

---

# Technische Restrukturierung eines Hybridsimulators für Windkraftanlagen

---

Diplomarbeit von

Julien Balet

Matrikel-Nr.: 10017301

31. Januar 2008

Betreuer : Prof. Dr.-Ing. Egon Ortjohann

2. Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Joseph Moerschell

Durchgeführt im Labor für  
Energieversorgung und Energiewirtschaft

Reg.-Nr.: 2007/46
----------------------



# Vorwort und Danksagung

Im Rahmen eines Abkommens zwischen der Fachhochschule Westschweiz<sup>1</sup> in der Schweiz und der Fachhochschule Südwestfalen<sup>2</sup> in Deutschland Soest habe ich die Möglichkeit ein Doppeldiplom im Labor für Energieversorgung von Prof. Dr.-Ing. Egon Ortjohann zu bekommen. Dieses Doppeldiplom enthält eine Diplomarbeit und zwei Vorlesungen während eines Semesters. Diese beiden Vorlesungen wurden ausgewählt :

**Regenerative Energie** mit Prof. Dr.-Ing. Egon Ortjohann

**Energie Controlling and Managment** mit Prof. Dr.-Ing. Arno Soennecken

Ich möchte mich bei folgenden Personen bedanken :

- Prof. Dr.-Ing. Egon Ortjohann der Fachhochschule Südwestfalen und Prof. Dr.-Ing. Joseph Moerschell der Fachhochschule Westschweiz für ihre Zusammenarbeit und für die Möglichkeit diese Arbeit zu verwirklichen.
- Das Büro *Move* in der Schweiz insbesondere Frau Laurie Koch, Frau Karine Amos, Herr Matial Geiser und das Akademische Auslandsamt insbesondere Frau Sabine Mahlstedt für die Organisation meines Aufenthalts in Soest.
- Herr Daniel Hegger für seine Geduld, seine Verfügbarkeit und seine Hilfe für die Korrektur.
- Herr Andreas Schmelter für seine Erläuterungen zu dem Simulator und für die zweite Korrektur.
- Meinen Kollegen im Labor für Energieversorgung für ihre Freundschaft

---

<sup>1</sup><http://www.hevs.ch/>

<sup>2</sup><http://www.fh-swf.de/>



# Erklärung

Diese Arbeit ist die Fortsetzung des Hybridsimulatorprojekts des Labors für Energieversorgung der Fachhochschule Soest. Diese Arbeit entwickelt die Steuerung des Hybridsimulators mit dem aktuellen Stand der Technik weiter. Parallel ist die Visualisierung von Herrn Lehmhaus entwickelt worden. Siehe *Lehmhaus [7]* für weitere Informationen.

Folgende Kapitel sind im Rahmen der Diplomarbeit erstellt worden :

## Teil 1

**Kapitel 1** : Einleitung

**Kapitel 2** : Konzept des Versuchstandes

**Kapitel 3** : Identifizierung der Ein- und Ausgänge

**Kapitel 4** : Sicherheit

**Kapitel 5** : Programmierung

**Kapitel 6** : Zusammenfassung und Ausblick

## Teil 2

**Anhang**

Soest, den 31. Januar 2008

---

(Julien Balet)



Teil I  
Bericht



## Résumé :

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll ein Hybridsimulator für Windkraftanlagen bezogen auf den aktuellen Stand moderner Automatisierungssysteme weiterentwickelt und restrukturiert werden. Derzeit arbeitet der Hybridsimulator in Verbindung mit dem Rapid-Prototyping-System DS1103 der Firma dSpace3 . Zur Prozess-Steuerung dient eine SPS der Baureihe S5 der Firma Siemens . Das Rapid-Prototyping-System und die Steuereinheit sollen durch ein modernes Automatisierungssystem basierend auf einer Soft-SPS und einer Echtzeit-Ethernet-Kopplung vollständig ersetzt werden.

Die Vernetzung zwischen Prozessklemmen und PC ist mit dem EtherCAT-Standard zu realisieren. Das Steuerprogramm der Soft-SPS ist bezogen auf den Standard IEC 61131-3 mit der TwinCAT-Automatisierungs-Software5 zu entwickeln.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Ziel der Arbeit</b>	<b>5</b>
<b>2. Konzept des Versuchstandes</b>	<b>7</b>
2.1. Beschreibung der alten Anlage . . . . .	7
2.1.1. Die Frontplatte . . . . .	9
2.1.2. Die Steuerung . . . . .	10
2.1.3. Die Motoren . . . . .	12
2.2. Beschreibung der neuen Anlage . . . . .	13
2.2.1. Neue Struktur . . . . .	14
<b>3. Identifizierung der Ein- und Ausgänge</b>	<b>17</b>
3.1. Einleitung . . . . .	17
3.2. Analoge Signale . . . . .	19
3.3. Mess-Signale der Netzeinspeisung . . . . .	19
3.3.1. Frontplatte . . . . .	19
3.3.2. Gesamtüberblick des Signals des Feldes Netzeinspeisung . . . . .	20
3.4. Steuer und Mess-Signale der Antriebsmaschine . . . . .	20
3.4.1. Frontplatte . . . . .	20
3.4.2. Motor und Siemens Master Drive . . . . .	21
3.4.3. Verschiedenes . . . . .	21
3.4.4. Gesamtüberblick der Signale für das Feld Antriebsmaschine . . . . .	21
3.5. Drehmomentaufnehmer . . . . .	22
3.5.1. Drehmomentmessung . . . . .	22
3.5.2. Gesamtüberblick der Signals des Feldes Drehmomentmessung . . . . .	22
3.6. Steuer und Mess-Signale des Generators . . . . .	23
3.6.1. Frontplatte . . . . .	23
3.6.2. Generator . . . . .	23
3.6.3. Verschiedenes . . . . .	23
3.6.4. Gesamtüberblick des Signals des Feldes Generator . . . . .	24
3.7. Steuersignale der Betriebsarten . . . . .	25
3.8. Gesamtüberblick des Signals . . . . .	26

<b>4. Sicherheit</b>	<b>31</b>
4.1. Vorgenommene Änderungen . . . . .	32
<b>5. Programmierung</b>	<b>35</b>
5.1. Einleitung . . . . .	35
5.1.1. Allgemeine Erklärung . . . . .	35
5.1.2. GEMMA Analyse . . . . .	36
5.2. Software Beschreibung . . . . .	37
5.3. Konfiguration . . . . .	40
5.3.1. Hardware . . . . .	40
5.3.2. Software . . . . .	44
5.4. GEMMA Analyse . . . . .	55
5.4.1. A6-Fahrt in den Initialzustand . . . . .	56
5.4.2. A1-Initialzustand . . . . .	56
5.4.3. F1-Normalbetrieb . . . . .	56
5.4.4. F4-Handbetrieb . . . . .	56
5.4.5. D1-Not-Aus . . . . .	57
5.5. Programm . . . . .	57
5.5.1. Struktur der Variablen . . . . .	58
5.5.2. Hauptprogramm . . . . .	59
5.5.3. Sicherheitsprogramm . . . . .	65
5.5.4. Programm zur Messwernerfassung . . . . .	67
5.5.5. Steuerung der Signalleuchten . . . . .	68
5.5.6. Visualisierung . . . . .	69
5.5.7. Leistungsberechnung . . . . .	71
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>75</b>
6.1. Hardware . . . . .	75
6.2. Sicherheit . . . . .	75
6.3. Software . . . . .	76
6.4. Fortsetzung der Entwicklung und Verbesserungen . . . . .	76
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>77</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>80</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>81</b>

# 1

## Einleitung und Ziel der Arbeit

Seit dem 29. März 2000 ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)<sup>1</sup> in Deutschland in Kraft getreten. Dieses Gesetz regelt die gesetzliche Grundlage zur Entwicklung der erneuerbaren Energien. Die Einführung dieses Gesetzes hat die Energiewirtschaft dynamisiert. Die Investitionen sind von Jahr zu Jahr gestiegen und die Unternehmen benötigen in diesem Bereich immer mehr Ingenieure.

Bis zum 30. Juni 2007 wurden in Deutschland 19024 Windkraftanlagen (WKA) mit einer kumulierten Leistung von 21283 MW installiert<sup>2</sup> und es sollen in den nächsten Jahren noch weitere Anlagen installiert werden. Außerdem wird die Nennleistung pro Anlage weiterhin wachsen. Dies bedeutet das die gesamte installierte Leistung größer werden wird, ohne anzahlmässigen Zuwachs der WKAs. Die beiden oben genannten Punkte verdeutlichen, dass die Unternehmen viele Leute für die Entwicklung suchen werden.

Diese Ingenieure kommen aus Fachhochschulen die die Studiengänge Energieversorgung oder Elektrotechnik anbieten und die Grundlagen die WKA-Technik als einen Teil ihrer Ausbildung genossen haben. Das Labor für Energieversorgung und Energiewirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen in Soest hat einen WKA Simulator entwickelt. Dieser Simulator ist für die Praktika der Studenten entwickelt worden um die Funktionsweise einer WKA zu verdeutlichen.

Dieser Simulator ist ein Hybridsimulator. Er besteht aus einem mathematischem Model der Dynamik einer WKA und einem Generator der mit dem Netz synchronisiert werden kann.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll der Hybridsimulator für Windkraftanlagen des Fachgebiets bezogen auf den aktuellen Stand moderner Automatisierungssysteme weiterentwickelt und restrukturiert werden. Derzeit arbeitet der Hybridsimulator in Verbindung mit dem Rapid-Prototyping-System DS1103 der Firma dSpace<sup>3</sup>. Zur Prozess-Steuerung dient eine SPS der Baureihe S5 der Firma Siemens<sup>4</sup>. Das Rapid-Prototyping-System und die Steuereinheit sollen durch ein modernes Automatisierungssystem basierend auf einer Soft-SPS und einer Echtzeit-Ethernet-Kopplung vollständig ersetzt werden. Die Vernet-

---

<sup>1</sup>BMU [3]

<sup>2</sup>BMU [2]

<sup>3</sup>dSPACE [5]

<sup>4</sup>Siemens [11]

zung zwischen Prozessklemmen und PC ist mit dem EtherCAT-Standart zu realisieren. Das Steuerprogramm der Soft-SPS ist bezogen auf den Standart IEC 61131-3 mit der TwinCAT-Automatisierungs-Software<sup>5</sup> zu entwickeln.

Die Anlage soll bezogen auf die Sicherheit weiterentwickelt werden. Diese Diplomarbeit umfasst sowohl den Schutz von Personen und als auch den der Anlage selbst.

Dieser Simulator kann verschiedene WKA-Typen nachbilden :

**Stall geregelte Anlagen :** Die Blätter des Rotors sind fest.

**Pitch geregelte Anlagen :** Der Winkel der Blätter des Rotors kann geregelt werden. Dies ermöglicht eine optimale Ausrichtung der Blätter in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit um den Wirkungsgrad anzupassen.

Die Anlage kann auch im Handbetrieb arbeiten. Im diesem Fall wird kein mathematisches Modell benutzt, sondern alles vom Benutzer eingestellt.

Verschiedene Betriebsarten können angewandt werden :

**Standardbetrieb :** Die Last ist direkt mit dem Generator verbunden.

**Schlupfbetrieb :** Eine elektronische Last wird benutzt um eine schnelle Leistungsänderung zu kompensieren. So wird die Materialermüdung verringert und die Ausgangsleistung stabilisiert.

**Doppeltgespeist :** Beim doppeltgespeisten Betrieb wird dem Läufer eine variable Spannung und variable Frequenz durch einen Frequenzumrichter eingeprägt.

In dieser Diplomarbeit wird nur der Standardbetrieb entwickelt. Die beiden anderen Betriebe werden bei einer nachfolgenden Diplomarbeit weiterentwickelt.

Für weitere Informationen über die Windkraftanlagen, das mathematische Modell oder die Betriebsarten stehen die folgenden Dokumente zu Verfügung :

- Rosenbaum [10] - Hybridsimulator für WKA mit Asynchronmaschinen
- Kersting [6] - Hybridsimulator für WKA mit ASM - Entwicklung eines numerischen Simulationsmodell
- Ortjohann [9] - Skript der Vorlesung *Regenerative Energien*

---

<sup>5</sup>Beckhoff [1]

# 2

## Konzept des Versuchstandes

### 2.1 Beschreibung der alten Anlage

Mit diesem Versuchstand wurde eine Windkraftanlage in seinen einzelnen Betriebsarten nachgebildet. In Abbildung 2.2 wird die reale Struktur einer Windkraftanlage und die Modellstruktur gegenübergestellt. Die Struktur besteht aus zwei Teilen : dem mechanischen Teil und dem elektrischen Teil.

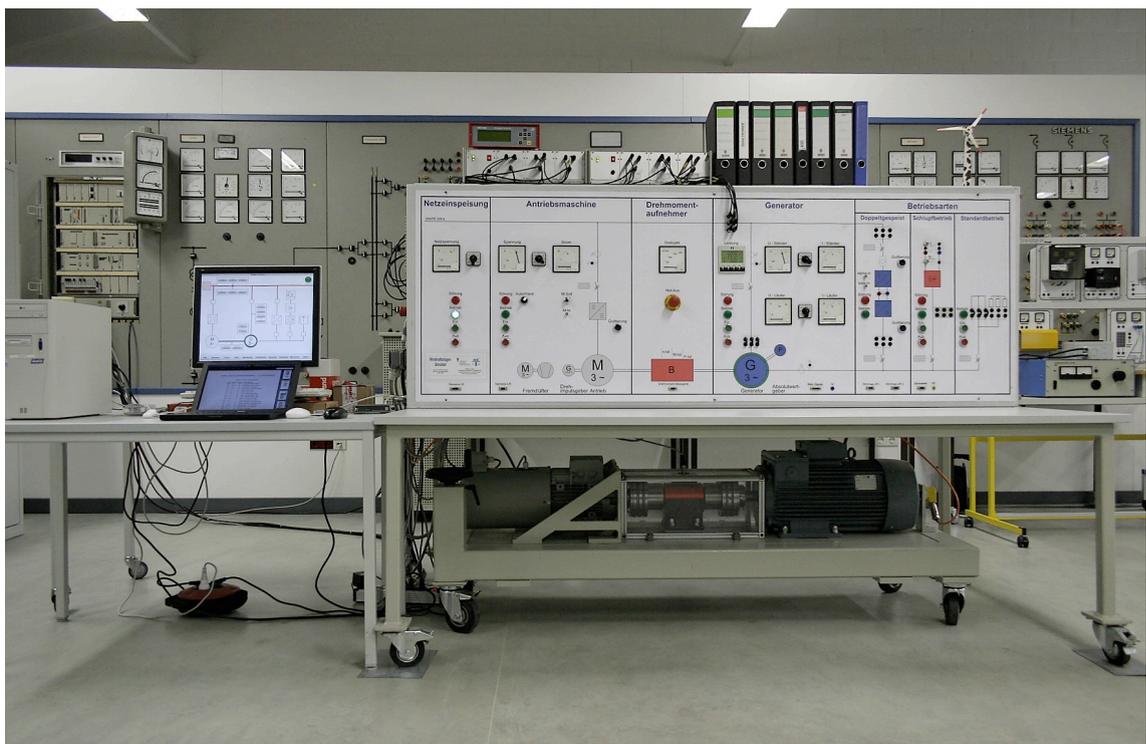


Abbildung 2.1: Die komplette Anlage

In Abbildung 2.2 ist die reale Struktur eine WKA dargestellt :

- Wind
- Rotor
- Triebstrang

Und für die elektrische Komponenten :

- Generator
- Netz

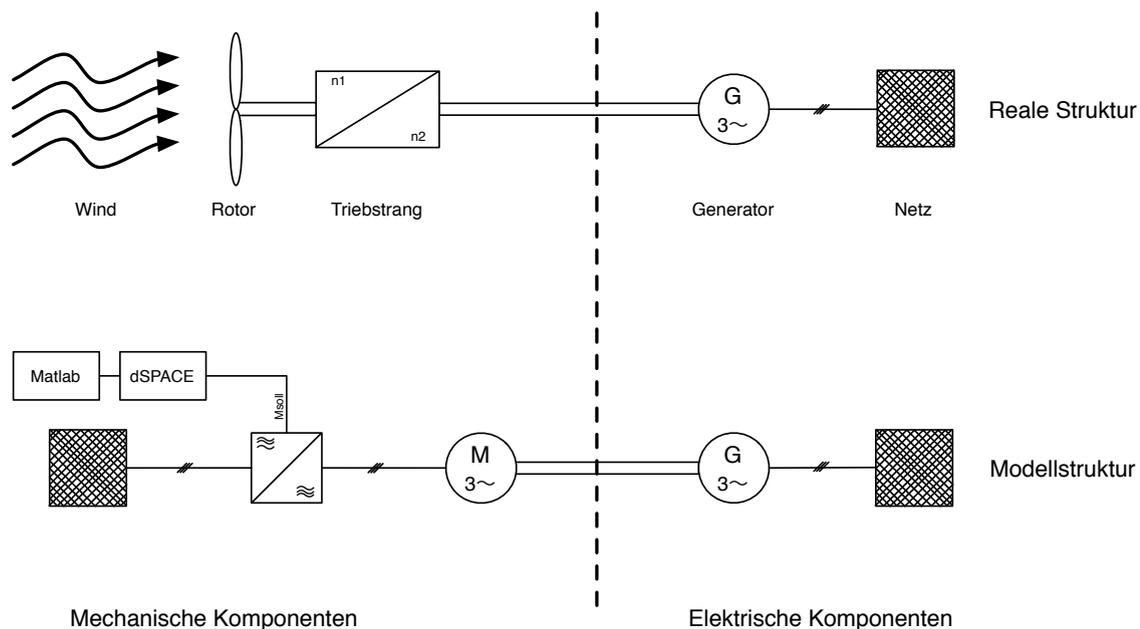


Abbildung 2.2: Gegenüberstellung Reale Struktur - Modellstruktur

Das Windprofil, der Rotor, der Triebstrang und die Wellen sind durch ein mathematisches Modell nachbildet. Dieses Modell berechnet die momentane Leistung und regelt somit das Drehmoment der Antriebsmaschine, welche mit dem Generator verbunden ist.

Das mathematische Modell bildet ein Windprofil und die Reaktion der Windkraftanlage nach. Der Ausgang dieses Modells ist das Drehmoment von dem Rotor und des Triebstranges des Generators. Die Erklärung dieses Modells liegt in der Diplomarbeit von T. Lütke-Verspohl <sup>1</sup> vor.

---

<sup>1</sup>Timo Lütke-Verspohl [12]

Der Versuchstand kann mit zwei verschiedenen Betriebsarten benutzt werden :

- Handbetrieb
- Autobetrieb

Im Handbetrieb ist der Sollwert des Moments mit einem Potentiometer reguliert. Dieser Potentiometer ist auf der Frontplatte angeordnet. Wenn man den Momentsollwert modifiziert, wird das Moment an der Welle direkt verändert (ohne dynamische Model einer Windkraftanlage).

Im Autobetrieb wird der Sollwert des Moments durch das mathematische Model generiert. Der Antrieb folgt der Dynamik des Windes und der Anlage.

Der Windkraftanlagen Simulator ist in verschiedenen Bereiche unterteilt :

- Die Frontplatte
- Die Steuerung
- Die Motoren

Die Bereiche werden nachfolgend erklärt.

### 2.1.1 Die Frontplatte

Auf der Frontplatte (siehe Abbildung 2.3) sind alle Taster und die Visualisierung der Messungen untergebracht. Diese ist in fünf Felder unterteilt:

**Netzeinspeisung Feld :** Hier befindet sich die Visualisierung der Netzspannungen und die Taster um die Anlage zu starten.

**Antriebsmaschine Feld :** Dort befindet sich die Antriebsteuerung und die Auto/Hand Auswahl. Die Spannung und der Antriebsstrom werden visualisiert. Der manuelle Sollwert des Momentes kann mit einem Potentiometer ausgewählt werden.

**Drehmomentaufnehmer Feld :** Hier befindet sich nur die Drehzahlmessung und ein Not-Aus Taster.

**Generator Feld** Hier ist die komplette Generator Visualisierung : Strom und Spannung des Ständers und des Rotors, sowie die Leistung als auch zwei Taster um der Generator ein- bzw. auszuschalten.

**Betriebsarten Feld :** Hier befindet sich die Steuerung für die drei Betriebsarten untergebracht : Doppeltgespeist, Schlupfbetrieb und Standardbetrieb.

