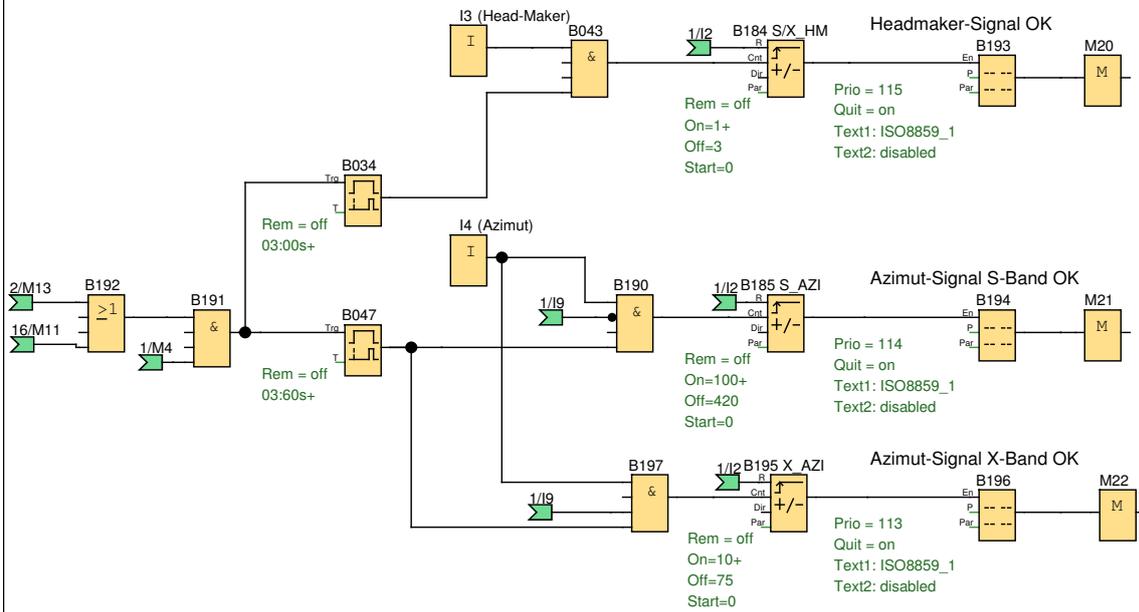
Betriebsstrom für dreiphasige Motoren überprüfen

Analogwerte der 3 Phasen auswerten

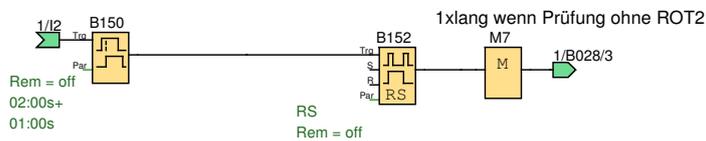


Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:	Steuernng_final_auf_LOGO_A3.lsc	Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:		Seite:	7 / 35

