



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Yubing Yang

Entwicklung eines Bedien- und Visualisierungsprogramms mit LabView für eine im Labor nachgebildete Windenergieanlage

Yubing Yang

Entwicklung eines Bedien- und Visualisierungsprogramms mit LabView für eine im Labor nachgebildete Windenergieanlage

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.-Ing Michael Röther  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Thomas Lehmann

Abgegeben am 06. Mai 2011

**Yubing Yang**

**Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung eines Bedien- und Visualisierungsprogramms mit LabView für eine im Labor nachgebildete Windenergieanlage

**Stichworte**

Windenergieanlage, LabView, Anlagesteuerung, Wago I/O-System 750

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Bedien- und Visualisierungsprogramms mit LabView für eine labornachgebildete Windenergieanlage, welche aus Maschinen, Frequenzumrichter und einem Computer besteht. Ein Teil der Aufgabe war ein Wago I/O-System 750 zu implementieren, um die ein- und ausgehenden Signale zu bearbeiten. Die Vorgehensweise und deren wichtigen Funktionen werden in der vorliegenden Arbeit detailliert erklärt. Die Bedienoberfläche wird so gestaltet, dass die Benutzer ohne tiefe Vorkenntnisse sie bedienen können.

**Yubing Yang**

**Title of the paper**

Development of a control and visualization program with LabView for a wind energy plant in the laboratory

**Keywords**

wind energy plant, LabView, control and visualization program, Wago I/O-System 750