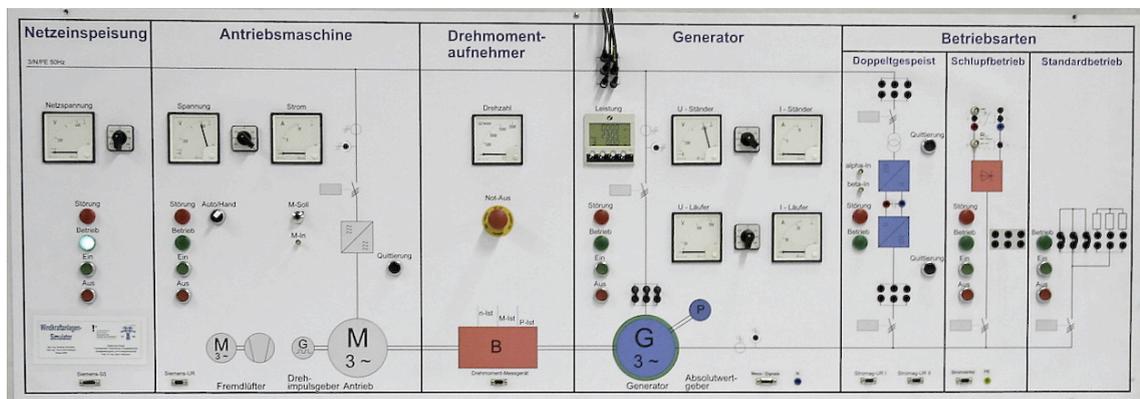


Abbildung 2.3: Frontplatte

### 2.1.2 Die Steuerung

Diese Steuerung-Systeme sind die wichtigsten für meine Arbeit. Es ist der Hauptteil der Anlage. Die Abbildung 2.4 zeigt die allgemeine Struktur und die Abbildung 2.5 den Schaltschrank:

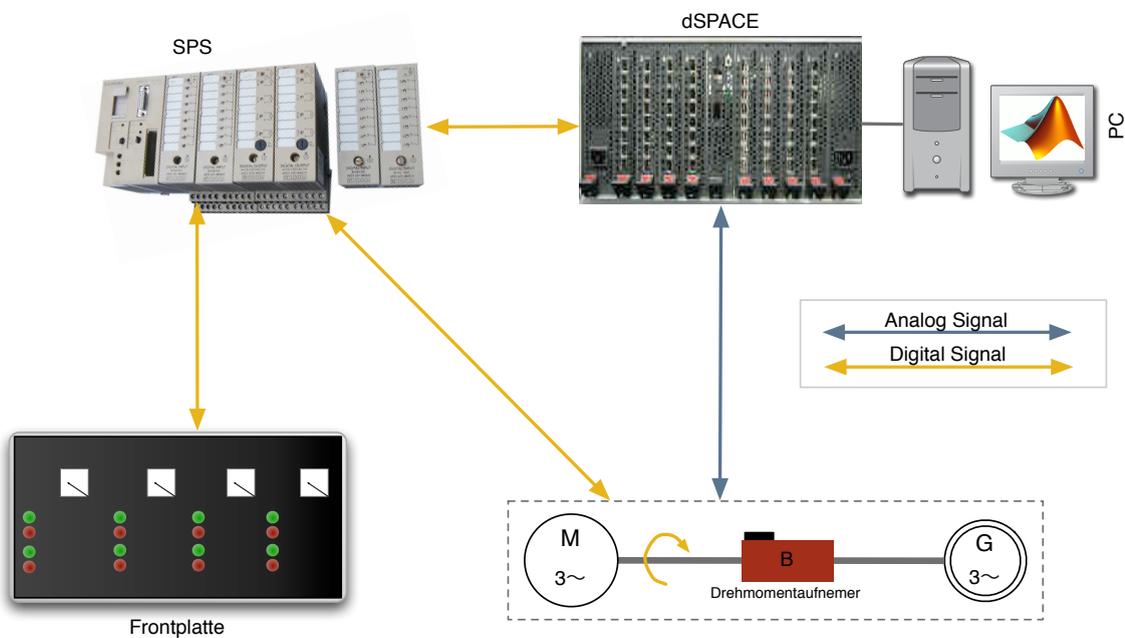


Abbildung 2.4: Allgemeine Struktur der alten Steuerung



Abbildung 2.5: Der Schaltschrank mit bereits der neuen SPS in der Mitte

**Der PC :** Auf dem PC ist die Software Matlab installiert. Das mathematische Modell wird mit Matlab Simulink nachgebildet. Dieses Modell bildet ein Windprofil, die Dynamik des Rotors, den Triebstrang und den Wirkungsgrad der WKA nach. Der Ausgang dieses Modells ist der Drehmoment Sollwert des Antriebs. Über die Welle wird durch den Wind erzeugte Drehmoment dem Generator zu geführt. Diese wandelt mechanische Leistung in elektrische um.

**dSPACE DSP :** Dieses Rapid-Prototyping-System DS1103 von der Firma dSPACE<sup>2</sup> ist ein Echtzeit System das für Matlab Simulink entwickelt wurde. Die Hardware basiert auf einem Digital Signal Processor (DSP). Ein mathematisches Modell<sup>3</sup> kann auf diesem DSP übertragen werden. Es stehen mehrere Ein- und Ausgänge zur digitalen und analogen Signalverarbeitung zur Verfügung. Es stellt die Verbindung zwischen der Anlage und dem mathematischen Modell dar.

---

<sup>2</sup>dSPACE [5]

<sup>3</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Kap. 3

**Der SPS :** Die speicherprogrammierbare Steuerung ist die Steuer-Intelligenz des Systems. Die Programme, die auf der SPS laufen, verwalten die digitalen Signale und die Auswahl zwischen Auto- und Handbetrieb. Eine Siemens S5<sup>4</sup> mit verschiedenen Boxen wurde benutzt. Die Taster, die Lampen und die Relais sind mit der SPS verbunden. Die Abbildung 2.6 zeigt die alte SPS.



Abbildung 2.6: Alte SPS Siemens S5

### 2.1.3 Die Motoren

Der Antrieb und der Generator sind durch einen Drehmomentaufnehmer gekoppelt. Links steht der Antrieb (Motor von Siemens)<sup>5</sup>, rechts der Generator (von VEM)<sup>6</sup> und in der Mitte den Drehmomentaufnehmer. Es gibt auch ganz rechts ein Inkremental-Encoder<sup>7</sup> um die Position des Läufers zu bestimmen. Die Abbildung 2.7 zeigt die mechanischen Teile :

---

<sup>4</sup>Siemens [11]

<sup>5</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Anhang 8

<sup>6</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Anhang 15

<sup>7</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Anhang 9

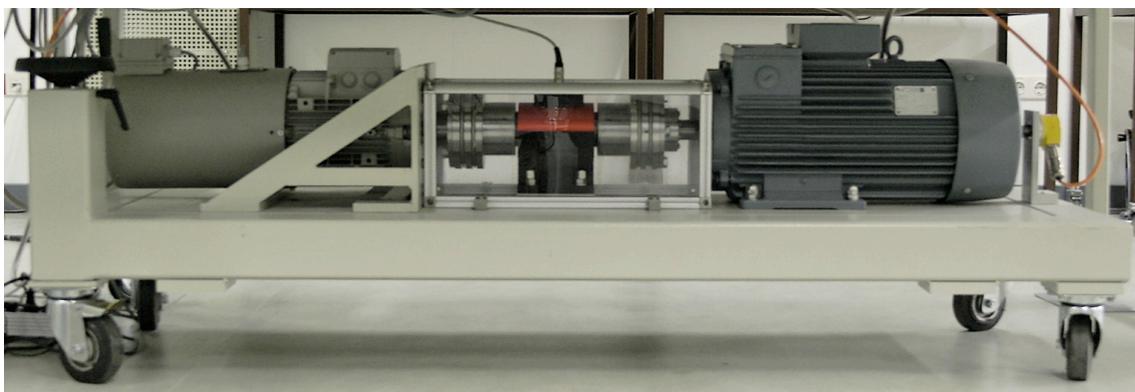


Abbildung 2.7: Links der Antrieb, rechts der Generator mit Inkrementalgeber und in der Mitte der Drehmomentaufnehmer.

## 2.2 Beschreibung der neuen Anlage

Das neue Konzept enthält das alte Konzept und wird durch die unten beschriebenen Änderungen verbessert.

Das Ziel ist eine verbesserte Funktionsweise indem das mathematische Modell sowie die Visualisierung im Schaltschrank integriert werden soll. Es soll weder eine Gefahr für den Benutzer oder der Anlage auftreten. Beispielsweise darf der Generator nicht eingeschaltet werden bevor er mit dem Netz synchronisiert wurde.

Das dSPACE System und die Steuereinheit sollen durch ein modernes Automatisierungssystem basierend auf einer Soft-SPS und einer Echtzeit-Ethernet-Kopplung vollständig ersetzt werden.

Der Echtzeitbus EtherCat<sup>8</sup> wird aufgrund der folgende Punkte benutzt :

**Schnelligkeit** : EtherCat ist der schnellste Bus auf dem Markt.

**Echtzeitfähigkeit** : EtherCat ermöglicht ein deterministische Kommunikation über Ethernet. Das EtherCat-Protokoll wird in die Daten des Ethernet-Frames gekapselt.

**Performance** : EtherCat besitzt eine hohe Performance (bis  $50\mu s$  pro Zyklus)

---

<sup>8</sup>siehe <http://www.ethercat.org/>

**Sicherheit :** Da das System deterministisch ist, können EtherCat Sicherheitsboxen benutzt werden, um zusammen zu kommunizieren. Außerdem ein Redundanz kann durchgeführt werden. Beispielsweise wird eine Ethernet-Karte mit zwei Port benutzt um eine Ring-Struktur aufzubauen.

**Flexibilität :** Ethernet erlaubt eine Stern-Struktur und eine Ring-Struktur. Dies ermöglicht ein sehr hohe Flexibilität bezüglich der Architektur der Vernetzung der externen Boxen.

### 2.2.1 Neue Struktur

Die Abbildung 2.8 zeigt die neue allgemeine Struktur der Anlage :

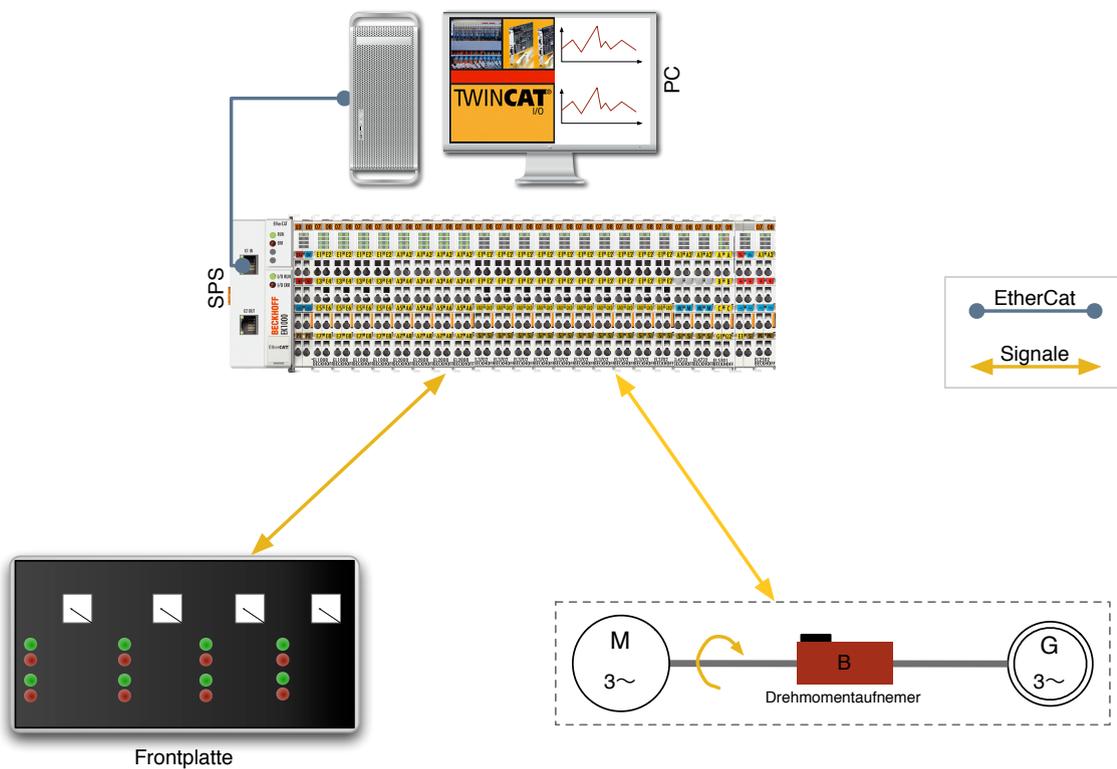


Abbildung 2.8: Allgemeine Struktur der neuen Steuerung

Die Abbildung 2.8 zeigt, dass sämtliche Signale (Analoge und Digitale) direkt mit der SPS verbunden werden. Dies hat eine einfache Handhabung der Signale zur Folge.

Die SPS ist eine Soft-SPS. Sie läuft auf einem Rechner und kommuniziert mit externen Boxen via EtherCat. Die Soft-SPS und die Boxen sind von der Firma Beckhoff<sup>9</sup>. Dieses System ermöglicht einen Echtzeitbetrieb. Dies ermöglicht die Verwendung eines diskreten

<sup>9</sup>Beckhoff [1]

mathematischen Modells. Außerdem kann die Zykluszeit bis auf  $50\mu s$  eingestellt werden, was eine hohe zeitliche Auflösung der Echtzeitberechnung ermöglicht. Die Abbildung 2.9 zeigt die neue SPS.

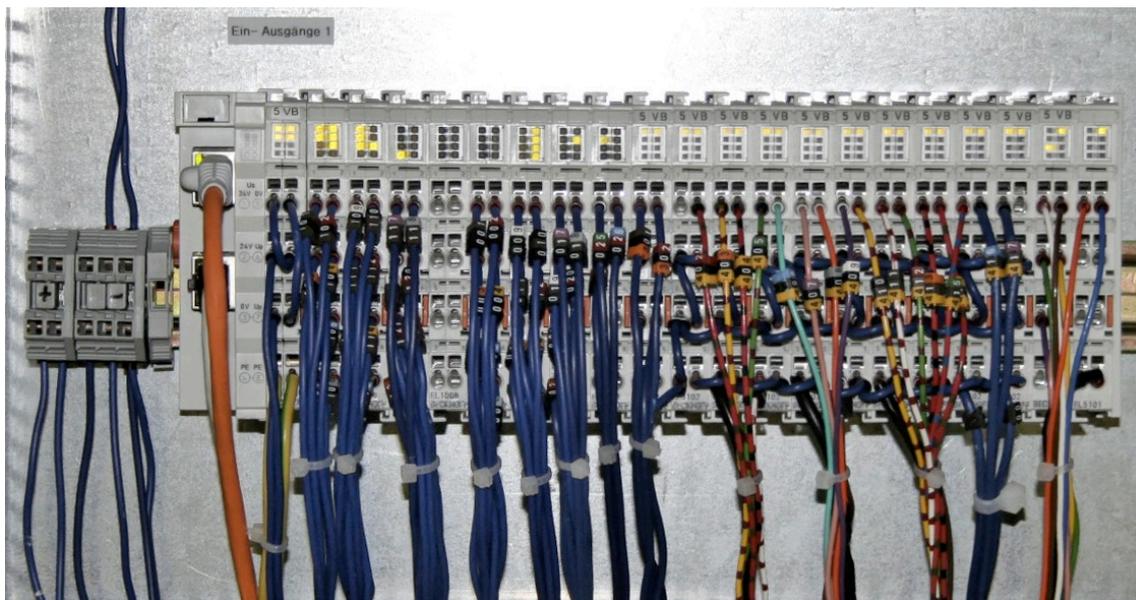


Abbildung 2.9: Externe Boxen der neuen Soft-SPS

Die Struktur ist einfacher und mächtiger aufgebaut als die alte. Alle Daten sind zentralisiert und können leicht zu anderen Geräten über Ethercat oder Ethernet gesendet werden. Beispielsweise die SCADA-Software<sup>10</sup> *ZenOn* von der Firma Copadata<sup>11</sup> kann über Ethernet die Daten aus der SPS lesen und schreiben. Diese Software wird für die Visualisierung<sup>12</sup> eingesetzt.

Die weiteren Anlagenteile werden nicht geändert bzw. erweitert. Die Parameter der Frequenzumrichter bleiben gleich, aber im Kabelbaum werden einige Modifikationen durchgeführt (siehe Kapitel 4 und 5.3.1).

Die Änderungen der Anlage werden im Folgenden erläutert:

**Analyse der aktuellen Anlage und der Signale (siehe Kap. 3)** Identifizierung aller Signale (analog, digital und besonderes) um die Anzahl der verschiedenen I/O-Boxentypen zu benutzten zu definieren.

**Auswechseln der SPS gegen eine neue Echtzeit SPS (siehe Kap. 5.3)** Um die Softwareleistung, die Flexibilität der Programmierung und die Funktionsweise des mathemati-

<sup>10</sup>SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition

<sup>11</sup>Copadata [4]

<sup>12</sup>siehe Kap. 5.5.6

sche Modell zu verbessern wird ein neue SPS, welche auf den aktuellen Stand der Technik ist, eingesetzt.

**Sicherheitsänderungen (siehe Kap. 4)** Um die Bedingungen der Sicherheit zu garantieren werden einige Modifikationen in der Verkabelung vorgenommen und ein spezifische Funktion in die Soft-SPS programmiert.

**Entwicklung des Programms(siehe Kap. 5.5)** Das Programm wird strukturiert und entwickelt um weitere Änderungen zu erleichtern.

**Visualisierung der Variablen (siehe Kap. 5.5.6)** Die Entwicklung der Visualisierung ist nicht Teil der Diplomarbeit. Eine kurze Beschreibung ist jedoch vorhanden.

**Funktionsprüfung und Fortsetzung der Entwicklung (siehe Kap. 6)** Dieser Arbeit ist ein Teil der Entwicklung der Hybridsimulator. Andere Diplomarbeiten werden um die Anlage und das mathematisches Modell zu verbessern gemacht.

# 3

## Identifizierung der Ein- und Ausgänge

### 3.1 Einleitung

Der erste große Teil der Arbeit ist es, alle Ein- und Ausgänge zu identifizieren und zu klassifizieren. Die Signale sind in fünf Kategorien unterteilt :

- Digitale Eingänge (DE)
- Digitale Ausgänge (DA)
- Analoge Eingänge (AE)
- Analoge Ausgänge (AA)
- Besonderes (B)

In diesem Kapitel werden alle Signale Schritt für Schritt beschrieben und am Ende zusammengefasst.

Die Abbildung 2.3 im Kapitel 2.1.1 zeigt einen Überblick der Frontplatte.

Die digitalen Signale sind schon mit der alten SPS verbunden und im Bericht vom Timo Lütke-Verspohl<sup>1</sup> ganz detailliert erläutert worden.

Jede Ader ist durch eine Nummer, aus drei Zahlen bestehend identifizierbar. Die erste Zahl zeigt den Signaltyp und die beiden anderen die Nummer des Signals an.

Die Bedeutung der ersten Zahl der Beschriftung wird in Tabelle 3.1 beschrieben.

---

<sup>1</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Anhang 5

Tabelle 3.1: Beschreibung der ersten Zahl eines Signals

Zahl	Beschreibung
0	Digital Ausgang
1	Digital Eingang
3	Analog Ausgang
4	Analog Eingang

Zum Beispiel der Nummer 312 bedeutet :

- 3 : Analog Ausgang
- 12 : Analog Ausgang Nummer 12

Die Signale werden in einer Tabelle ausgezeigt. Die Tabelle 3.2 zeigt ein Beispiel.

Tabelle 3.2: Beispiel

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	H1	009	Signalleuchte Netz eingeschaltet

Die verschiedenen Felder der Tabelle 3.2 werden erklärt :

**Type** : Type des Signal (Hier digital Ausgang)

**Name** : Name der Komponente auf der Schaltplan (Hier die Leuchte H1)

**Nummer** : Nummer des Signal auf der SPS (Hier Signal Nummer 009)

**Beschreibung** : Beschreibung der Signal

Somit lässt sich die Nummerierung leicht zur erkennen des Signals nutzen.