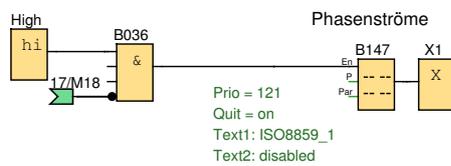
HM und Azimutsignal überprüfen



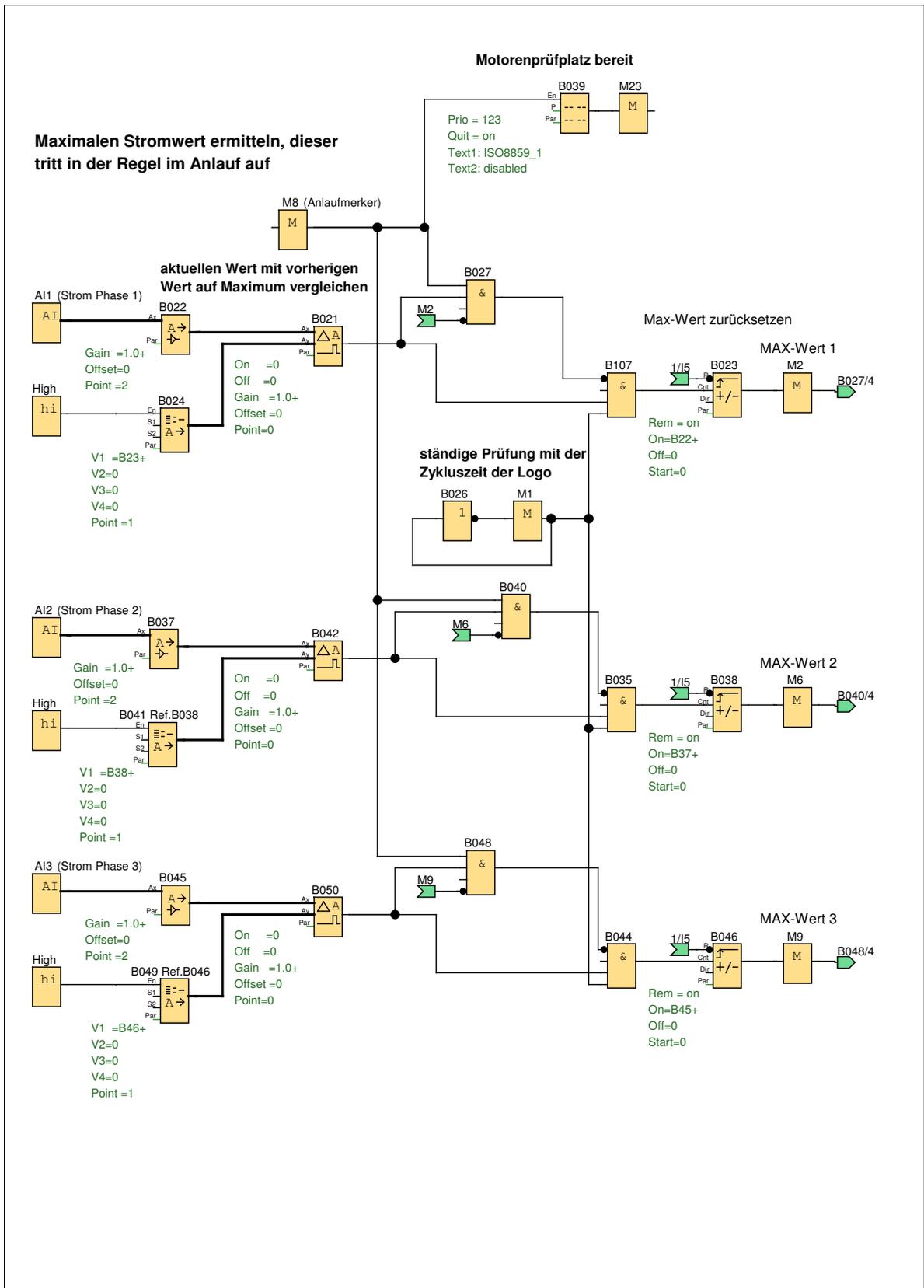
Auswahl ob Prüfung mit ROT1 und ROT2 stattfinden soll oder nur ROT1; notwendig wenn Motor ohne Getriebe getestet wird