**Abstract**

This thesis describes how to develop a control and visualization program with LabView for a wind energy plant in the laboratory, which consists of machines, frequency converters and a computer. A part of the task was the Wago I/O system 750 to implement in order to deal with the in and out signals. The approach and their important functions are explained in detail. The control surface is simply represented that the users without deep previous knowledge can use it.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit .....	1
1.2 Gliederung der Arbeit .....	2
<b>2 Beschreiben des existierenden Labormodells.....</b>	<b>3</b>
2.1 Grundaufbau der nachgebildeten Windenergieanlage.....	3
2.2 Eigenschaft der ADDI-Data Karten .....	5
2.3 Prozessvisualisierungssystem WinErs.....	7
2.3.1 Gliederung der Blockstrukturen.....	8
<b>3 Einführung in die neue Entwicklungsumgebung .....</b>	<b>9</b>
3.1 Änderung im Grundaufbau der nachgebildeten WEA .....	9
3.2 Eigenschaft des Wago I/O-Systems 750.....	10
3.2.1 Beschreibung des Wago Feldbus-Kopplers 750-341 .....	10
3.2.2 Beschreibung der Wago Busklemmen 750-xxx.....	12
3.3 Grafisches Programmiersystem NI LabView .....	16
3.3.1 Wago LabView Bibliothek.....	20
3.3.2 Gliederung der SubVIs .....	20
<b>4 Realisierung mit LabView.....</b>	<b>21</b>
4.1 Aufgaben des main-Programms.....	21
4.1.1 Aufbau der Verbindung zwischen Wago-Klemmen und LabView .....	21
4.1.2 Bearbeitung der Signale .....	24
4.1.3 Ein- und Ausschaltkreis der Anlage .....	30
4.1.4 Entwurf der Bedienoberfläche .....	32
4.2 Aufgaben der Sub-VIs.....	41
4.2.1 Blockdiagramme mit Sub-VIs .....	43
4.2.2 Sub-VIs als Hilfsfunktionen .....	53
4.3 Erstellen einer ausführbaren Datei .....	57
4.4 Verifizierung .....	58
4.4.1 Kennlinien der WEA .....	58
4.4.2 Stationäres Verhalten bei unterschiedlichen Generatorsystemen.....	58
4.4.3 Vergleich der grafischen Darstellung .....	60
<b>5 Schluss.....</b>	<b>62</b>
5.1 Zusammenfassung.....	62
5.2 Danksagung .....	63
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>64</b>
<b>A Anhang.....</b>	<b>67</b>
A.1 Verzeichnis der Formelzeichen .....	67
A.2 Messdaten und Kennlinien .....	68
A.3 Projektdatei und Ergänzende Dokumente .....	76
<b>B Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>77</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Grundsätzlicher Aufbau einer Windenergieanlage .....	3
Abbildung 2-2 Aufbau der Labornachbildung .....	4
Abbildung 2-3 Prozessbild eines WinErs-Projektes .....	7
Abbildung 2-4 Blockstruktur eines WinErs-Projektes .....	8
Abbildung 2-5 Blockstrukturen für Ermittlung des Ankerstromsollwertes .....	8
Abbildung 3-1 Geänderter Aufbau des Labormodells „Windenergieanlage“ .....	9
Abbildung 3-2 Buskoppler 750-341 .....	10
Abbildung 3-3 Prozessabbild des Wago I/O-Systems 750 .....	11
Abbildung 3-4 8-Kanal Digitale Eingangsklemme 750-430 .....	12
Abbildung 3-5 8-Kanal Digitale Ausgangsklemme 750-530 .....	13
Abbildung 3-6 4-Kanal Analog Eingangsklemme 750-457 .....	14
Abbildung 3-7 4-Kanal analoge Ausgangsklemme 750-559 .....	15
Abbildung 3-8 Bus-Endklemme 750-600 .....	16
Abbildung 3-9 Frontpanel mit Bedienelement .....	17
Abbildung 3-10 Diagramm mit Elementsymbol .....	18
Abbildung 3-11 LabView Projekt-Explorer .....	19
Abbildung 3-12 Gliederung der SubVIs .....	20
Abbildung 4-1 Flussdiagramm für den Verbindungsaufbau .....	22
Abbildung 4-2 MBTConnect .....	22
Abbildung 4-3 MBTReadRegister .....	23
Abbildung 4-4 MBTWriteRegister .....	23
Abbildung 4-5 MBTDisconnect .....	23
Abbildung 4-6 Array mit gelesenen Werte vom ReadRegister .....	24
Abbildung 4-7 Bearbeitung der analogen Eingangssignale .....	24
Abbildung 4-8 Skalierung des analogen Eingangs .....	25
Abbildung 4-9 Berechnung der Leistungswerte .....	26
Abbildung 4-10 Berechnung des Drehzahlwertes .....	27
Abbildung 4-11 Blockdiagramm für die digitalen Eingangssignale .....	27
Abbildung 4-12 Skalierung des analogen Ausgangs .....	28
Abbildung 4-13 Blockdiagramm für die analogen Ausgangssignale .....	28
Abbildung 4-14 Blockdiagramm für die digitalen Ausgangssignale .....	29
Abbildung 4-15 Zusammenfügen der Array im Main-Programm .....	29
Abbildung 4-16 zu schreibenden Werte für WriteRegister .....	29
Abbildung 4-17 Flussdiagramm für Ein- und Ausschaltkreis .....	31
Abbildung 4-18 Bedienoberfläche des WinErs-Programms .....	32
Abbildung 4-19 Eingabefelder .....	33
Abbildung 4-20 Flussdiagramm für MPP-Tracking .....	35
Abbildung 4-21 Bedienoberfläche mit Registerseite „Signalverläufe“ .....	36
Abbildung 4-22 Bedienoberfläche mit Registerseite „Windsimulation“ .....	37
Abbildung 4-23 Bedienoberfläche mit Registerseite „Untersuchung“ .....	38
Abbildung 4-24 Bedienoberfläche mit Registerseite „Energiefluss“ .....	39