## 3.2 Analoge Signale

Der große Unterschied zwischen dem alten und dem neuen Konzept ist die Verbindung der analogen Signale. Diese sind direkt an der neuen SPS angeschlossen. Die Abbildung 3.1 zeigt woher die jeweiligen analogen Signale kommen:

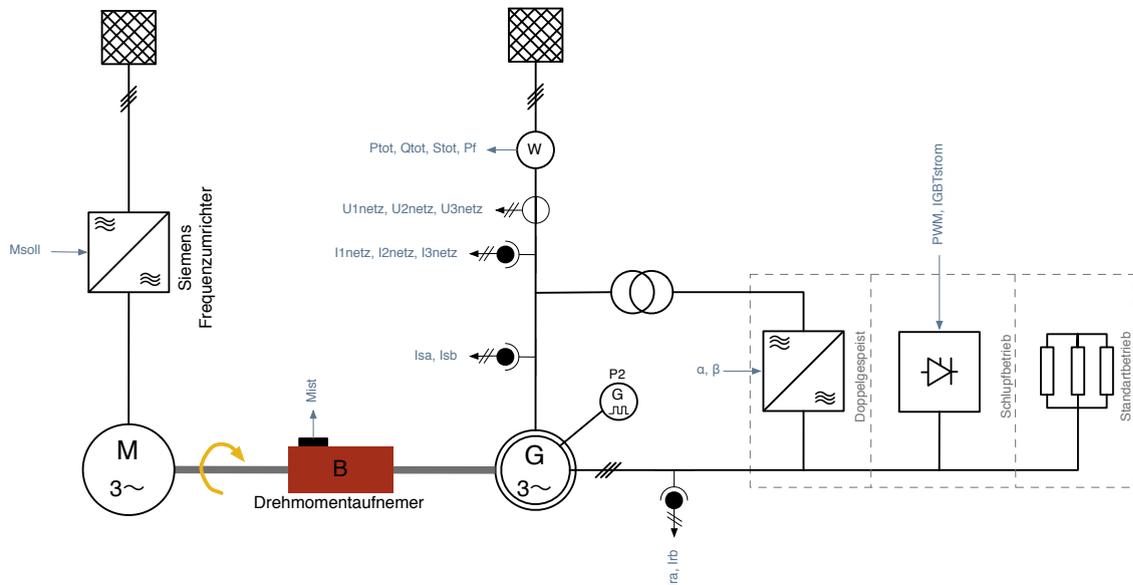


Abbildung 3.1: Darstellung der analogen Signale in der Anlage

Die Signale werden für jedes Feld im nächsten Kapitel detailliert erklärt.

## 3.3 Mess-Signale der Netzeinspeisung

### 3.3.1 Frontplatte

Für dieses Feld gibt es nur ein Signal. Dieses Signal wird an die SPS gesendet und wird *Netz eingeschaltet H1* genannt. Die anderen Signale *Netzeinspeisung EIN S1*, *Netzeinspeisung AUS S2* und *Netz ausgeschaltet H2* sind direkt mit dem Sicherheitsrelais verbunden. Die Abbildung 3.2 zeigt diese Teile der Frontplatte :



Abbildung 3.2: Feld Netzeinspeisung der Frontplatte

### 3.3.2 Gesamtüberblick des Signals des Feldes Netzeinspeisung

Die Tabelle 3.3 zeigt Gesamtüberblick des Signals des Feldes Netzeinspeisung.

Tabelle 3.3: Liste der Signale des Feldes Netzeinspeisung

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	H1	009	Signalleuchte Netz eingeschaltet

## 3.4 Steuer und Mess-Signale der Antriebsmaschine

### 3.4.1 Frontplatte

Aus diesen Teilen kommen einige digitale Signale von der Frontplatte : *Antrieb EIN S3*, *Antrieb AUS S4*, *Auto/Hand Betrieb S5*, *Antrieb Betrieb H3* und *Antrieb Störung H2*. Die Abbildung 3.3 zeigt diese Teile der Frontplatte :

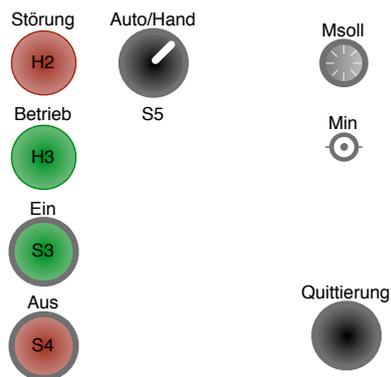


Abbildung 3.3: Feld Antriebsmaschine der Frontplatte

Im Autobetrieb wird der Drehmomentsollwert in der SPS errechnet. Dieser Sollwert wird mit dem Ausgang  $M_{in}$  geliefert.

Im Handbetrieb wird der Drehmomentsollwert direkt über das Potentiometer eingestellt. Die Änderung des Signals wird mit dem Wechselrelais -K13 geschaltet. Siehe Abbildung 5.9.

### 3.4.2 Motor und Siemens Master Drive

Es gibt zwei Ausgangsrelais für den Motor. Das Relais -K3 startet den Fremdlüfter und -K4 verbindet das Netz und den Frequenzumrichter. Auf beiden Relais ist ein Hilfskontakt um den Zustand einzulesen (Eingangsrelais -K3 für den Fremdlüfter Zustand und -K4 für den Netzverbindungsstatus).

Zwei weitere Hilfsrelais werden für den Motorschutz benutzt (Q1 Motorschutz Siemens Lüfter und Q2 Motorschutz Siemens Lüfter).

Der Ausgang X101.9 ist reserviert um den Siemens Frequenzumrichter einzuschalten. Dieser gibt zwei Zustände aus: 'Betrieb' X101.4 und 'Störung' X101.3.

### 3.4.3 Verschiedenes

Ein digitaler Ausgang wird für die 24V Versorgung der Elektronik des Siemens Master Drive benutzt.

### 3.4.4 Gesamtüberblick der Signale für das Feld Antriebsmaschine

Die Tabelle 3.4 zeigt ein Gesamtüberblick der Signale des Feldes Antriebsmaschine.

Tabelle 3.4: Liste der Signalen des Feldes Antriebsmaschine

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	K3	001	Leistungsschutz Siemens Lüfter EIN
DA	K4	002	Leistungsschutz Siemens Antrieb EIN
DA	H2	010	Signalleuchte Störung Antrieb
DA	H3	011	Signalleuchte Betrieb Antrieb
DA	X101.9	019	Siemens Master Drive EIN
DA	K10	020	24V Versorgung Siemens Masterdrive
DA	K13	023	Sollwert-Umschaltung Potentiometer/Regelung

*siehe nächste Seite...*

*Fortsetzung der Tabelle 3.4...*

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DE	Q2	101	Motorschutz Siemens Antrieb
DE	S3	105	Taster Antrieb EIN
DE	S4	106	Taster Antrieb AUS
DE	S5	107	Automatischer Betrieb EIN
DE	X101.3	114	Siemens Master Drive Störung
DE	X101.4	115	Siemens Master Drive Betrieb
DE	K3	116	K3 EIN, Fremdlüfter
DE	K4	117	K4 EIN, Netzverbindung
AA	Msoll	301	Sollwert Drehmoment

## 3.5 Drehmomentaufnehmer

### 3.5.1 Drehmomentmessung

Das Drehmoment wird mit dem Drehmomentaufnehmer durch das UMV 200<sup>2</sup> Gerät gemessen. Ein analoger Ausgang wird genutzt um das Signal der Drehzahl zur Drehzahlvisualisierung zu senden.

### 3.5.2 Gesamtüberblick der Signals des Feldes Drehmomentmessung

Die Tabelle 3.5 zeigt ein Gesamtüberblick der Signale des Feldes Drehmomentmessung.

Tabelle 3.5: Liste der Signale des Feldes Drehmomentmessung

Type	Name	Nummer	Beschreibung
AE	Mist	416	Drehmomentmessung
AA	Drehzahl	302	Drehzahl Signal für Drehzahlvisualisierung

---

<sup>2</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Kap. 5.7.1

## 3.6 Steuer und Mess-Signale des Generators

### 3.6.1 Frontplatte

Es gibt zwei Taster und zwei Leuchten auf der Frontplatte des Generator-Feldes: 'Generator Ständer EIN' S7, 'Generator Ständer AUS' S8, 'Störung VEM Generator Ständer' H4 und 'VEM Generator Ständer am Netz' H5. Die Abbildung 3.4 zeigt die Elemente der Frontplatte :

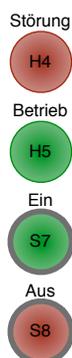


Abbildung 3.4: Feld Generator der Frontplatte

Auf der Frontplatte ist auch die Netzleistungsmessung angeordnet. Dieses Gerät liefert vier analoge Signale :  $P_{tot}$ ,  $Q_{tot}$ ,  $Stot$ ,  $Pf$  (PowerFaktor).

Drei Spannungswandler und drei Stromwandler liefern die Spannungen und die Ströme des Generators ( $U_{netz1}$ ,  $U_{netz2}$ ,  $U_{netz3}$ ,  $I_{netz1}$ ,  $I_{netz2}$ ,  $I_{netz3}$ ). Siehe Abbildung 5.7

### 3.6.2 Generator

In dem Schrank sind vier weitere Stromwandler um die Ströme des Ständers und des Rotors der Phase 1 und 2 zu messen ( $I_{ra}$ ,  $I_{rb}$ ,  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ). Siehe Abbildung 5.10

### 3.6.3 Verschiedenes

Das Relais -K5 verbindet die drei Phasen des Ständers mit dem Netz. Ein Hilfsrelais liefert ein Signal an die SPS (Eingangsrelais -K5).

Zwei andere Hilfsrelais liefern die Zustände der Motorschütze Q3 und Q4 um die Zustände des Relais einzulesen.

### 3.6.4 Gesamtüberblick des Signals des Feldes Generator

Die Tabelle 3.6 zeigt ein Gesamtüberblick der Signale des Feldes Generator.

Tabelle 3.6: Liste der Signale des Feldes Generator

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	K5	003	Leistungsschütz VEM Generator Ständer EIN
DA	H4	012	Signalleuchte Störung VEM Generator Ständer
DA	H5	013	Signalleuchte VEM Generator Ständer am Netz
DE	Q4	104	Motorschutz VEM Schleifringläufer
DE	S7	108	Taster Generator Ständer EIN
DE	S8	109	Taster Generator Ständer AUS
DE	K5	118	K5 EIN, Netzverbindung
AE	Isa	402	VEM Ständerstrom Phase 1
AE	Isb	403	VEM Ständerstrom Phase 2
AE	Ira	404	VEM Statorstrom Phase 1
AE	Irb	405	VEM Statorstrom Phase 2
AE	Pin	406	Ptot
AE	Pout	407	Qtot
AE	Qin	408	Stot
AE	Qout	409	Pf
AE	U1netz	410	Netzspannung U1
AE	U2netz	411	Netzspannung U2
AE	U3netz	412	Netzspannung U3
AE	I1netz	413	Netzstromm I1
AE	I2netz	414	Netzstromm I2
AE	I3netz	415	Netzstromm I3

### 3.7 Steuersignale der Betriebsarten

Auf dem Feld Betriebsarten wird die doppeltespeiste Betriebsart nicht benutzt. Diese Funktion wird später geändert. Einige Signale sind im Voraus reserviert.

#### Frontplatte

Auf der Frontplatte sind für den Schlupfbetrieb und den Standardbetrieb nur Tasten und Leuchten : 'Elektronische Last EIN' S9, 'Elektronische Last AUS' S10, 'Störung elekt. Last' H8, 'Betrieb elekt. Last' H9, 'Läuferkreis kurzschließen EIN' S11, 'Läuferkreis kurzschließen AUS' S12 und ein 'Betrieb Standart' H10.

Auf der Frontplatte sind zwei analoge Verbindungen für den Schlupfbetrieb : Ein analog Eingang 'PWM' um die elektronische Last zu kontrollieren und einen analogen Ausgang 'IGBT<sub>Strom</sub>' . Die Abbildung 3.5 zeigt diese Elemente der Frontplatte :

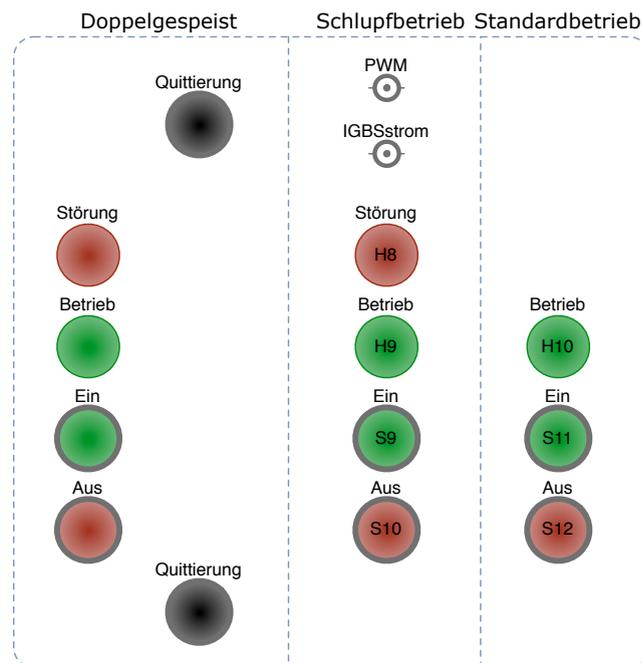


Abbildung 3.5: Feld Betriebsarten auf der Frontplatte

#### Verschiedenes

Im Schrank gibt es Relais um die verschiedenen Lasten auf dem Rotor zu schalten: Das Relais -K8 für die elektronische Last und das Relais -K9 für die Standardlast. Die beiden Relais haben ein Hilfsrelais um die Zustände des Relais einzulesen.

### Gesamtüberblick des Signals des Feldes Betriebsarten

Die Tabelle 3.7 zeigt ein Gesamtüberblick der Signale des Feldes Betriebsarten.

Tabelle 3.7: Liste der Signale des Feldes Betriebsarten

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	K8	006	Leistungsschütz elektr. Last 'EIN'
DA	K9	007	Leistungsschütz Läufer kurzschließen 'EIN'
DA	H8	016	Signalleuchte Störung elektr. Last
DA	H9	017	Signalleuchte Betrieb elektr. Last
DA	H10	018	Signalleuchte Betrieb Standart
DE	S10	111	Taster elektronische Last 'AUS'
DE	S11	112	Taster Läuferkreis kurzschließen 'EIN'
DE	S12	113	Taster Läuferkreis kurzschließen 'AUS'
DE	K8	121	K8 'EIN'
DE	K9	122	K9 'EIN'
PWM	PWM	303	PWM
AE	IGBTstrom	401	Strom durch der IGBT

### 3.8 Gesamtüberblick des Signals

Hier sind die Signale nach Kategorien dargestellt. Die Tabelle 3.8 zeigt die digitale Ausgänge, die 3.9 die digitale Eingänge, die 3.10 analoge Ausgänge, die 3.11 die analoge Eingänge und die 3.12 die besondere Signale.

#### Digitale Ausgänge

Tabelle 3.8: Liste der digitale Ausgänge

Type	Name	Nummer	Beschreibung
DA	K3	001	Leistungsschütz Siemens Lüfter 'EIN'
DA	K4	002	Leistungsschütz Siemens Antrieb 'EIN'

*siehe nächste Seite...*

*Fortsetzung der Tabelle 3.8...*

<b>Type</b>	<b>Name</b>	<b>Nummer</b>	<b>Beschreibung</b>
DA	K5	003	Leistungsschutz VEM Generator Ständer 'EIN'
DA	K6	004	Leistungsschutz Stromag 1+2 'EIN'
DA	K7	005	Leistungsschutz Läuferregler 'EIN'
DA	K8	006	Leistungsschutz elektr. Last 'EIN'
DA	K9	007	Leistungsschutz Läufer kurzschließen 'EIN'
DA	H1	009	Signalleuchte Netz eingeschaltet
DA	H2	010	Signalleuchte Störung Antrieb
DA	H3	011	Signalleuchte Betrieb Antrieb
DA	H4	012	Signalleuchte Störung VEM Generator Ständer
DA	H5	013	Signalleuchte VEM Generator Ständer am Netz
DA	H6	014	Signalleuchte Störung doppeltgespeister Betrieb
DA	H7	015	Signalleuchte Betrieb doppeltgespeister Betrieb
DA	H8	016	Signalleuchte Störung elektr. Last
DA	H9	017	Signalleuchte Betrieb elektr. Last
DA	H10	018	Signalleuchte Betrieb Standart
DA	X101.9	019	Siemens Master Drive 'EIN'
DA	K10	020	24V Versorgung Siemens Masterdrive
DA	K11	021	Reserve
DA	K12	022	Reserve
DA	K13	023	Sollwert-Umschaltung Potentiometer/Regelung
DA	K14	024	Reserve
DA	K15	025	Reserve
DA	K16	026	Reserve
DA	K17	027	Reserve
DA	SichOK	028	Sicherheit im SPS OK

**Digitale Eingänge**

Tabelle 3.9: Liste der digitalen Eingänge

<b>Type</b>	<b>Name</b>	<b>Nummer</b>	<b>Beschreibung</b>
DE	Q1	101	Motorschutz Siemens Lüfter
DE	Q2	102	Motorschutz Siemens Antrieb
DE	Q3	103	Motorschutz VEM Ständer
DE	Q4	104	Motorschutz VEM Schleifringläufer
DE	S3	105	Taster Antrieb 'EIN'
DE	S4	106	Taster Antrieb 'AUS'
DE	S5	107	Automatischer Betrieb 'EIN'
DE	S7	108	Taster Generator Ständer 'EIN'
DE	S8	109	Taster Generator Ständer 'AUS'
DE	S9	110	Taster elektronische Last 'EIN'
DE	S10	111	Taster elektronische Last 'AUS'
DE	S11	112	Taster Läuferkreis kurzschließen 'EIN'
DE	S12	113	Taster Läuferkreis kurzschließen 'AUS'
DE	X101.3	114	Siemens Master Drive 'Störung'
DE	X101.4	115	Siemens Master Drive 'Betrieb'
DE	K3	116	K3 'EIN', Fremdlüfter
DE	K4	117	K4 'EIN', Netzverbindung
DE	K5	118	K5 'EIN', Netzverbindung
DE	K8	119	K6 'EIN'
DE	K9	120	K7 'EIN'
DE	K8	121	K8 'EIN'
DE	K9	122	K9 'EIN'

**Analoge Ausgänge**

Tabelle 3.10: Liste der analogen Ausgänge

Type	Name	Nummer	Beschreibung
AA	Msoll	301	Sollwert Drehmoment
AA	Drehzahl	302	Drehzahlsignal für Drehzahlvisualisierung

**Analoge Eingänge**

Tabelle 3.11: Liste der analogen Eingänge

Type	Name	Nummer	Beschreibung
AE	IGBTstrom	401	Strom durch der IGBT
AE	Isa	402	VEM Ständerstrom Phase 1
AE	Isb	403	VEM Ständerstrom Phase 2
AE	Ira	404	VEM Statorstrom Phase 1
AE	Irb	405	VEM Statorstrom Phase 2
AE	Pin	406	Ptot
AE	Pout	407	Qtot
AE	Qin	408	Stpt
AE	Qout	409	Pf
AE	U1netz	410	Netzspannung U1
AE	U2netz	411	Netzspannung U2
AE	U3netz	412	Netzspannung U3
AE	I1netz	413	Netzstromm I1
AE	I2netz	414	Netzstromm I2
AE	I3netz	415	Netzstromm I3
AE	Mist	416	Drehmomentmessung
AE	Drehzahl	417	Drehzahl

### Besonderes

Tabelle 3.12: Liste der besonderen Signale

Type	Name	Nummer	Beschreibung
I	P2		Drehimpulsgeber (Laufzhal)
PWM	PWM		PWM elektr. Last

Alle diese Signale sind in Anhang B zusammengefasst und in die Schaltpläne in Anhang U dargestellt.

# 4

## Sicherheit

Die Sicherheit für die Anlage dient dem Schutz von Mensch und Maschine.

Keinen direkten Kontakt mit dem Strom und keinen Zugang durch ein mechanisches Teil in Bewegung soll möglich sein. Spezialsteckdosen sowie ein Gehäuse zum Schutz vor drehenden Teilen werden aus Sicherheitsgründen eingesetzt.

In Abbildung 2.7 können wir das Gehäuse sehen.

Die SPS ist immer mit 24V versorgt und somit sind die Ein- und Ausgänge immer verfügbar.