Anzeigen der Phasenströme

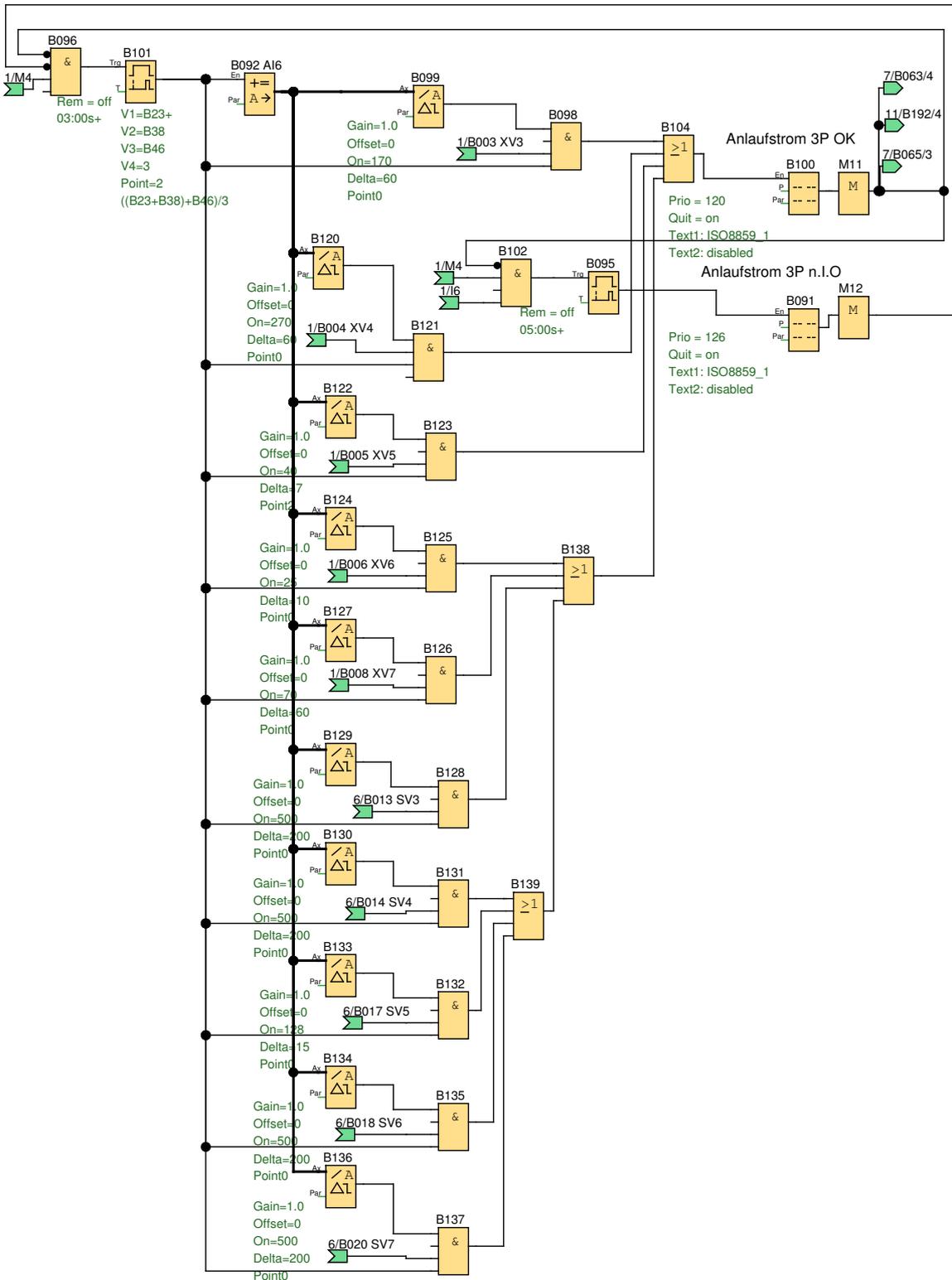


Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:		Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.lsc	Seite:	11 / 35