Abbildung 4-25 Bedienoberfläche mit Registerseite „Energiefluss“ .....	40
Abbildung 4-26 Hilfsregister mit der Registerseite „Signale“ .....	41
Abbildung 4-27 Übersicht für Sub-VIs .....	42
Abbildung 4-28 cp-Lambda-Kennfeld mit analytischer Methode.....	45
Abbildung 4-29 cp-Lambda-Kennfeld mit Glättung.....	45
Abbildung 4-30 Blockdiagramm zum Berechnen des Ankerstromsollwertes.....	47
Abbildung 4-31 $n_{\text{Optimum}}(v_{\text{Wind}})$ -Kennlinie mit Stützstellen in WinErs .....	48
Abbildung 4-32 Nachgebildete $n_{\text{Optimum}}(v_{\text{Wind}})$ -Kennlinie mit MatLab .....	49
Abbildung 4-33 Erzeugen einer Windbö .....	50
Abbildung 4-34 Berechnen des Drehzahlollwertes mit Windnachführung .....	50
Abbildung 4-35 Blockdiagramm zum Bestimmen des Drehzahlollwertes.....	51
Abbildung 4-36 Blockdiagramm für Mittelwertbilden .....	52
Abbildung 4-37 Blockdiagramm zur Glättung des Leistungsistwertes .....	52
Abbildung 4-38 Blockdiagramm zur Glättung des Drehzahlwertes .....	53
Abbildung 4-39 cp-Lambda-Kennfeld mit grafischen Stützstellen .....	53
Abbildung 4-40 Optimale Drehzahlkennlinie .....	54
Abbildung 4-41 Geglättetes Signal .....	55
Abbildung 4-42 Definition der globalen Variablen.....	56
Abbildung 4-43 Erstellen einer ausführbaren Datei .....	57
Abbildung 4-44 Vergleich von $P(v_{\text{Wind}})$ mit direkter Netzkopplung .....	59
Abbildung 4-45 Vergleich von $P(v_{\text{Wind}})$ mit Vollumrichter .....	60
Abbildung 4-46 Signalverläufe von $v_{\text{Wind}}$ und $n_{\text{soll}}$ in WinErs.....	61
Abbildung 4-47 Signalverläufe von $v_{\text{Wind}}$ und $n_{\text{soll}}$ in LabView .....	61
Abbildung A-1 $M(n)$ -Kennlinien bei unterschiedlichen $v_{\text{Wind}}$ in WinErs .....	69
Abbildung A-2 $M(n)$ -Kennlinien bei unterschiedlichen $v_{\text{Wind}}$ in LabView .....	70
Abbildung A-3 $P(n)$ -Kennlinien bei unterschiedlichen $v_{\text{Wind}}$ in WinErs.....	71
Abbildung A-4 $P(n)$ -Kennlinien bei unterschiedlichen $v_{\text{Wind}}$ in LabView .....	72
Abbildung A-5 $P(v_{\text{Wind}})$ mit direkter Netzkopplung und Vollumrichter in WinErs .....	74
Abbildung A-6 $P(v_{\text{Wind}})$ mit direkter Netzkopplung und Vollumrichter in LabView.....	75

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Signaleübersicht der einzelnen Verbindung .....	4
Tabelle 2-2 Binäre Eingangssignale .....	5
Tabelle 2-3 Digitalen Ausgangssignale .....	5
Tabelle 2-4 Analoge Eingangssignale .....	6
Tabelle 2-5 Analoge Ausgangssignale.....	6
Tabelle A-1 Messdaten für Drehzahl-Spannungs-Kennlinie $n(U)$ .....	68
Tabelle A-2 Messdaten für $M(n)$ für unterschiedliche $v_{Wind}$ in WinErs .....	69
Tabelle A-3 $M(n)$ -Kennlinien für unterschiedliche $v_{Wind}$ in LabView .....	70
Tabelle A-4 $P(n)$ -Kennlinien $P(n)$ für unterschiedliche $v_{Wind}$ in WinErs.....	71
Tabelle A-5 $P(n)$ -Kennlinien $P(n)$ für unterschiedliche $v_{Wind}$ in LabView .....	72
Tabelle A-6 Messdaten für $P(v_{Wind})$ mit direkter Netzkopplung in WinErs .....	73
Tabelle A-7 Messdaten für $P(v_{Wind})$ mit Vollumrichter in WinErs.....	73
Tabelle A-8 Messdaten für $P(v_{Wind})$ mit direkter Netzkopplung in LabView.....	74
Tabelle A-9 Messdaten für $P(v_{Wind})$ mit Vollumrichter in LabView .....	75

# 1 Einleitung

Die jüngsten Ereignisse in Fukushima und die dadurch ausgelösten Reaktionen der Bevölkerung und Politik in Deutschland zeigen, dass die Tage der nuklearen Energiegewinnung gezählt sind. Die regenerative Energiegewinnung wird hierdurch zusätzlich an Bedeutung gewinnen. Eine dieser Alternativen ist die Windenergie. In ihr steckt ein hohes Ausbaupotenzial, welches in den nächsten Jahren mit höchster Wahrscheinlichkeit stark ausgeschöpft wird.