Ein Sicherheitsrelais von der Firma Siemens verhindert dass die Anlage sich nach einem Notfall selbständig startet. Der Leistung-Teil wird abgeworfen wenn die SPS beispielsweise ein Signal eines ausgelösten Motorschutzes empfängt oder der Benutzer auf einen der Not-Aus Taster drückt. Die Nummer 1 in Abbildung 4.1 zeigt die Verbindung der Not-Aus Taster.

Nach einem Fehlerfall muss der Benutzer auf den 'Reset' Taster (AUS Taster des Netzeinspeisungsfeld) drücken, um die Anlage neu zu starten.

In jeden Zyklus werden die folgenden Bedingungen abgefragt. Beispielsweise :

- Der Antrieb soll sich nicht schneller drehen als  $1800 \text{ min}^{-1}$
- Der Generator darf nicht synchronisiert sein solange der Antrieb läuft zwischen  $1490$  und  $1510 \text{ min}^{-1}$
- Ein Neustart kann nicht ausgeführt werden solange sich die Welle dreht.

Das Sicherheitsprogramm wird in dem Kapitel 5.5.3 erklärt.

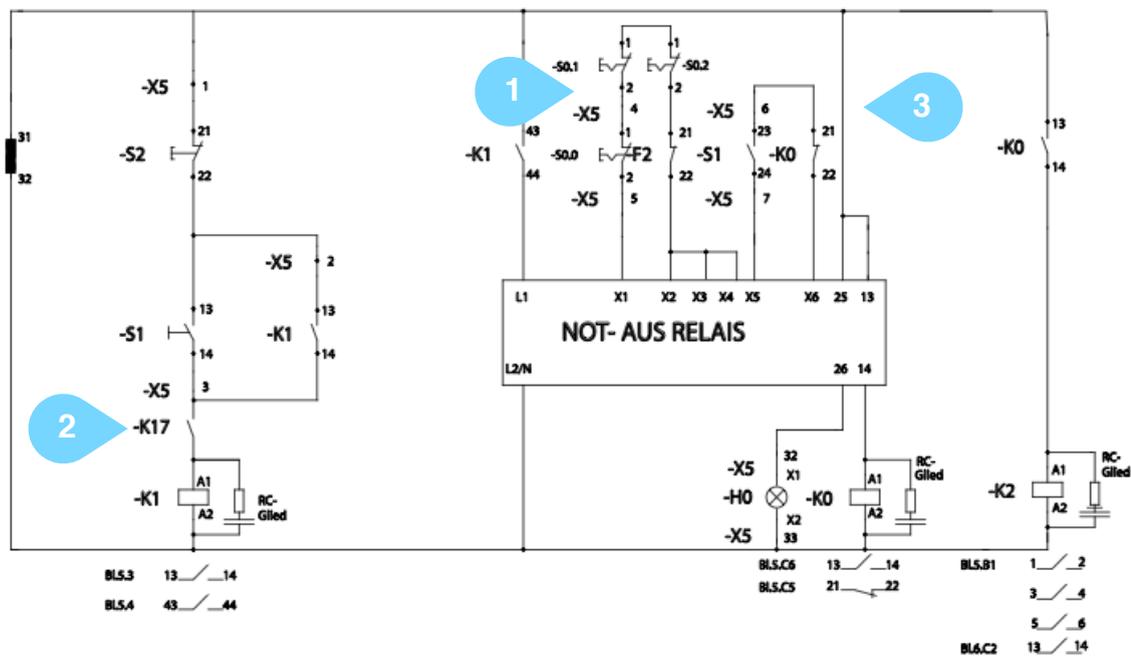


Abbildung 4.1: Schema der Sicherheitsrelais

## 4.1 Vorgenommene Änderungen

Um das Verhalten der Anlage zu verbessern, werden die folgenden Änderungen vorgenommen :

- 24V Netzteil wird direkt aus dem Hauptschalter versorgt
- Versorgung der SPS direkt aus dem 24V Netzteil
- Montage eines Überwachungskontaktes für das Sicherheitsrelais
- Änderung der Versorgung der Störungsleuchte des Sicherheitsrelais
- Montage eines Kontaktes um das Sicherheitsrelais mittels SPS auszuschalten

### 24V Netzteil wird direkt aus dem Hauptschalter versorgt

Das 24V Netzteil ist direkt nach dem Hauptschalter mit einem Leistungsschalter verbunden. Dies bedeutet, dass die Gleichspannungsversorgung ständig gewährleistet wird.

Die Nummer 1 in Abbildung 4.2 zeigt diese Modifikation.

### Versorgung der SPS direkt aus dem 24V Netzteil

Früher war der SPS eingeschaltet nur wenn das Sicherheitsrelais eingeschaltet war. Um immer über den Status der Ein- und Ausgänge zu verfügen, der Remote-Kontakt der SPS wird mit der 24V Spannungsversorgung versorgt.

Die Nummer 2 auf die Abbildung 4.2 zeigt die Änderung :

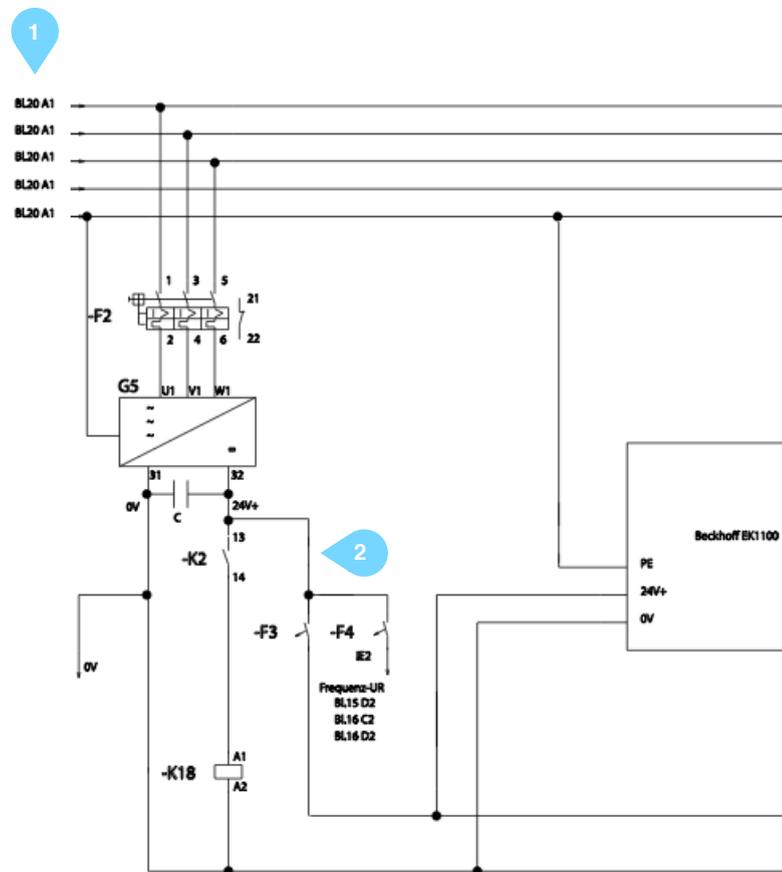


Abbildung 4.2: 24V Versorgung der SPS (siehe Anhang U, Blatt 5, D1)

### Montage eines Überwachungskontaktes für das Sicherheitsrelais

Um den Status des Sicherheitsrelais einzulesen, wird ein zusätzlicher Hilfskontakt auf das Relais -K2 gesteckt. Das Relais -K2 wird von Relais -K0 angesteuert.

Mit diesem Kontakt kann die SPS den Zustand des Sicherheitsrelais abfragen und reagieren.

### **Änderung der Versorgung der Störungsleuchte des Sicherheitsrelais**

Früher war die Störungsleuchte nur im Betrieb wenn das Sicherheitsrelais eingeschaltet war. Mit dieser Modifikation kann der Status des Sicherheitsrelais immer angezeigt werden.

Die Nummer 3 in der Abbildung 4.1 zeigt diese Modifikation.

### **Montage eines Kontaktes um das Sicherheitsrelais mittels SPS auszuschalten**

Der SPS steuert das Relais -K17. Ein Kontakt des Relais ermöglicht die Versorgung des Relais -K1, welches das Sicherheitsrelais versorgt. Dieser Kontakt ist geöffnet, solange die SPS nicht alle Bedingungen für die Sicherheit erfüllt.

Die Nummer 2 auf dem Schema 4.1 zeigt die Änderung.

# 5

## Programmierung

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Funktion des Steuer-Programms erläutert. Es besitzt eine übersichtliche Struktur in der leicht Erweiterungen implementiert werden können.

#### 5.1.1 Allgemeine Erklärung

Das Programm definiert die Funktionsweise der Anlage. Die Anlage soll im Handbetrieb und im Autobetrieb funktionieren. Zusätzlich sollen Schutzfunktionen implementiert werden.

Eine GEMMA Analyse (siehe Kap. 5.1.2) wird verwendet um die genannten Betriebsarten zu strukturieren.

Das Programm ist in , das Programm der Firma Beckhoff, TwinCat PCL<sup>1</sup> geschrieben und ist voll kompatibel mit der DIN EN 61131-3<sup>2</sup>.

Die Entwicklung ist in verschiedene Schritte unterteilt :

1. Analyse der Funktionsweise und die Sicherheit
2. GEMMA Analyse
3. GMMA Gültigkeitserklärung
4. Struktogramm für jede Betriebsart
5. Definition der Variablen
6. Programmierung
7. Test

Es handelt sich hierbei um eine bereits bestehende Anlage. Diese wurde bereits in Kapitel 2 detailliert beschrieben. Die einzigen Gefahren sind die Überströme in dem Generator bzw. in dem Antrieb und die Synchronisierung zwischen beiden. Im Kapitel 4 werden die Änderungen bezüglich der Sicherheit erläutert.

---

<sup>1</sup>Beckhoff [1]

<sup>2</sup>Normen für die Grundlagen der SPS Programmierung

Jeder Teil des Programms wird nachfolgend im Detail erklärt.

### 5.1.2 GEMMA Analyse

Die GEMMA Analyse<sup>3</sup> ist eine grafische Analyse der Betriebsarten einer Anlage. Ein vorgegebenes Modell (Abb. 5.1) zeigt alle möglichen Betriebszustände für eine beliebige Anlage. Diese sollen nach erfolgreicher Auslegung die Anlage komplett überwachen und kontrollieren.

Die Zustände sind in vier Gruppen unterteilt :

- Ohne Stromversorgung
- Stillstände
- Störungszustände
- Normale Betriebszustände

Die Abbildung 5.1 zeigt die allgemeine GEMMA Struktur:

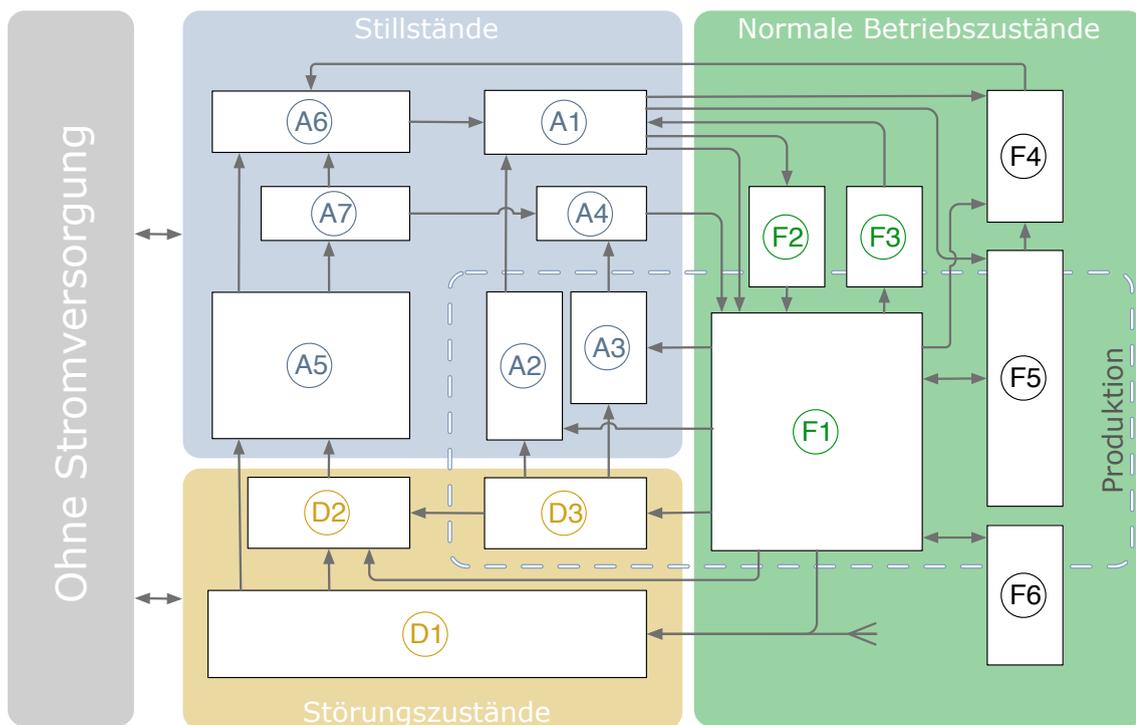


Abbildung 5.1: Allgemeine GEMMA Struktur

<sup>3</sup>Orientierungshilfe der Störung- Betrieb- und Stillstandarten, siehe Marcuard [8], Kap. 9.4

Beispielhaft werden im Folgenden einige Zustände genannt:

**F1** Normalbetrieb

**F4** Handbetrieb

**A1** Initialzustand

**A3** Stillstand am Ende des Zyklus angefordert

**D1** Not-Aus

**D3** Produktion trotz Störung

Sobald eine GEMMA-Analyse abgeschlossen ist, ändert sich sein Name in GMMA und kann diese in die SPS programmiert werden.

Um alle Zustände kennen zu lernen und mehrere Informationen über die GEMMA Analyse zu erfahren, siehe *Marcuard [8], Kap. 9.4.*

## 5.2 Software Beschreibung

TwinCat ist eine Soft-SPS und eine Entwicklungs-Software der Firma Beckhoff<sup>4</sup>. Dieses System ist in zwei verschiedenen Software-Programmen unterteilt :

- TwinCat System Manager
- TwinCat PLC

*TwinCat System Manager* ist ein Konfigurationswerkzeug. Das Konzept von Beckhoff ist das Folgende : Das Programm kann offline entwickelt, die Hardware konfiguriert, und letztlich die Variablen zwischen beiden Systemen verknüpft werden.

Das Steuerprogramm kann in *TwinCat PLC* entwickelt werden und die Hardware sowie die Konfiguration werden im *TwinACT System Manager* verknüpft.

Die Abbildung 5.2 zeigt die wichtigen Funktionen des *TwinCat System Manager* :

---

<sup>4</sup>Beckhoff [1]

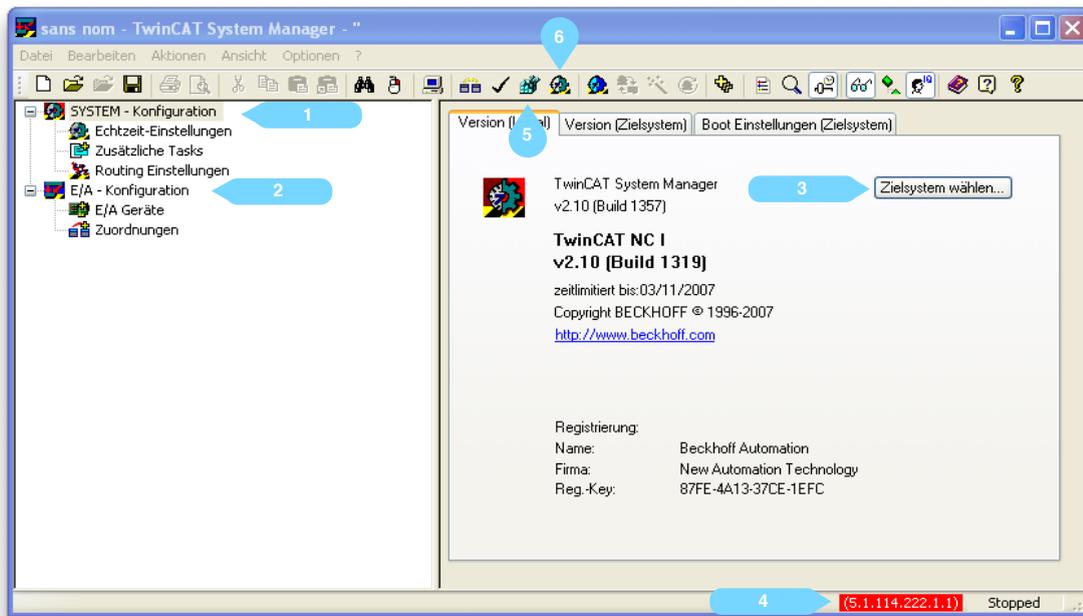


Abbildung 5.2: Hauptfunktionen des TwinCat System Manager

1. Konfigurationsmenü des Zielsystems (lokal oder dezentral, Zykluszeit, SPS Programm, usw.)
2. Konfigurationsmenü der Ein- und Ausgänge (EtherCat, Klemmen, usw.)
3. Auswahl des Zielsystems
4. Visualisierung des Zielsystems
5. Aktivieren der Konfiguration
6. Starten des Zielsystems

Die Abbildung 5.3 zeigt das Hauptfenster des *TwinCat PLC* :

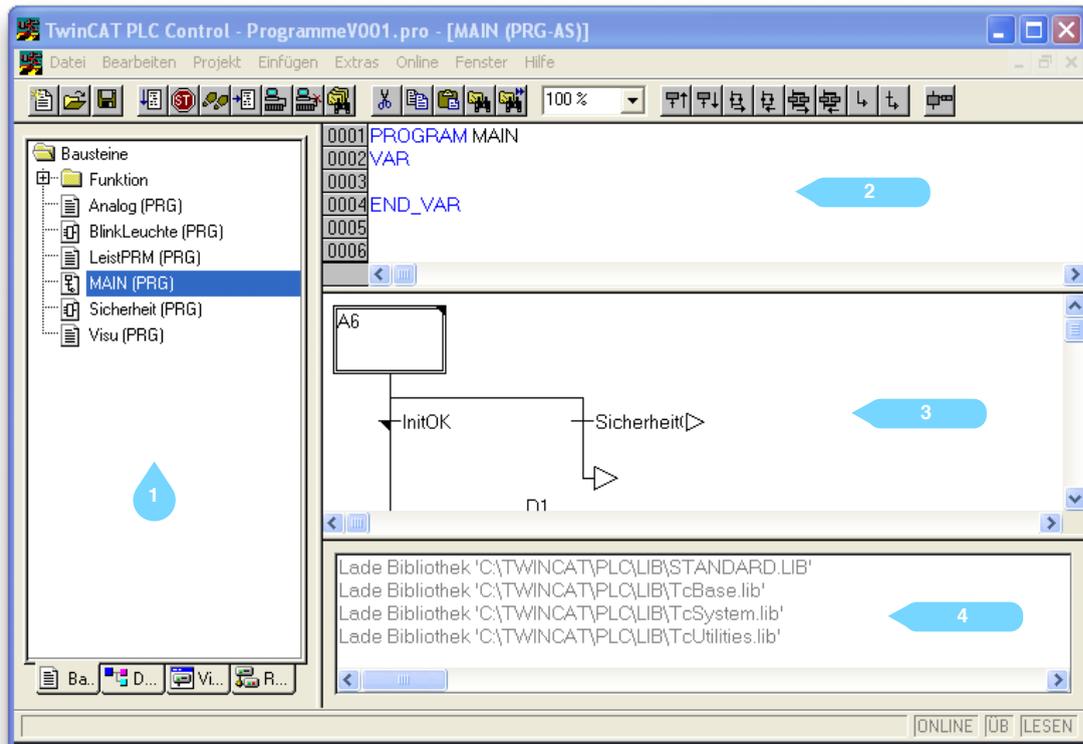


Abbildung 5.3: Hauptfelder des TwinCat PLC

1. In diesem Feld stehen die verschiedenen Programme und Funktionen sowie die Parameter der SPS.
2. In diesem Feld werden die Variablen deklariert.
3. Hier werden die verschiedenen Funktionen programmiert. Nach DIN EN-61131-3 kann in Anweisungsliste, Kontaktplan, Funktionsbaustein-Sprache, Ablaufsprache und im strukturierten Text programmiert werden.
4. Eine Log-Datei ist verfügbar um die Fehler zu finden und verschiedene andere Informationen zu lesen.

Die Konfiguration wird in Kapitel 5.3.2 erklärt.