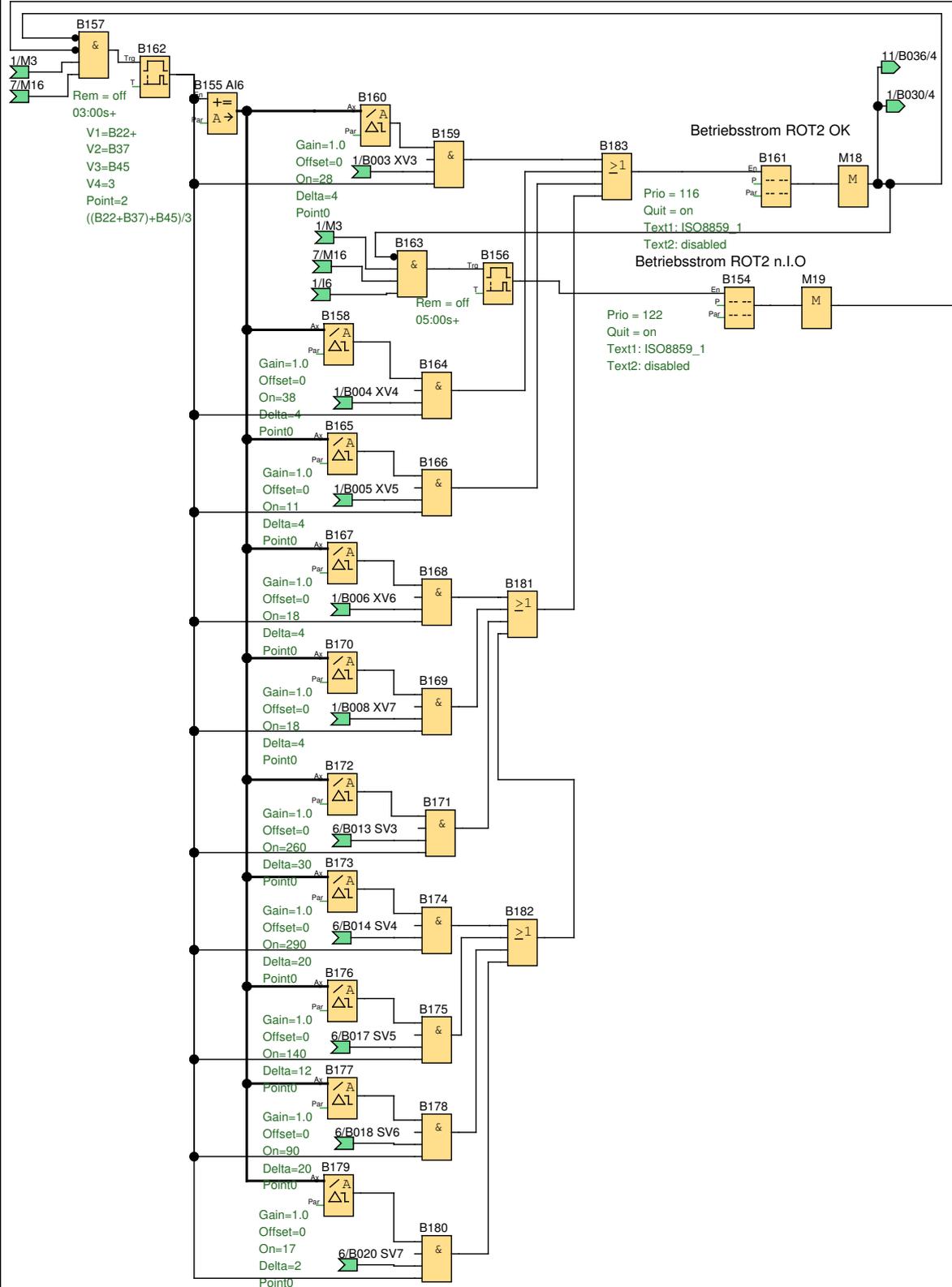
Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motortestgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:		Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.lsc	Seite:	12 / 35