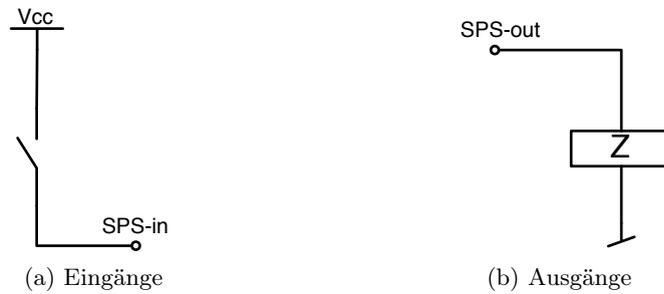


Abbildung 5.5: Verbindung der digitalen Ein- und Ausgänge

Es werden für die digitale I/O's die Klemmen EL1008 und EL2008 benutzt (siehe Anhang A).

### Verbindung der analogen Ein- Ausgänge

Die Signale sind bipolar und haben eine Amplitude von 10V.

Die analogen Ein- und Ausgänge der Klemmen sind differentiell. Das bedeutet, dass sie standardmäßig nicht an der Masse referenzieren. Da in der Anlage die Masseverbindung Bestandteil der Signalübertragung war, wurden alle negativen Potentiale der Ein- Ausgänge mit Masse verbunden um den vorhandenen Kabelbaum weiterhin zu nutzen. Die Abbildung 5.6 zeigt die Modifikation:



Abbildung 5.6: Verbindung der analogen Ein- und Ausgänge

Es werden für die analoge I/O's die Klemmen EL4132 und EL3102 benutzt (siehe Anhang A).

### Leistungsmessgerät

Das Leistungsmessgerät<sup>6</sup> wird wie in Abbildung 5.7 angeschlossen.

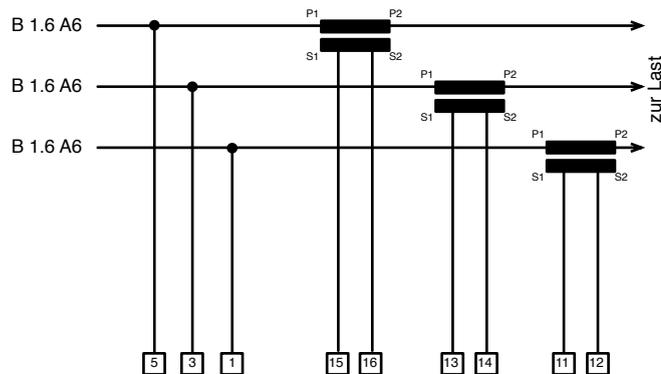


Abbildung 5.7: Verbindung des Leistungsmessgerätes mit dem Netz

Dieses Messgerät zeigt folgende Werte an :

- Wirkleistung
- Blindleistung
- Scheinleistung
- Leistungsfaktor

Diese Signale sind zwischen 0 und 4 Volt. Die Verstärkung wird folgendermaßen ausgelegt :

- gain  $P_{tot} = 2510$
- gain  $Q_{tot} = 2145$
- gain  $S_{tot} = 2600$
- gain  $P_f = 0.5$

Die analoge Verbindung mit der SPS (Eingänge 406 bis 409) sind an Leistungsmessgerät in Abbildung 5.8 dargestellt :

---

<sup>6</sup>Model PM380 der Firma Zes, siehe Timo Lütke-Verspohl [12], Kap. 5.7.2

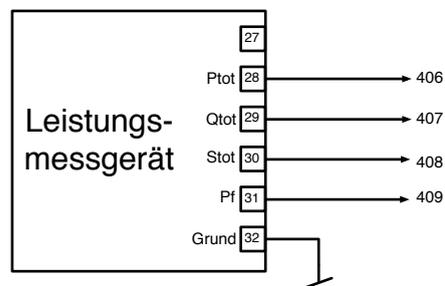


Abbildung 5.8: Verbindung der Analogausgänge des Leistungsmessgerätes

Das Programm berechnet diese Werte autark. Zur Kontrolle können diese Werte auch an der Anzeige im Generatorfeld abgelesen werden, da sie ohnehin Bestandteil der Anlage war. In der SPS selbst werden die in Kapitel 5.5.7 gezeigten Funktion zu Berechnung ausgeführt.

### Siemens MasterDrive

Die folgenden Modifikationen werden auf der Steuerung der Simens MasterDrive<sup>7</sup> vorgenommen. Der Drehmomentsollwert kommt jetzt aus der SPS oder dem Potentiometer. Das Relais -K13 wechselt die Quelle des Signals und wird mit dem Signal 301 der SPS gesteuert. Die Abbildung 5.9 zeigt die verschiedenen Verbindungen.

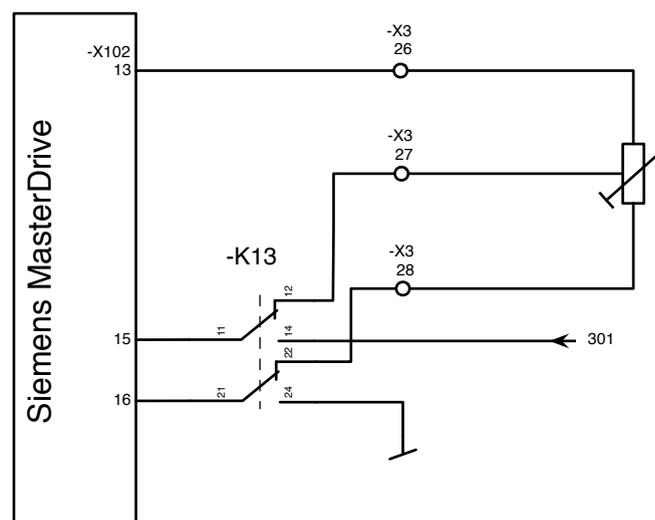


Abbildung 5.9: Siemens Master Drive Sollwert Vorgabe

<sup>7</sup>Model 6SE6021-0EA61

### Generator Strommessung

Um die Ströme des Ständer und des Rotors des Generators zu messen, werden LEM Stromwandler<sup>8</sup> benutzt. Das Ausgangssignal ist  $\pm 7.5V$  bei einem Strom von  $\pm 12.5A$ . Die Abbildung 5.10 zeigt den Messaufbau.

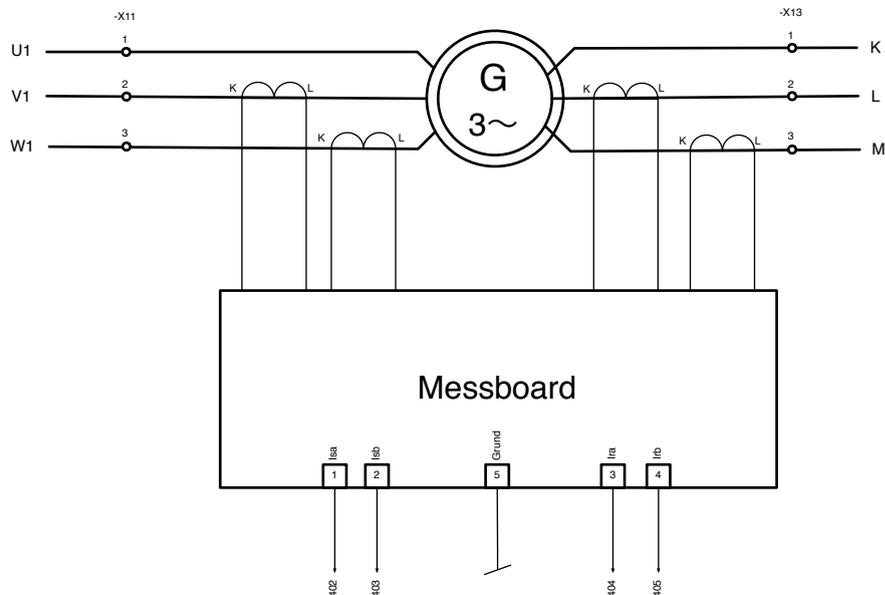


Abbildung 5.10: Generator Strommessung

Die Analogsignale sind direkt mit der SPS verbunden (Eingänge 402 bis 405).

### 5.3.2 Software

Der *TwinCat System Manager* dient zur Konfiguration.

Zuerst muss das Zielsystem identifiziert werden. Es kann eine Soft-SPS direkt auf dem Rechner oder ein CX System mit *Windows XP Embedded* verwendet werden. Dann muss ein SPS Projekt ausgewählt werden. Es müssen auch die Klemmen am EtherCat-Bus gesucht, konfiguriert und schließlich die Variablen zwischen den Ein- Ausgängen mit denen des SPS Projektes verknüpft werden.

Die Nummern in der Erklärung, Beispielsweise **(1)**, korrespondieren mit den blauen Nummern in Abbildungen.

<sup>8</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Kap. 5.7.3

### Auswahl des Zielsystems

Klicken Sie auf die *Zielsystem wählen...* (2) Taste im Fenster *Allgemein* in der *Echtzeit-Einstellung* Sektion (1).

Dann wird sich ein Fenster mit den verfügbaren Zielsystemen öffnen. In der Abbildung 5.11 sehen wir das lokale System und drei andere externe Systeme.

Wählen Sie das lokale System aus (3) und klicken Sie *OK* (4). Siehe Abbildung 5.11.

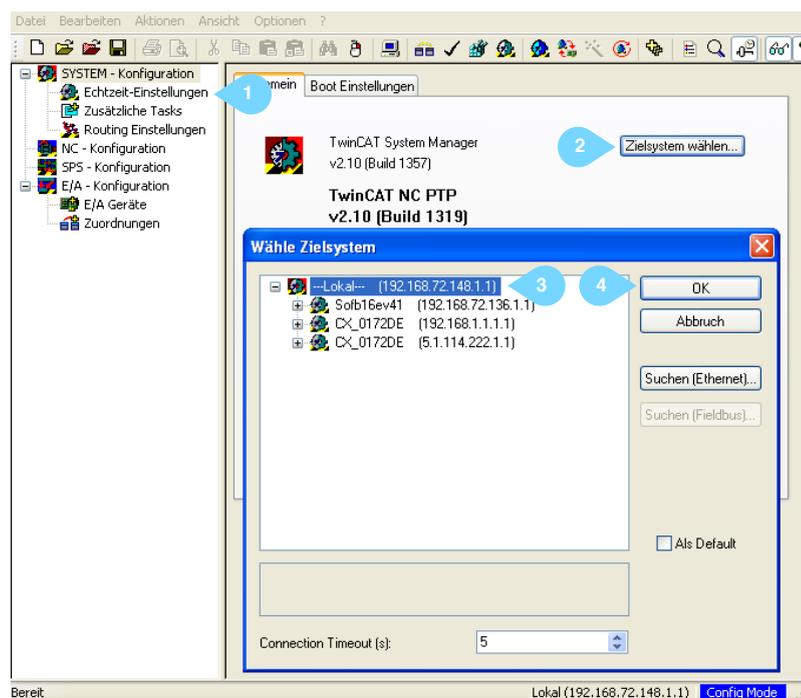


Abbildung 5.11: Auswahl des Zielsystems

Jetzt können Sie das Zielsystem konfigurieren. Zuerst prüfen Sie ob das Zielsystem tatsächlich als lokales System (1) gewählt ist. Anschließend wählen Sie ein Basiszeit von  $100\mu s$  und einen Router Speicher von 4096 kB aus, damit genug Speicher für die I/O Daten verfügbar ist. Die minimale Zykluszeit ist  $50\mu s$ . Siehe Abbildung 5.12.

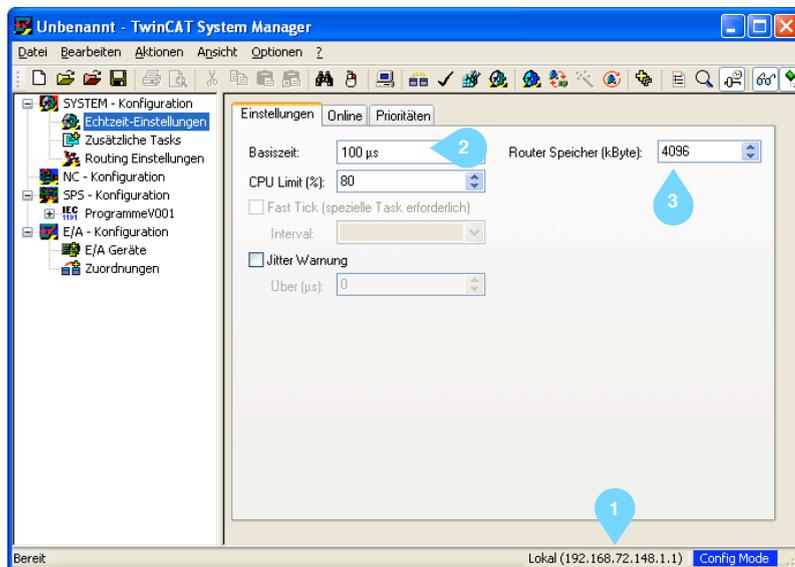


Abbildung 5.12: Eigenschaften des Zielsystems

### SPS Projekt

Wenn ein Programm mit *TwinCat PLC* geschrieben und kompiliert wurde, wird eine *.TPY* Datei erstellt. Diese Datei enthält die Beschreibungen (Name, Type, usw.) der Variablen. *TwinCat System Manager* verwendet diese Daten um die Variablen zwischen der Hardware und dem SPS-Programm zu verknüpfen.

Ein SPS-Projekt wird folgendermaßen konfiguriert. Rechts-Klick auf die *SPS-Konfiguration* (1) und wählen Sie *SPS Projekt Anfügen* (2). Siehe Abbildung 5.13.



Abbildung 5.13: SPS Projekt anfügen

Wählen Sie ein Projekt aus (1) und klicken Sie *OK* (2). Siehe Abbildung 5.14.

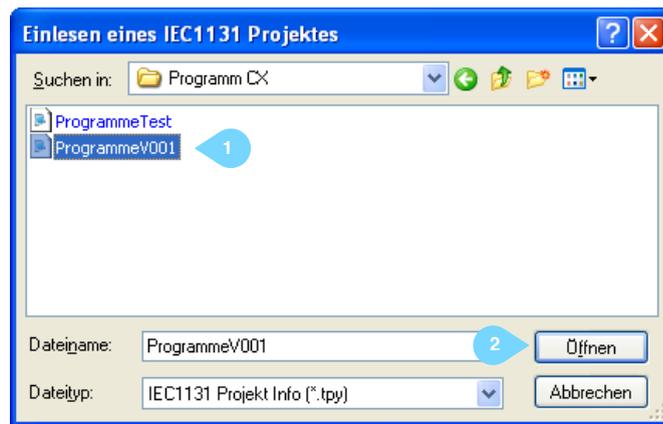


Abbildung 5.14: Auswahl des SPS-Projekts

Jetzt ist das SPS-Projekt konfiguriert.

Es gibt die Ein- und Ausgänge (1) und (2) in Abbildung 5.15 und ein Fenster mit den aktuellen Werten der Variablen. Diese Variablen stammen aus dem SPS-Programm.

Die Struktur wird gespeichert. Siehe Abbildung 5.15.

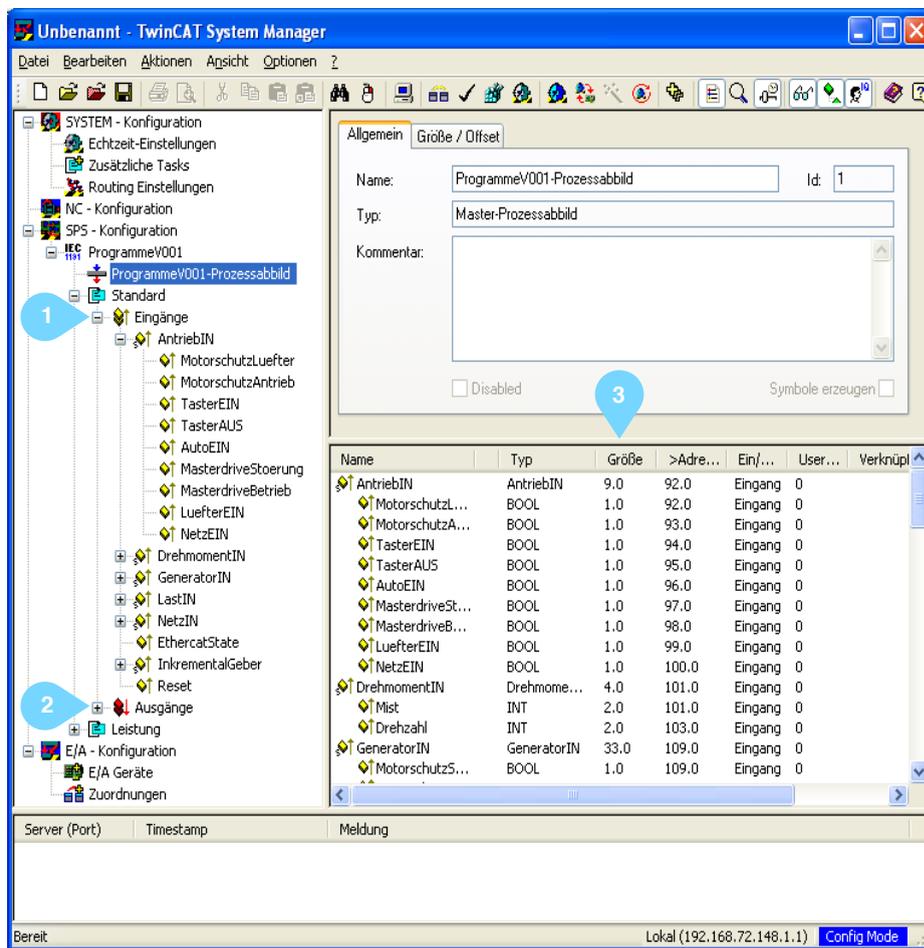


Abbildung 5.15: Beschreibung des SPS-Projektes

## EtherCat und Boxen

Die Konfiguration der Boxen wird vom System automatisch vorgenommen.

Um die Geräte zu suchen, Rechts-Klick auf *E/A Konfiguration* (1) und dann *Geräte suchen* (2) in die Abbildung 5.16 auswählen. Siehe Abbildung 5.16.



Abbildung 5.16: Geräte suchen

Jetzt sucht das System die verschiedenen EtherCat Geräte. Dann zeigt das System die gefundenen Geräte an. Wählen Sie alle Geräte aus und klicken Sie *OK* (1) in die Abbildung 5.17.



Abbildung 5.17: EtherCat Geräte gefunden

Jetzt fragt das System ob sie neue Boxen suchen wollen. Klicken Sie auf *Ja* (1) in die Abbildung 5.18.



Abbildung 5.18: Boxen suchen

Die Boxen werden an den EtherCat Bus gekoppelt. Die Abbildung 5.19 zeigt die lokale Ethernet Karte (1), die externe Karte (2), die erste Klemme EK1100 (3) und anschließend alle anderen klemmen (4). Die Statusvariablen sind verfügbar für alle EtherCat-Boxen (State, Net-ID Nummer, usw.). Für jede Klemme gibt es Ein- und Ausgangsvariablen. Siehe Abbildung 5.19.

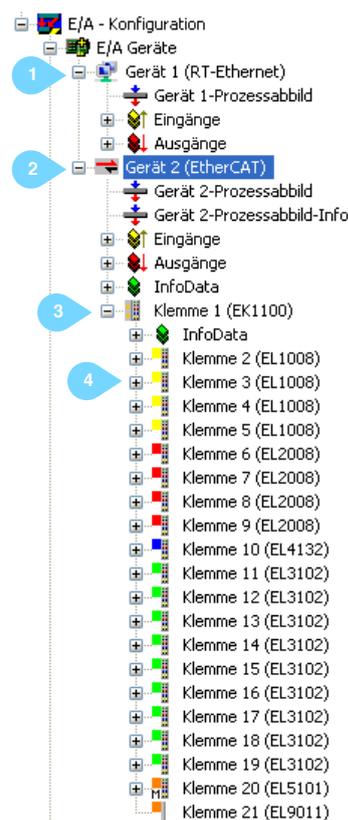


Abbildung 5.19: Liste der Geräte und der Boxen

Jetzt sind die Variablen der Klemmen und die Variablen des SPS-Projekts verfügbar.

## Variablen Verknüpfung

Jetzt müssen wir jede Variable des SPS-Projekts mit einer Variable verknüpfen. Diese Verknüpfung ermöglicht die Verbindung der Ein- Ausgänge zwischen den Bus-Klemmen und dem Programm. Ohne diesen Schritt kann das Programm nicht mit der Außenwelt kommunizieren.

Zunächst Rechts-Klick auf eine Ein- oder Ausgangsvariable einer Klemme (1) und dann *Verknüpfung ändern* (2) in die Abbildung 5.20 auswählen, um eine Verknüpfung vorzunehmen.



Abbildung 5.20: Verknüpfung ändern

Ein Fenster mit verfügbaren Variablen öffnet sich. Hier kann die richtige Variable ausgewählt werden. Siehe Abbildung 5.21

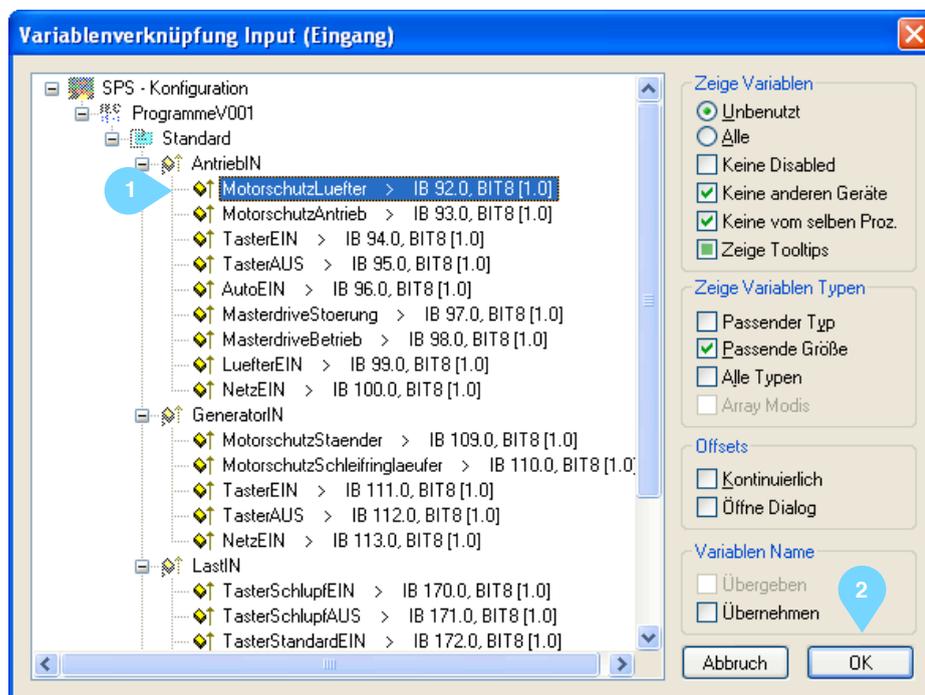


Abbildung 5.21: Variablen Verknüpfung

### Kompilierung eines Projekts unter TwinCat PLC

Um das Projekt zu kompilieren muss im das Hauptmenü auf *Projekt* und *Übersetzen* geklickt oder drücken Sie auf die Tasten *Strg-F8* gedrückt werden.

Ein Blick in das Log-Fenster zeigt Informationen möglicher Fehler oder den Erfolg der Kompilierung.

### Einloggen auf der SPS

Um die Werte der Variablen zu visualisieren oder zu debuggen muss im SPS eingeloggt sein.

Deshalb wird zuerst ein Zielsystem ausgewählt. Klicken Sie in das Hauptmenü auf *Online* und auf *Auswahl des Zielsystems*. Dann wählen Sie das Zielsystem das im *TwinCat System Manager* konfiguriert wurde aus. Die Abbildung 5.22 zeigt diesen Schritt.

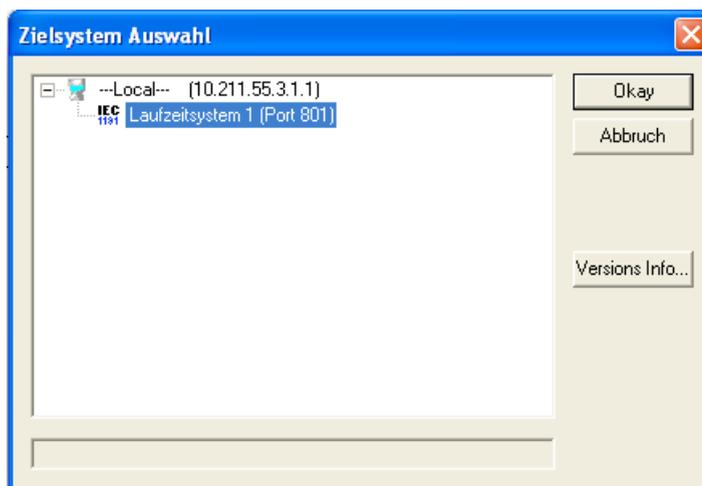


Abbildung 5.22: Auswahl des Zielsystems

### Aufbau eines Boot-Projekts

Wenn das Projekt fertig ist, kann ein Boot-Projekt erstellt werden. Dieses Projekt ermöglicht ein Auto-Start des Systems.

Zuerst wird ein Boot-Projekt in *TwinCat PLC* kompiliert. In dem Hauptmenü muss auf *Online* und *Erzeugung eines Bootprojektes* geklickt werden. Man muss eingeloggt sein, um diese Schritte durchführen zu können.

Diese Operation erstellt ein Ordner mit eine spezifischen Datei für die SPS und schreibt die Hardware-Konfiguration in den Speicher der SPS.

Dann wird der Auto-Start der SPS in den Eigenschaften des *TwinCat System Manager* konfiguriert. Zuerst wird das Eigenschaften-Fenster geöffnet und im Feld *PLC* das Projekt-Verzeichnis (1) gewählt. Die Abbildung 5.23 zeigt das Feld *PLC*.

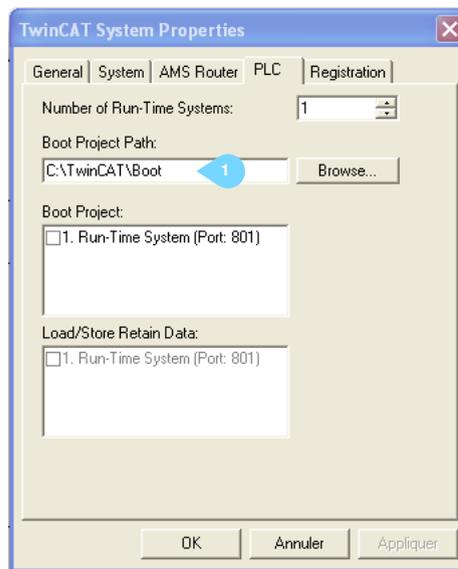


Abbildung 5.23: Projekt-Verzeichnis des Boot-Projekts

Öffnen Sie das Feld *System* in den *PLC-Eigenschaften* und wählen Sie *AutoBoot : Enable*. Die Abbildung 5.24 zeigt diese Auswahl (1).

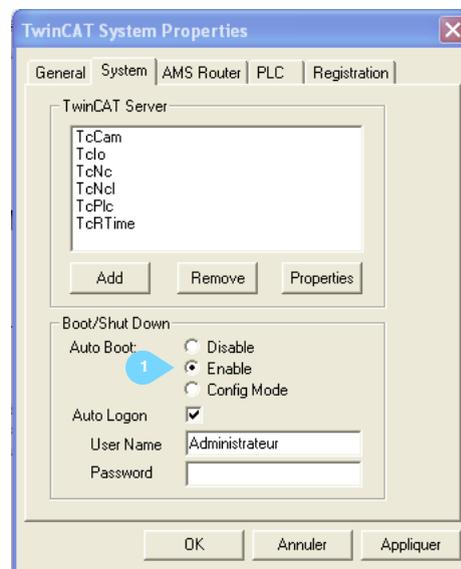


Abbildung 5.24: Auto-Start der PLC

Jetzt wird die PLC mit dem Projekt gestartet. Die Anlage fährt nun selbständig in den Bereitschaftsstatus.

## 5.4 GEMMA Analyse

Die GEMMA Analyse<sup>9</sup> wird in diesem Fall nur mit den Zuständen, die in Abbildung 5.25 zu sehen sind, verwendet.

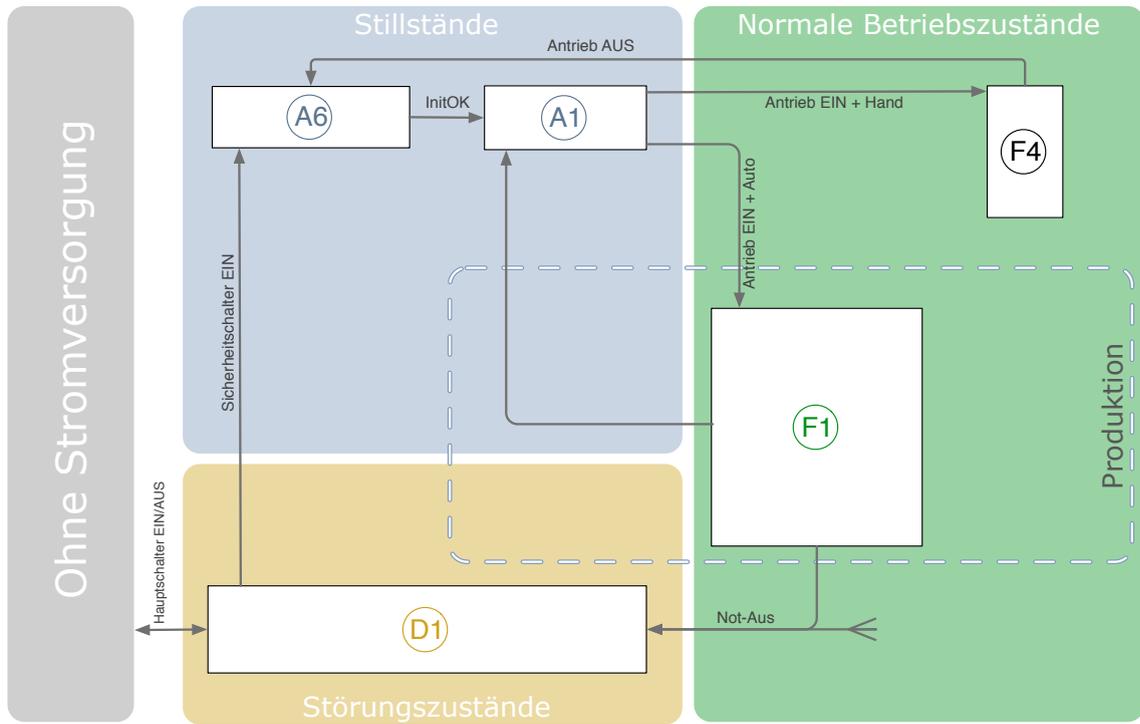


Abbildung 5.25: GEMMA Struktur der Software

Liste der Zustände:

- A6** Fahrt in den Initialzustand (siehe 5.4.1)
- A1** Initialzustand (siehe 5.4.2)
- F1** Normalbetrieb (siehe 5.4.3)
- F4** Handbetrieb (siehe 5.4.4)
- D1** Not-Aus (siehe 5.4.5)

<sup>9</sup>siehe Kap. 5.1.2

### 5.4.1 A6-Fahrt in den Initialzustand

In dieser Betriebsart wird die Anlage initialisiert. Der Siemens MasterDrive<sup>10</sup> ist eingeschaltet und die Variablen sind initialisiert. Während die Initialisierung läuft, werden die Störungsleuchten eingeschaltet. Wenn der Siemens MasterDrive initialisiert ist, geht die Steuerung weiter in den Initialzustand A1.

### 5.4.2 A1-Initialzustand

Dieser Zustand ist ein Wartezustand. Die Anlage ist initialisiert und wartet auf eine Handlung des Benutzers. Man kann Auto- oder Handbetrieb auswählen.

Um den Autobetrieb zu wählen, muss der *Auto/Hand* Taster auf *Auto* gestellt werden und der Taster *Antrieb EIN* gedrückt werden. Um den Handbetrieb zu wählen, wird der *Auto/Hand* Taster auf *Hand* gestellt und eine der beiden Taster der Betriebsarten muss gedrückt werden.

Die grüne Leuchte soll eingeschaltet sein. Für den Handbetrieb blinken die Signalleuchten *Schlupfbetrieb EIN* und *Standardbetrieb EIN* und für den Autobetrieb blinkt die Leuchte *Antrieb EIN*.

### 5.4.3 F1-Normalbetrieb

Der Normalbetrieb ist der so genannte Autobetrieb. In diesem Zustand wird die Anlage automatisch von der SPS gesteuert. Die Synchronisation des Antriebs und des Generators ist automatisiert. Dann wird das Drehmoment durch das mathematische Modell errechnet. Nach einer Simulation wird der Generator ausgeschaltet und der Antrieb gestoppt. Die Leuchten zeigen jederzeit den Betriebszustand der Anlage an.

Wenn die Simulation beendet ist fährt die Anlage in den A6-Initialzustand zurück.

### 5.4.4 F4-Handbetrieb

Im Handbetrieb kann alles manuell gesteuert werden. Allerdings gibt es viele Sicherheitstests, um die Anlage nicht zu gefährden. Zuerst muss die Betriebsart ausgewählt werden. Dann kann der Antrieb eingeschaltet werden um den Generator auf  $1500 \text{ U/min}$  zu beschleunigen. Die Drehzahl kann mit dem Potentiometer über das Drehmoment geregelt werden. Ist die Drehzahl erreicht kann der Generator auf das Netz geschaltet werden.

Danach wird erst der Generator und dann der Antrieb wieder ausgeschaltet.

---

<sup>10</sup>Timo Lütke-Verspohl [12], Kap. 6

### 5.4.5 D1-Not-Aus

Der Not-Aus Zustand kann in jedem Zustand betätigt werden.

In dieser Betriebsart befindet sich die Anlage in einem definierten sicheren Zustand. Die Leistungsversorgung wird ausgeschaltet und kann nicht mehr eingeschaltet werden bis der Benutzer den Taster *Netzeinspeisung AUS* gedrückt hat (Reset Taster).

## 5.5 Programm

Das Programm wurde in verschiedenen Sprachen geschrieben (EN 61131-3). Das Hauptprogramm ist in der Ablaufsprache (AS) geschrieben, damit die GEMMA Struktur in sequentiellen Ablauf abgebildet werden konnte. Die Funktionsweisen innerhalb jedes Betriebszustandes wurden in Structured Text (ST) geschrieben. Diese Darstellung ist mächtiger, flexibler und einfacher zu programmieren.

Für den Betrieb der Anlage gibt es mehrere Programme die gleichzeitig laufen. Die Abbildung 5.26 zeigt die Liste der Programme.

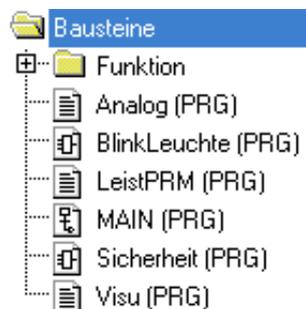


Abbildung 5.26: Liste der Programme in TwinCat PLC

**Hauptprogramm MAIN** Dieses Programm bildet GEMMA Struktur ab. (siehe 5.5.2)

**Sicherheit** Dieses Programm kontrolliert die Sicherheit der Anlage. (siehe 5.5.3)

**Analog** Dieses Programm wandelt die analogen Ein- und Ausgangssignale um (skalieren, filtern). (siehe 5.5.4)

**BlinkLeuchten** Dieses Programm wird benutzt, um die Leuchten zu steuern. (siehe 5.5.5)

**Visu** Dieses Programm realisiert die Verbindung zwischen den Variablen und ZenOn (siehe Kap. 5.5.6).

Nun wird die Funktionsweise des Programms erklärt. Das Programm ist im Anhang und enthält viele Kommentare.

### 5.5.1 Struktur der Variablen

Um die Variablen zu organisieren sind verschiedene Strukturen zu unterscheiden. Eine Struktur ist eine Gruppe von Variablen mit einer gemeinsamen Beziehung. Beispielsweise alle Variablen für die Eingänge des Feldes *Netzeinspeisung* können in einer Struktur gesammelt werden.

Die Abbildung 5.27 zeigt einen Teil der Liste der Strukturen und dessen Inhalt *NetzIn*:

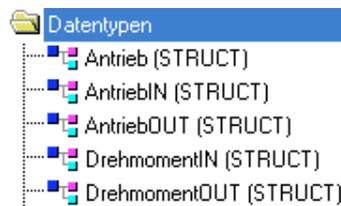


Abbildung 5.27: Teil der Liste der Strukturen

Der Inhalt dieser Struktur (Deklaration der Variablen) ist nachfolgen zu sehen.

```

1 TYPE NetzIN :
2 STRUCT
3
4 SichRelAUS           :BOOL;      (*123   Sicherheitrelais "AUS"*)
5
6 END_STRUCT
7 END_TYPE
    
```

Diese Struktur definiert eine Variable *SichRelAus* vom Type *Boolean*.

Eine Struktur beschreibt Objekte und deren Variablentypen. Es können mehrere Instanzen erstellt werden. In diesem Programm sind die Instanzen als globale Variable definiert. Um ein Instanz zu definieren ist der folgende Code in das Fenster *Global-Variablen* zu hinterlegen :

```

1 AntriebIN AT%I*      :AntriebIN;
    
```

Der Ausdruck *AntriebIN* ist die Name der Instanz. Der Ausdruck *AT%I* definiert, dass die Variablen in dieser Struktur Eingänge sind (Schreiben *AT%Q* für Ausgänge) und der

letzte *AntriebIN* ist der Type der Struktur.

Für jedes Feld gibt es drei verschiedene Strukturen :

- Eine für die Eingänge : *FeldnameIN*
- Eine für die Ausgänge : *FeldnameOUT*
- Eine für die internen Variablen : *Feldname*

Beispielsweise für das Netzeinspeisungsfeld wie in Abbildung 5.28:

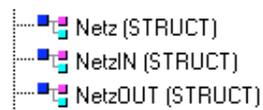


Abbildung 5.28: Strukturen für das Netzeinspeisungsfeld

### 5.5.2 Hauptprogramm

Mit der GMMA Struktur aus dem Kapitel 5.4 ist das Hauptprogramm in Ablaufsprache (AS) abgebildet. Hierbei handelt es sich nicht um ein Grafcet<sup>11</sup>, da auch andere Programmtypen benutzt werden.

In jedem Schritt und jeder Transition gibt es ein Programm in strukturiertem Text (ST). Das Hauptprogramm hat jederzeit Vorrang vor allen Unterprogrammen.

Das Hauptprogramm ist in Abbildung 5.29 dargestellt.

---

<sup>11</sup>GRAFCET (DIN EN 60 848)

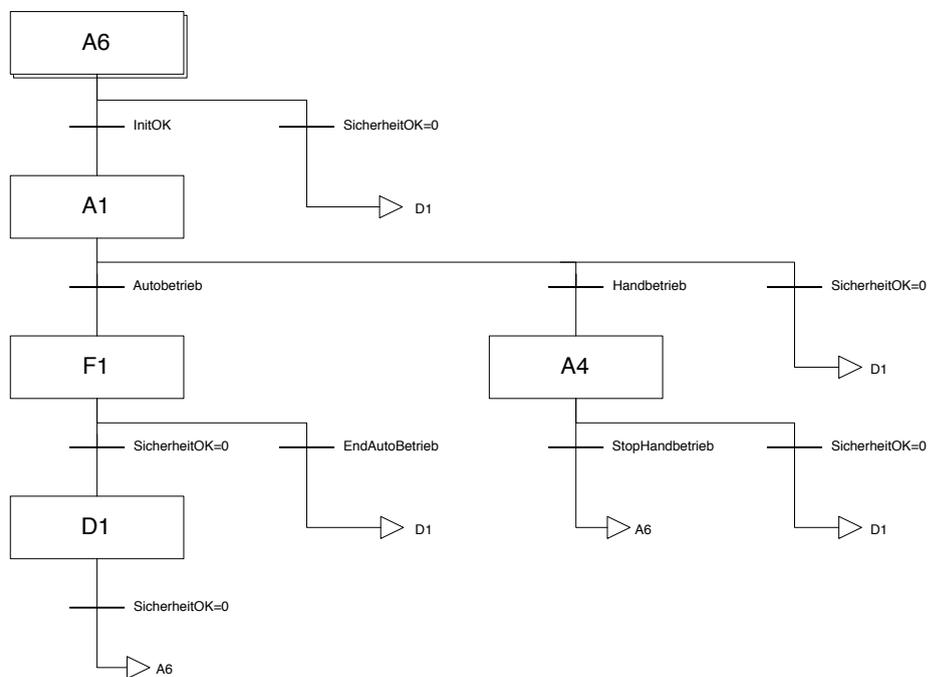


Abbildung 5.29: Hauptprogramm

Nachfolgend ist der Inhalt einer Transition (zwischen A6 und A1) zu sehen :

```

1 AntriebIN.MasterdriveStoerung AND RealValues.DrehzahlFiltered = 0
  
```

Jeder Schritt und jede Transition wird nun erklärt.