Anlaufstrom für dreiphasige Motoren überprüfen

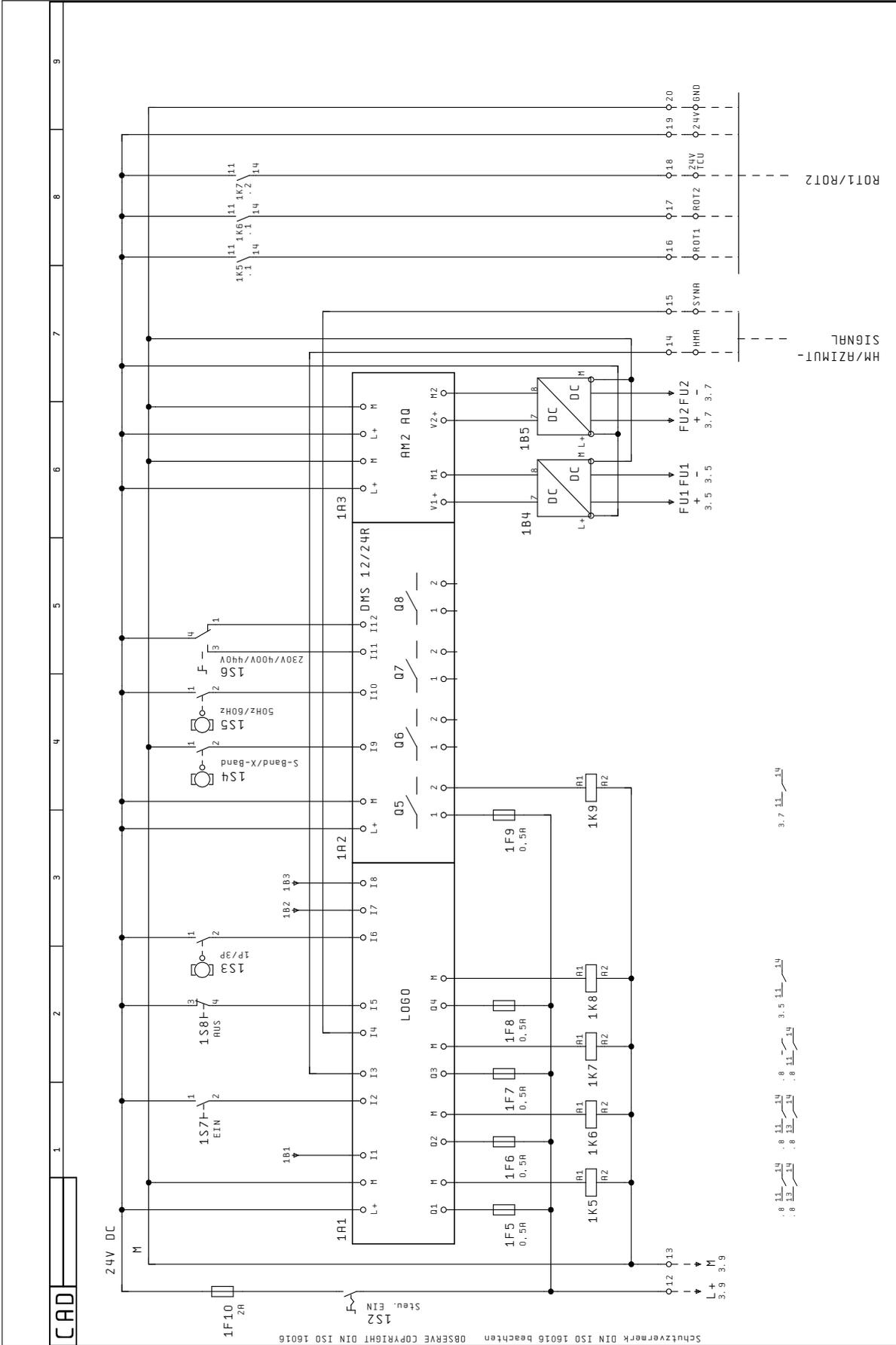


Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:		Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.lsc	Seite:	16 / 35

Betriebsstrom für ROT2 überprüfen



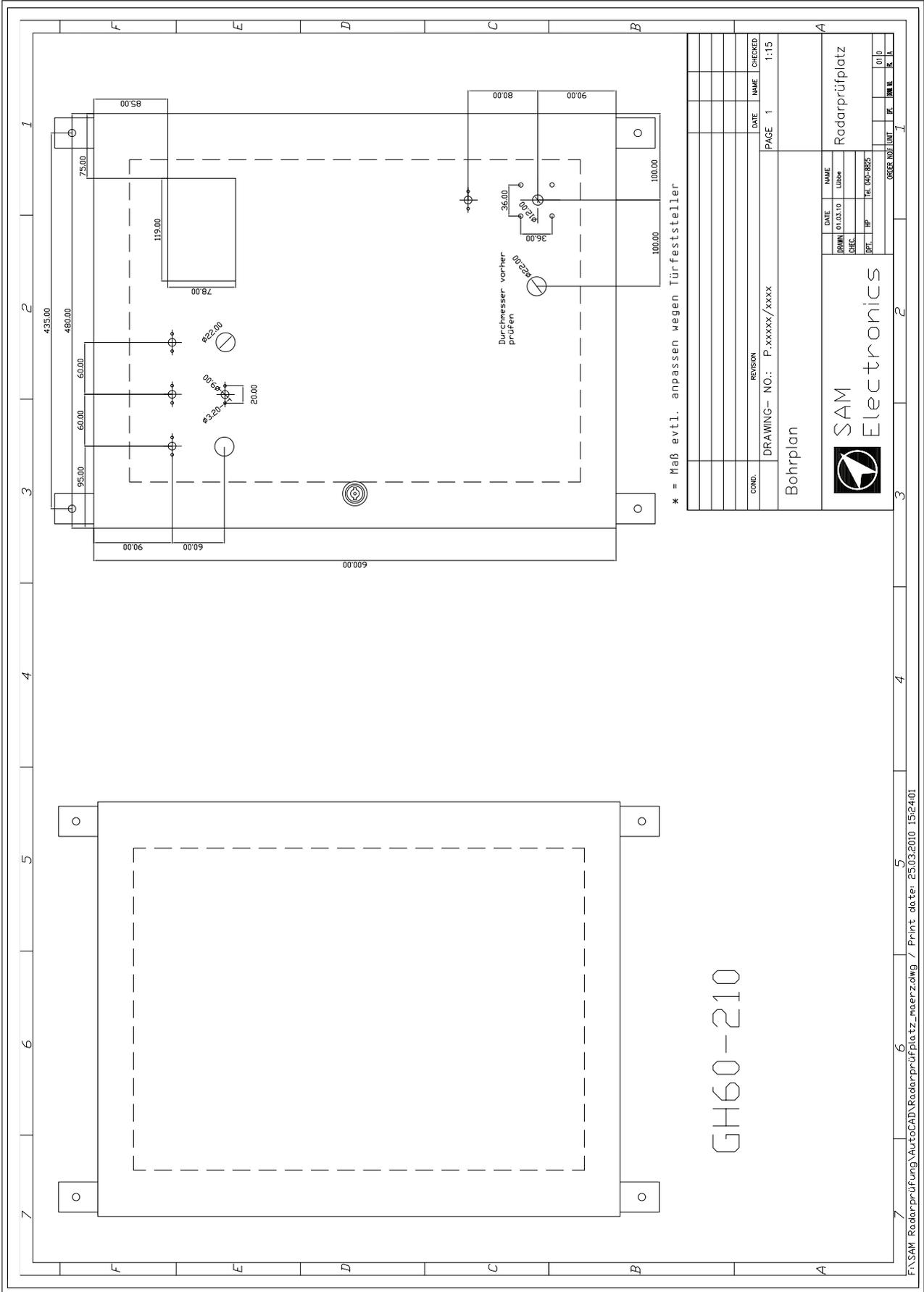
Ersteller:	Matthias Lübke	Projekt:	Motorprüfgerät	Kunde:	
Geprüft:		Anlage:	Steuernung_final_auf_LOGO_A3.lsc	Zeichen-Nr.:	
Erstellt/Geändert:	29.04.10 09:17/18.08.10 22:05	Datei:		Seite:	17 / 35