### A6 Fahrt in den Initialzustand

Dieser Schritt initialisiert die Anlage. Es handelt sich hierbei um eine Software-Initialisierung. Zuerst werden alle Störungsleuchten und der Siemens MasterDrive eingeschaltet. Dann werden die Variablen initialisiert um die Relais anzusteuern.

Die Anlage verharrt in diesem Zustand, solange der Siemens MasterDrive nicht bereit ist.

Dieses Struktogramm der Abbildung 5.30 zeigt die Logik des Programms :

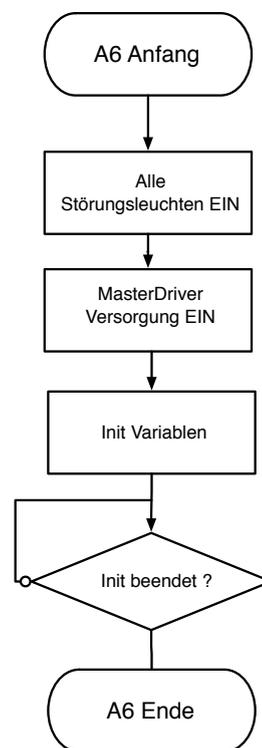


Abbildung 5.30: Struktogramm des Schrittes *A6-Fahrt in den Initialzustand*

### A1 Initialzustand

Der Initialzustand ist ein Wartezustand, indem die Anlage gestartet wird. In Abhängigkeit von der Position der Taster Auto/Hand im Feld *Antriebsmaschine* gibt es zwei unterschiedliche Funktionsweisen.

**Vorbereitung für den Autobetrieb :** In diesem Zustand wird der Simulationsanfang abgewartet. Nur die Betriebsleuchte der Antriebsmaschine blinkt. Wenn der Benutzer auf den Taster drückt *Antriebsmaschine EIN*, dann wechselt die Steuerung in den Zustand *F1 Normalbetrieb*.

**Vorbereitung für den Handbetrieb :** In diesem Zustand wird zunächst eine Betriebsart ausgewählt: Schlupfbetrieb oder Standardbetrieb. Bis der Benutzer einen Zustand wählt, blinken beide Betriebsleuchten der Betriebsarten. Wenn eine Betriebsart ausgewählt ist, kann die Antriebsmaschine eingeschaltet werden und die Betriebsleuchte der Antriebsmaschine blinkt. Nach dem Einschalten des Antriebs wechselt die Steuerung in den Zustand *A4-Handbetrieb*.

Das Struktogramm der Abbildung 5.31 zeigt die Logik des Programms.

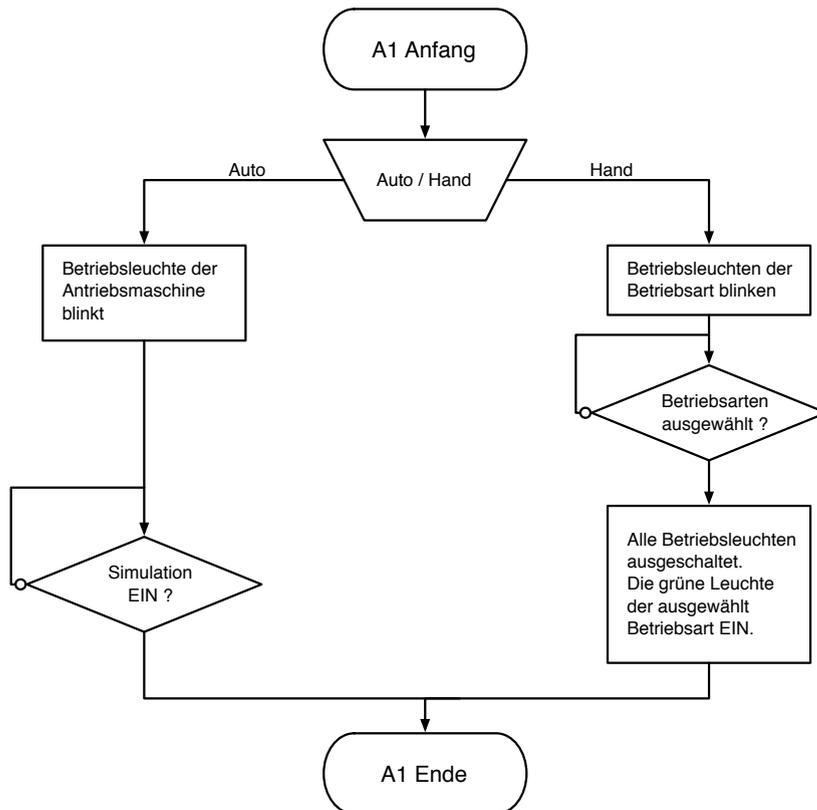


Abbildung 5.31: Struktogramm des Zustandes *A1 Initialzustand*

### F1-Normalbetrieb

Dieser Zustand wird momentan noch nicht genutzt da das mathematische Modell des WKA-Triebstranges derzeit nicht in das vorhandene Programm eingebunden ist.

### A4 Handbetrieb

Der Handbetrieb ist ein Teil des Programms, welches in Richtung Sicherheit verbessert wurde.

Im Handbetrieb wurden zusätzliche Sicherheitsfunktionen implementiert um eventuelle gefährliche Zustände auszuschließen.

Diese sind nachfolgend genannt :

- Der Generator kann nicht mit einer Abweichung von  $\pm 10 \text{min}^{-1}$  von der Nenndrehzahl synchronisiert werden.
- Der Antrieb kann nicht eingeschaltet werden, solange eine Betriebsart nicht ausgewählt wurde.
- Der Antrieb wird ausgeschaltet, wenn die Drehzahl höher als  $1800 \text{min}^{-1}$  ist.

In Handbetrieb wird alles vom Benutzer eingeschaltet. Zuerst blinkt nur die Betriebsleuchte des Antriebs. Der Benutzer muss auf den Taster *Antrieb EIN* drücken um den Antrieb einzuschalten. Der Fremdlüfter des Antriebs schaltet sich ein und der Antrieb startet. Der Benutzer kann mit dem Potentiometer den Antrieb bis  $1500 \text{min}^{-1}$  beschleunigen. Während dieser Phase blinkt die Betriebsleuchte des Generators. Dieser kann nicht eingeschaltet werden, solange die Drehzahl unter  $1500 \text{min}^{-1}$  ( $\pm 10 \text{min}^{-1}$ ) ist. Wenn diese Drehzahl erreicht ist, kann der Generator mit dem Netz synchronisiert werden (Die Betriebsleuchte des Generators bleibt eingeschaltet).

Es ist zu beachten, dass mit dem Potentiometer nur der Drehmomentsollwert eingestellt werden kann. Die Drehzahl kann nicht direkt beeinflusst werden, sobald der Generator auf das Netz geschaltet werden.

Wenn der Generator am Netz ist, kann der Drehmomentsollwert geändert werden um die Leistung zu verändern. Es kann im Motor oder im Generatorbetrieb gearbeitet werden.

Ist der Antrieb ausgeschaltet, muss gewartet werden, bis die Welle steht. Erst dann geht die Steuerung in *A6 Fahrt in Initialzustand*.

Das Struktogramm der Abbildung 5.32 zeigt die Logik des Programms :

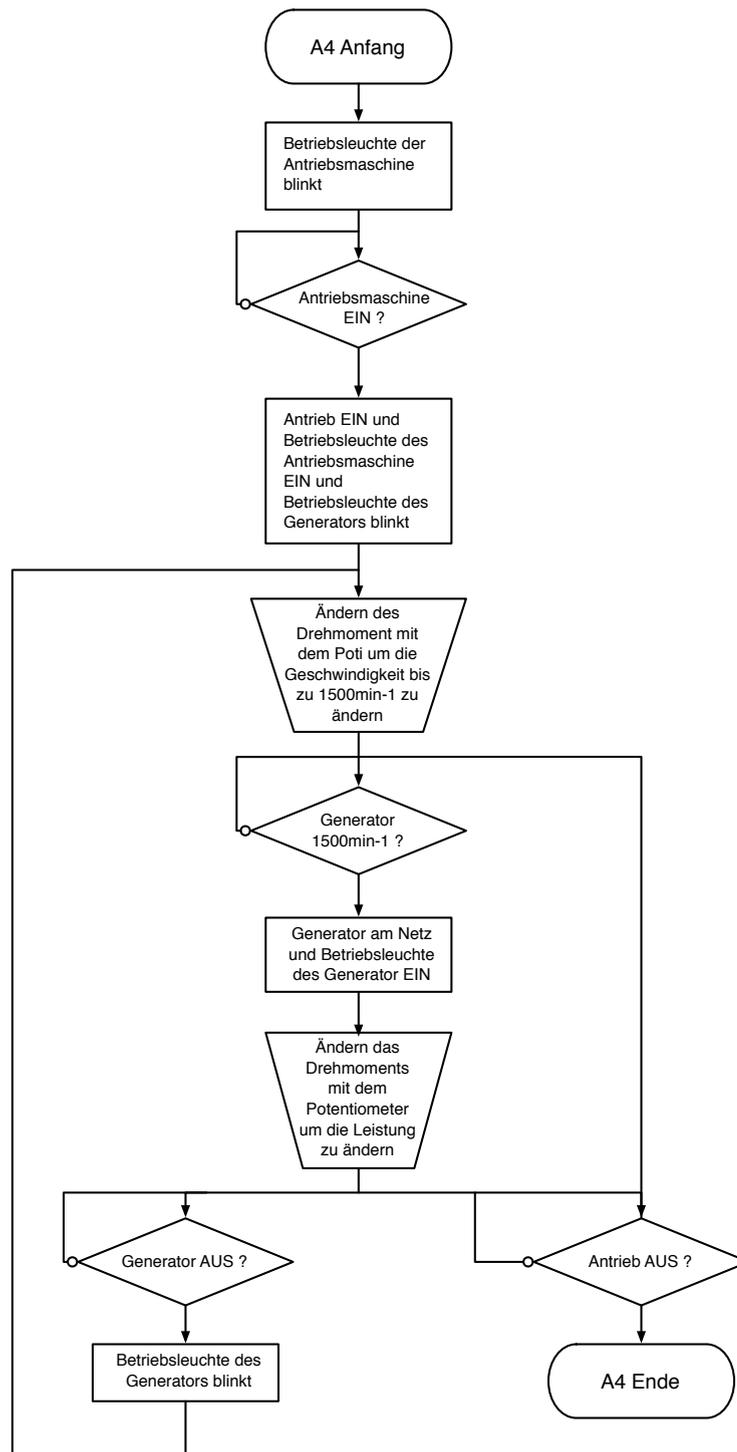


Abbildung 5.32: Struktogramm des Zustandes *A4 Handbetrieb*

### D1 Not-Aus

Im Notfall fährt die Steuerung in den Not-Aus Betrieb. Gleichzeitig wird die Stromversorgung unterbrochen und alle Störungsleuchten werden eingeschaltet. Die Welle des Antriebs und des Generators läuft im Leerlauf aus.

Das Struktogramm der Abbildung 5.33 zeigt die Logik des Programms.

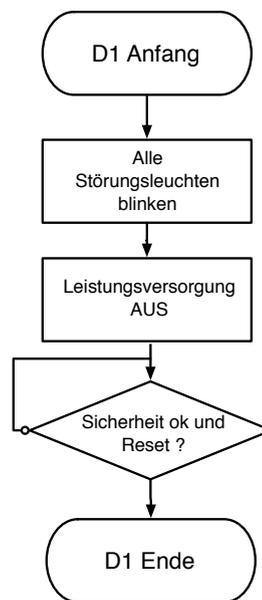


Abbildung 5.33: Struktogramm des Zustandes *D1 Not-Aus*

### 5.5.3 Sicherheitsprogramm

Dieses Programm läuft parallel mit dem Hauptprogramm und kontrolliert die folgende Sicherheitsbedingungen :

- Betrieb der Motorschutzschalter für Generator und Antrieb.
- Betrieb des Siemens MasterDrive.
- Betrieb der Ethercat Verbindung.
- Betrieb des Sicherheitsrelais.

Wenn eine dieser Bedingungen nicht gültig ist, dann ist die Ausgabe der Variable *sicherheitOK* falsch. Im Hauptprogramm wird der Zustand *D1 Not-Aus* aktiviert.

Um den Betrieb weiter zu führen, müssen die Fehler gelöscht und quittiert werden indem der *AUS Taster* des Feldes *Netzeinspeisung* zu betätigt wird. Siehe Abbildung 5.34

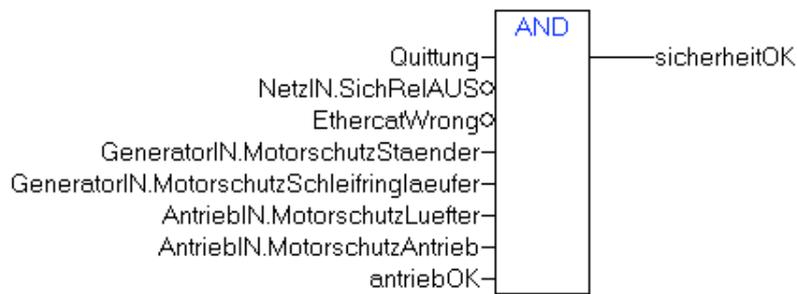


Abbildung 5.34: Sicherheitsfunktion

Es existieren auch weitere Funktionen in diesem Programm, jedoch handelt es sich hierbei nur um Hilfsfunktion zur Identifikation der Sicherheitsbedingungen.

Beispielsweise die Hilfsfunktion zur Überprüfung der EtherCat Verbindung:



Abbildung 5.35: Hilfsfunktion zur Überprüfung der EtherCat Verbindung

Der erste Block *GETBIT32* extrahiert das benötigte Bit aus dem Array des *EtherCat-Status* und der zweite Block beobachtet die steigende Flanke von diesem Bit. Wenn dieses Bit zu *1* wechselt, wird ein Fehler auf der EtherCat Verbindung detektiert.

Das Struktogramm der Abbildung 5.36 zeigt die Funktionsweise der Software-Sicherheit.

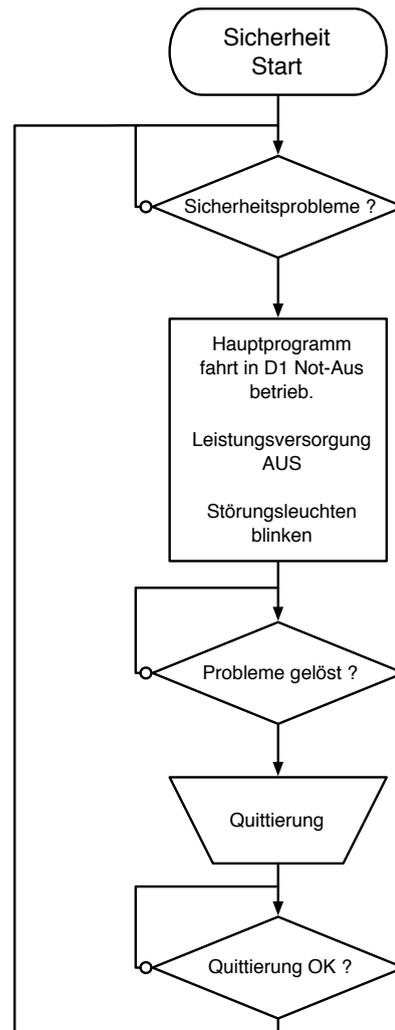


Abbildung 5.36: Funktionsweise der Sicherheitsbedingungen

#### 5.5.4 Programm zur Messwerterfassung

Das Analogprogramm skaliert die ausgenommenen Messwerte zwischen der Physik und Software um. Das Programm benötigt folgende Werte : Die Ströme in Ampere, die Spannungen in Volt, die Drehzahl in Umdrehung pro Minute usw.

#### Drehzahl

Die Drehzahl wird über einen Inkrementalgeber eingelesen. Dieser Inkrementalgeber liefert zwei um neunzig Grad verschobene Signale wobei jedes Signal zweitausendfünfhundert

Pulse, pro Umdrehung hat. Die Klemme EL5101 rechnet diese direkt in die Frequenz um.

### Netzspannungen

Die Netzspannungen werden mit Spannungswandlern gemessen. Jeder Wandler liefert eine Spannung von  $\pm 10V$  für  $\pm 1500V$ . Jedes Signal ist ein Integerwert welcher von der SPS in  $\pm 32767$  Werte umgerechnet wird. Um einen realen Wert im Programm zu verarbeiten, müssen die folgenden Umrechnungen erfolgen. Siehe Gleichung 5.1.

$$RealValue = InputValue \cdot \frac{1500V}{32767} \quad (5.1)$$

Diese Berechnung wurde für alle Phasen erstellt.

### Netzströme

Die Netzströme werden mit Stromwandlern gemessen. Jeder Wandler liefert eine Spannung von  $\pm 5V$  für  $\pm 10A$ . Jedes Signal ist ein Integerwert welcher von der SPS in  $\pm 32767$  Werte umgerechnet wird. Um einen realen Wert im Programm zu verarbeiten, müssen die folgenden Umrechnungen erfolgen. Siehe Gleichung 5.2.

$$RealValue = InputValue \cdot \frac{5V}{32767} \quad (5.2)$$

Diese Berechnung wurde für alle Phasenströme erstellt.

### Generatorströme

Die Ströme des Generators werden durch eine spezifische Karte gemessen, wie in Kapitel 5.3.1 erläutert. Die Gleichung 5.3 liefert die realen Werte für das Programm.

$$RealValue = InputValue \cdot \frac{1.3015}{32767} \quad (5.3)$$

Der gleiche Koeffizient wird für die Ständerströme und die Läuferströme genutzt.

#### 5.5.5 Steuerung der Signalleuchten

Dieses Programm läuft gleichzeitig mit dem Hauptprogramm und schaltet die Signalleuchten. Die Leuchten können blinken oder eingeschaltet sein. Zwei Variablen werden für jede

Leuchte genutzt, um die Steuerung zu kontrollieren : *LeuchteBlink* und *LeuchteON*.

Eine *BLINK*-Funktion wird für die Synchronisation des Blinkens aller Leuchten genutzt, wie in Abbildung 5.37 zu sehen ist.

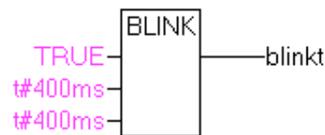


Abbildung 5.37: Blinkfunktion

Das Signal *blinkt* erzeugt für alle Signalleuchten die folgende Blinkfunktion:



Abbildung 5.38: Steuerungsfunktion aller Leuchten

Das Signal *LeuchteON* besitzt Priorität gegenüber der Variable *LeuchteBlink*.

### 5.5.6 Visualisierung

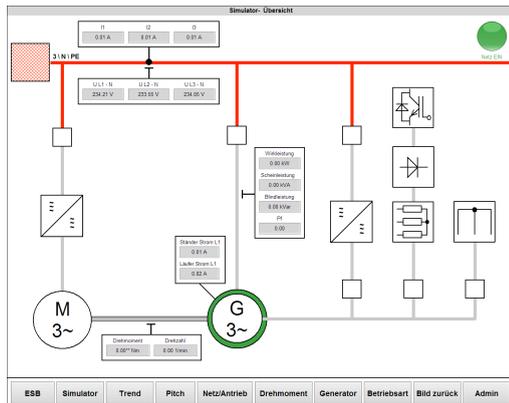
Die Visualisierung wird mit der Software ZenOn der Firma Copadata<sup>12</sup> realisiert. Diese Software kann mit dem ADS-Server von TwinCat kommunizieren. Der ADS-Server wurde mit Hilfe eines ein Symbolfiles von TwinCat konfiguriert. Im Symbolfile sind die zu Visualisierung benötigten Variablen abgelegt.

Die Visualisierung wurde von Herrn Lehmhaus<sup>13</sup> vorgenommen.

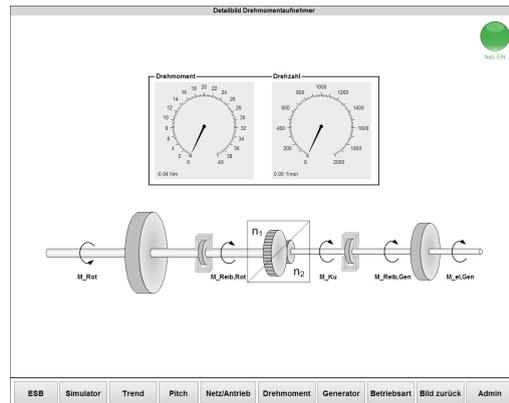
<sup>12</sup>Copadata [4]

<sup>13</sup>Lehmhaus [7]

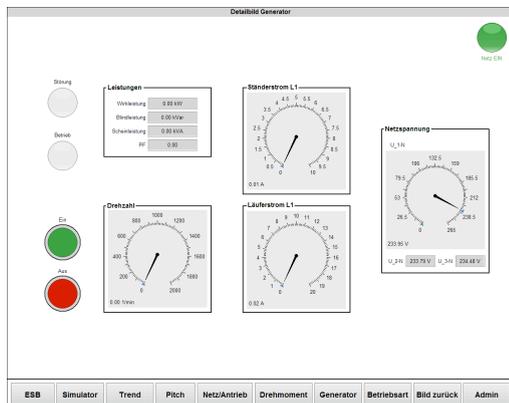
Die Abbildung 5.39 zeigt einige Auszüge der Visualisierung.



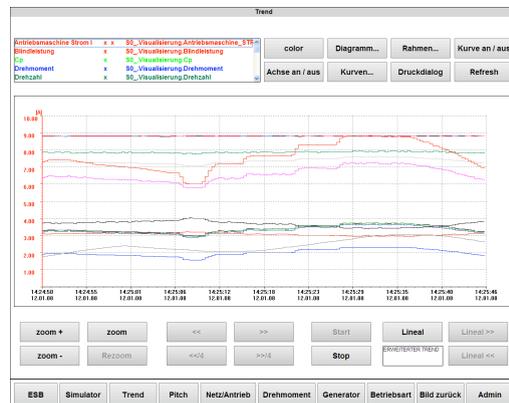
(a) Übersicht der Anlage



(b) Drehmoment Fenster



(c) Generator Fenster



(d) Trend Visualisierung

Abbildung 5.39: Übersicht über die Visualisierung

ZenOn kann auf alle globalen Variablen aus TwinCat zugreifen. Da es eine große Anzahl von Variablen gibt, wird die folgende Struktur *Visualisierung* benutzt. Das *Visu Programm* erstellt nur die Verknüpfung zwischen internen Variablen in *TwinCat PLC* und der *Visualisierung* Struktur.

Es folgt ein Beispiel für die Verknüpfung einer Variablen :

```
1 Visualisierung.NetzSpannungL1 := RealValues.U1netzRMS;
```

### 5.5.7 Leistungsberechnung

Dieses Programm wird jede Millisekunde aktualisiert. Das Ziel dieser Funktion ist die Berechnung von Phaseverschiebungen, RMS Werten von Strömen und Spannungen als auch der Leistungen.

Das Leistungsberechnungsprogramm ruft die Funktion *Leistung* auf. Diese Funktion berechnet die gewünschten Werte.

#### Funktion Leistung

Diese Funktion bearbeitet Folgendes :

- Berechnung der drei Phaseverschiebungen  $Phase_1$ ,  $Phase_2$  und  $Phase_3$  mit der Funktion *Phase*.
- Berechnung der Effektivwerte von Netzspannungen und Strömen :  $U_{1RMS}$ ,  $U_{2RSM}$ ,  $U_{3RMS}$ ,  $I_{1RMS}$ ,  $I_{2RMS}$  und  $I_{3RMS}$ .
- Berechnung von Wirkleistung  $P$ , Blindleistung  $Q$  und Scheinleistung  $S$
- Berechnung des Leistungsfaktor  $P_f$

#### Funktion Phase

Diese Funktion hat zwei Eingänge (eine Spannung und ein Strom) und drei Ausgänge (cos-Phi, sinPhi und die Phase).

In der Funktion werden Spannung und Strom multipliziert. Das Ausgangssignal ergibt einen Gleichanteil mit überlagerter Restwelligkeit.

Die mathematische Erklärung hierfür wird in Gleichung 5.4 erläutert :

$$A \cdot \sin(\omega t + \alpha) \cdot B \cdot \sin(\omega t + \beta) = \frac{AB}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{AB}{2} \sin(2\omega t + \alpha + \beta) \quad (5.4)$$

Dies bedeutet, dass das Ausgangssignal proportional zur Phasenverschiebung ist. Die Störung muss mit der doppelten Nennfrequenz gefiltert werden. Das Gleiche kann mit einer Cosinusfunktion berechnet werden um die Sinusanteile zu finden. Der Cosinus durch eine Verschiebung von  $\frac{\pi}{2}$  erreicht.

Zuletzt wird mit der Tangentenfunktion der Winkel berechnet.

Die Abbildung 5.40 zeigt das Model der Funktion.

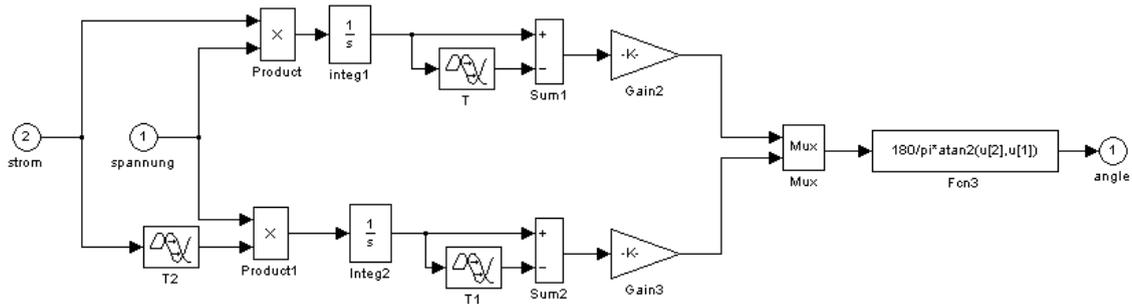


Abbildung 5.40: Model der Phaseverschiebungsberechnung

Dieses Model wird in strukturiertem Text (ST) übersetzt und in die Funktion *Phase* hinzugefügt. Siehe Anhang T.

### Funktion RMS

Diese Funktion berechnet den quadratischen Mittelwert eines Signals. Siehe Gleichung 5.5.

$$Signal_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T signal_{(t)}^2 \cdot dt} \quad (5.5)$$

Ein Mittelwert dieses Signals wird während  $100ms$  erzeugt um ein stabiles Signal zu liefern.

### Berechnung der Leistungen

Mit diesen vorangegangenen Funktionen können nun die Werte für Blind, Schein und Wirkleistungen berechnet werden.

Es werden die Gleichungen 5.6 und 5.7 angewandt :

$$P_{tot} = U_{1RMS} \cdot I_{1RMS} \cdot \cos\phi_1 + U_{2RMS} \cdot I_{2RMS} \cdot \cos\phi_2 + U_{3RMS} \cdot I_{3RMS} \cdot \cos\phi_3 \quad (5.6)$$

$$Q_{tot} = U_{1RMS} \cdot I_{1RMS} \cdot \sin\phi_1 + U_{2RMS} \cdot I_{2RMS} \cdot \sin\phi_2 + U_{3RMS} \cdot I_{3RMS} \cdot \sin\phi_3 \quad (5.7)$$

Die gesamten Blind und Wirkleistungen werden durch Addition der Werte der einzelnen Phasen erreicht.

Die Scheinleistung wird berechnet mit der Gleichung 5.8 :

$$S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} \quad (5.8)$$

Abschließend wird der Leistungsfaktor über den Mittelwert des  $\cos\phi$  der einzelnen Phasen berechnet, wie im Gleichung 5.9 dargestellt.

$$P_f = \frac{\cos\phi_1 + \cos\phi_2 + \cos\phi_3}{3} \quad (5.9)$$



# 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die verschiedenen Bereiche der Diplomarbeit zusammengefasst und die Ergebnisse diskutiert.

### 6.1 Hardware

Die Modifikationen an der Anlage werden zusammengefasst :

- Austausch der SPS mit einer Soft-Echtzeit-SPS mit EtherCat-Bis Verbindung
- Zentralisierung der analogen und digitalen Signale über Ethercat Bus-Klemmen
- Austausch eines Teils der Verkabelung

Die Steuerung wurde Hardwaremäßig durch Einsatz von Beckhoff kllmmen mit Ethercat-Echtzeitbus und Einsatz eines Rechner als PLC-Runtime Plattform dezentralisiert. Es wurde eine strukturierte Steuerung programmiert.

Die SPS kann nicht schneller als mit  $100\mu s$  (10kHz) arbeiten. Das Inkremental-Encoder-Interface begrenzt die Zykluszeit durch ein Überlauf am EtherCat-Bus. Die Sinus- und Kosinusfunktion (Für den doppeltgespeistes Betrieb) sind nicht direkt in der Inkremental-Encoder-Interface verfügbar.

Die SPS hingegen kann zweihundert Werte pro Periode der Netzspannung lesen bsw. schreiben.

### 6.2 Sicherheit

Für den Schutz der Benutzer und den Anlage wurden einige Modifikationen im Schaltschrank vorgenommen :

- 24V Netzteil wird direkt aus dem Hauptschalter vorsorgt
- Versorgung der SPS direkt aus dem 24V Netzteil
- Montage eines Überwachungskontaktes für das Sicherheitsrelais
- Änderung der Versorgung der Störungsleuchte des Sicherheitsrelais
- Montage eines Kontaktes um das Sicherheitsrelais mittels SPS auszuschalten

Diese Änderungen ermöglichen eine permanente Überwachung der Anlage und dessen derzeitigen Zustand.

Bei einer detaillierten Funktionsprüfung der Anlage wurden keine Probleme festgestellt. Somit entspricht sie den Anforderungen, die in Kapitel 4 gefordert wurden.

### 6.3 Software

Durch die entwickelte Software wurde ein großer Teil der gestellten Forderung gelöst. Mit der GEMMA Analyse 5.4 enthält das Steuerprogramm eine methodische und strukturierte Form. Modifikationen und Weiterentwicklungen können später einfach ausgeführt werden.

Die Berechnung der Leistungen und Effektivwerte von Spannungen und Strömen sind direkt in das Programm integriert. Die Signale der Steiger Mohilo Box und des Drehmomentaufnehmers und das Leistungsmessgerät werden nicht mehr benötigt, da all diese Werte nun in der Soft-SPS berechnet werden. Jedoch können wir diese Werte weiterhin als Referenzwerte genutzt werden.

### 6.4 Fortsetzung der Entwicklung und Verbesserungen

Der Schlupfbetrieb sowie der doppeltgespeiste Betrieb werden bei einer nachfolgenden Diplomarbeit weiterentwickelt.

Alle die Ein- und Ausgänge sind schon vorbereitet in Hardware als auch in Software. Die Variablen sind bereits zwischen *TwinCat System Manager* und *TwinCat PLC* verknüpft. Es fehlt noch ein PWM Ausgang um die elektronische Last zu kontrollieren. Es ist ein vorgesehener Spannungsausgang verfügbar um ein Konvertierungsmodul anzusteuern um ein PWM Signal zu generieren. Ein Analog Eingang ist verfügbar um den IGBT Strom zu messen.

Für den doppeltgespeisten Betrieb wird ein Wechselrichter im Labor für Energieversorgung entwickelt.

# Literaturverzeichnis

- [1] Firma Beckhoff. Automatisierungssystem, 2007. URL <http://www.beckhoff.de/>.
- [2] BMU. *Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2007 gemäß §20 EEG*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007.
- [3] BMU. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. URL <http://www.erneuerbare-energien.de/>.
- [4] Firma Copadata. HMI und SCADA-Lösungen, 2007. URL <http://www.copadata.de/>.
- [5] dSPACE. Solutions for Control, 2007. URL <http://www.dspace.de/>.
- [6] Finger, Kersting. *Hybridsimulator für WKA mit ASM - Entwicklung eines numerischen Simulationsmodell*. Fachhochschule Südwestfalen, 2000.
- [7] Fabian Lehmhaus. *Entwicklung einer Prozessvisualisierung für dezentrale Wandler-systeme*. Fachhochschule Südwestfalen, 2008.
- [8] Prof. Ing. Jean-Daniel Marquard. *MCR2 : Processautomatisierung*. HESSO-Valais, 2007.
- [9] Prof. Dr.-Ing. Egon Ortjohann. *Script der Vorlesung 'Regenerative Energien'*. Fachhochschule Südwestfalen, 2007.
- [10] Kai Rosenbaum. *Hybridsimulator für WKA mit Asynchronmaschinen*. Fachhochschule Südwestfalen, 2002.
- [11] Siemens. Industry Automation and Motion Control. URL <http://www.automation.siemens.com/>.
- [12] Andreas Schmelter, Timo Lütke-Verspohl. *Aufbau eines Hybridsimulators für Windkraftanlagen mit Asynchrongeneratoren (Entwicklung der Hardware-Nachbildung)*. Fachhochschule Südwestfalen, 2002.



# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Die komplette Anlage . . . . .	7
2.2.	Gegenüberstellung Reale Struktur - Modellstruktur . . . . .	8
2.3.	Frontplatte . . . . .	10
2.4.	Allgemeine Struktur der alten Steuerung . . . . .	10
2.5.	Der Schaltschrank mit bereits der neuen SPS in der Mitte . . . . .	11
2.6.	Alte SPS Siemens S5 . . . . .	12
2.7.	Links der Antrieb, rechts der Generator mit Inkrementalgeber und in der Mitte der Drehmomentaufnehmer. . . . .	13
2.8.	Allgemeine Struktur der neuen Steuerung . . . . .	14
2.9.	Externe Boxen der neuen Soft-SPS . . . . .	15
3.1.	Darstellung der analogen Signale in der Anlage . . . . .	19
3.2.	Feld Netzeinspeisung der Frontplatte . . . . .	20
3.3.	Feld Antriebsmaschine der Frontplatte . . . . .	20
3.4.	Feld Generator der Frontplatte . . . . .	23
3.5.	Feld Betriebsarten auf der Frontplatte . . . . .	25
4.1.	Schema der Sicherheitsrelais . . . . .	32
4.2.	24V Versorgung der SPS (siehe Anhang U, Blatt 5, D1) . . . . .	33
5.1.	Allgemeine GEMMA Struktur . . . . .	36
5.2.	Hauptfunktionen des TwinCat System Manager . . . . .	38
5.3.	Hauptfelder des TwinCat PLC . . . . .	39
5.4.	Externe Boxen . . . . .	40
5.5.	Verbindung der digitalen Ein- und Ausgänge . . . . .	41
5.6.	Verbindung der analogen Ein- und Ausgänge . . . . .	41
5.7.	Verbindung des Leistungsmessgerätes mit dem Netz . . . . .	42
5.8.	Verbindung der Analogausgänge des Leistungsmessgerätes . . . . .	43
5.9.	Siemens Master Drive Sollwert Vorgabe . . . . .	43
5.10.	Generator Strommessung . . . . .	44
5.11.	Auswahl des Zielsystems . . . . .	45
5.12.	Eigenschaften des Zielsystems . . . . .	46
5.13.	SPS Projekt anfügen . . . . .	46
5.14.	Auswahl des SPS-Projekts . . . . .	47
5.15.	Beschreibung des SPS-Projektes . . . . .	48
5.16.	Geräte suchen . . . . .	49
5.17.	EtherCat Geräte gefunden . . . . .	49
5.18.	Boxen suchen . . . . .	50
5.19.	Liste der Geräte und der Boxen . . . . .	50
5.20.	Verknüpfung ändern . . . . .	51
5.21.	Variablen Verknüpfung . . . . .	51
5.22.	Auswahl des Zielsystems . . . . .	52
5.23.	Projekt-Verzeichnis des Boot-Projekts . . . . .	53
5.24.	Auto-Start der PLC . . . . .	54

5.25. GEMMA Struktur der Software . . . . .	55
5.26. Liste der Programme in TwinCat PLC . . . . .	57
5.27. Teil der Liste der Strukturen . . . . .	58
5.28. Strukturen für das Netzeinspeisungsfeld . . . . .	59
5.29. Hauptprogramm . . . . .	60
5.30. Struktogramm des Schrittes <i>A6-Fahrt in den Initialzustand</i> . . . . .	61
5.31. Struktogramm des Zustandes <i>A1 Initialzustand</i> . . . . .	62
5.32. Struktogramm des Zustandes <i>A4 Handbetrieb</i> . . . . .	64
5.33. Struktogramm des Zustandes <i>D1 Not-Aus</i> . . . . .	65
5.34. Sicherheitsfunktion . . . . .	66
5.35. Hilfsfunktion zur Überprüfung der EtherCat Verbindung . . . . .	66
5.36. Funktionsweise der Sicherheitsbedingungen . . . . .	67
5.37. Blinkfunktion . . . . .	69
5.38. Steuerungsfunktion aller Leuchten . . . . .	69
5.39. Übersicht über die Visualisierung . . . . .	70
5.40. Model der Phaseverschiebungsberechnung . . . . .	72

# Tabellenverzeichnis

3.1. Beschreibung der ersten Zahl eines Signals . . . . .	18
3.2. Beispiel . . . . .	18
3.3. Liste der Signale des Feldes Netzeinspeisung . . . . .	20
3.4. Liste der Signalen des Feldes Antriebsmaschine . . . . .	21
3.5. Liste der Signale des Feldes Drehmomentmessung . . . . .	22
3.6. Liste der Signale des Feldes Generator . . . . .	24
3.7. Liste der Signale des Feldes Betriebsarten . . . . .	26
3.8. Liste der digitale Ausgänge . . . . .	26
3.9. Liste der digitalen Eingänge . . . . .	28
3.10. Liste der analogen Ausgänge . . . . .	29
3.11. Liste der analogen Eingänge . . . . .	29
3.12. Liste der besonderen Signale . . . . .	30



Teil II

Anhang



# Anhangsverzeichnis

A. Technische Daten der EtherCat-Bus-Klemmen	87
B. Übersicht der analogen und digitalen Mess- und Steuersignale	89
C. Verbindung der analog Signale	91
D. Hauptprogramm	93
E. Hauptprogramm 'A6'	95
F. Hauptprogramm 'A1'	97
G. Hauptprogramm 'F4'	99
H. Hauptprogramm 'D1'	101
I. Hauptprogramm 'F1'	103
J. Programm 'Analog'	105
K. Programm 'BlinkLeuchte'	107
L. Programm 'LeistPRM'	109
M. Sicherheitsprogramm	111
N. Programm 'Visu'	113
O. Funktion 'ATAN2'	115
P. Leistungsberechnungsfunktion	117
Q. Funktion 'Tiefpass Filter erster Ordnung'	119
R. Funktion 'Mittelwert'	121

<b>S. Funktion 'Phaseverschiebung'</b>	<b>123</b>
<b>T. Funktion 'RMS'</b>	<b>125</b>
<b>U. Elektrische Schaltpläne</b>	<b>127</b>



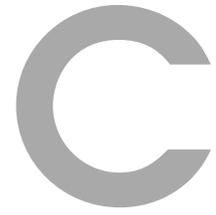
## **Technische Daten der EtherCat-Bus-Klemmen**



# B

## **Übersicht der analogen und digitalen Mess- und Steuersignale**





## **Verbindung der analog Signale**



D

## Hauptprogramm



**E**

**Hauptprogramm 'A6'**



**F**

**Hauptprogramm 'A1'**





## Hauptprogramm 'F4'





# Hauptprogramm 'D1'





# Hauptprogramm 'F1'



J

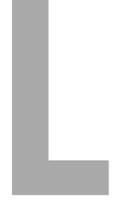
**Programm 'Analog'**



K

**Programm 'BlinkLeuchte'**





## Programm 'LeistPRM'



M

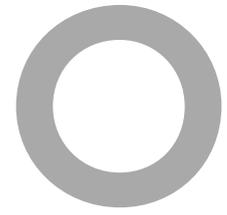
## Sicherheitsprogramm



**N**

**Programm 'Visu'**





**Funktion 'ATAN2'**



P

## Leistungsberechnungsfunktion





## **Funktion 'Tiefpass Filter erster Ordnung'**





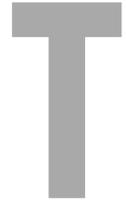
## **Funktion 'Mittelwert'**



S

**Funktion 'Phaseverschiebung'**





**Funktion 'RMS'**





## **Elektrische Schaltpläne**