Hauptverteilung		LOGO STEUERUNG		271. xxx xxx. STR	
SAM Electronics		Hauptverteilung		LOGO STEUERUNG	
Ers. f.		Ers. f.		Ers. d.	
Ursprr.		Ursprr.		Ursprr.	
Datum		Name		Norm	
12.07.10		Luebbe		24.03.10	
Bearb.		Luebbe		Luebbe	
Gepr.		Luebbe		Luebbe	
Bl. 4		Bl. 4		Bl. 4	
4 Bl.		4 Bl.		4 Bl.	

CAD

Schutzvermerk DIN ISO 16016 beachten OBSERVE COPYRIGHT DIN ISO 16016



B.4 Liste der eingestellten Parametern

Folgend ist eine Tabelle mit allen veränderten Parametern aufgeführt. Nicht genannte Parameter sind entsprechend der Werkseinstellungen unverändert.

einphasiger FU:	P-03	Beschleunigungs- rampenzeit	0 für 0 sec.					
	P-04	Bremsrampenzeit	2 für 2 sec.					
	P-11	Startspannung	0 für 0%					
	P-15	Motorenspannung	230 für 230V					
dreiphasiger FU:	F21	Maximalfrequenz	60 für 60Hz					
	F24	Auswahl Minimal- und Maximalfrequenz	1 um Parameter F25 und F26 zu aktivieren					
	F25	oberes Frequenzlimit	60 für 60Hz					
	F26	unteres Frequenzlimit	0 für 0Hz					
	Frq	Sollwertquelle	3 für Analog 0...10V					
	H31	Anzahl der Polpaare	2					
	H72	Anzeige beim Einschalten	11 für Benutzeranzeige des Parameter H73					
	H73	Auswahl der Monitoran- zeige	0 für Ausgangsspannung					
	I50	Modus Analogausgang	2 für Ausgangsspannung					
Messumformer:	Jumper J2/J3 auf 1 für 0...10V am Ausgang							
Stromwächter:	Dippschalter							
	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8
	1	0	0	1	0	1	1	1
	für Messbereich 10A AC			für Ausgangssignal 0...10V				

Tabelle B.1: veränderte Parameter

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 25. August 2010

Ort, Datum

Unterschrift