Um die Studenten für die Zukunft zu wappnen, steht eine labornachgebildete Windenergieanlage als Laborversuch für das Fach „Regenerative Energietechnik“ zur Verfügung. Das Labormodell entstand vor etwa 15 Jahren und ist seit mehr als 10 Jahren unverändert. Die eingesetzten Hard- und Software entsprechen längst nicht mehr der heutigen gängigen Technik. Im Falle eines Ausfalls der Hardware ist kein Ersatz mehr zu besorgen. Außerdem ist die verwendete Umgebung nicht mehr auf dem aktuellsten Stand der Technik.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird die Software und Hardare des Laborversuchs auf den aktuellen Stand modernisiert.

Für die Prozessvisualisierung und die Programmierung der grafischen Bedienoberfläche des Labormodells wurde beim aktuellen Laborversuch die Software WinErs<sup>1</sup> eingesetzt. Im Verlauf dieser Arbeit soll die Software für den Laborversuch durch die heute in der Entwicklung und Produktion häufig eingesetzte grafische Programmiersprache LabView<sup>2</sup> ersetzt werden.

Für die Datenübertragung zwischen der Anlage und dem Computer wurden verschiedene Interface-Karten eingesetzt, die in den ISA-Slot von Computern eingesteckt werden müssen. Solche Interface-Karten sind heute nicht mehr verbreitet. Im Falle von Hardwaredefekten ist es schwierig Ersatzteile zu beschaffen. Das neue System soll daher auf einen Standardbaustein von Verbindungsklemmen umsteigen.

Die eingesetzten Maschinen und Umrichter sind zwar veraltet, aber funktionieren einwandfrei. Für die Mondernisierung ist es ist nicht unabdingbar, die bestehenden Hardwarekomponenten zu ersetzen.

Das neue Bedien- und Steuerungsprogramm soll weitestgehend mit dem Alten identisch sein. Neu hinzukommen sollen mehrere Anpassungen, wie die Vereinfachung der Bedienung, übersichtlichere Darstellung des Modells und höhere Benutzerfreundlichkeit der Bedienung durchgeführt werden.

---

<sup>1</sup> Software für Prozessvisualisierung, Steuerung und Simulation, siehe Kapitel 2.3

<sup>2</sup> Grafisches Programmiersystem von National Instrument, siehe Kapitel 3.3



## **1.2 Gliederung der Arbeit**

Im Kapitel 2 wird der Aufbau des existierenden Laborversuchs, die verwendete Hardware und Software beschrieben.

Im Kapitel 3 folgt eine Einführung in die neue Entwicklungsumgebung. Die Änderung des Grundaufbaus, das neue Ein- und Ausgabensystem, sowie die verwendete Programmiersprache werden detailliert erläutert.

Auf die Realisierung des neuen Systems und deren Verifikationen werden im Kapitel 4 eingegangen. Hier wird hauptsächlich das entwickelte main-Programm beschrieben.

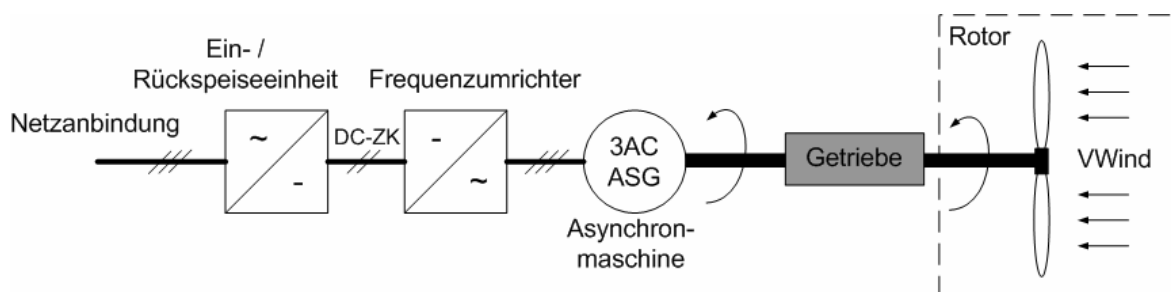
Eine Zusammenfassung und einen Ausblick schließt die Arbeit im Kapitel 5 ab.

## 2 Beschreiben des existierenden Labormodells

In diesem Kapitel werden der Grundaufbau einer Windenergieanlage und des Labormodells, die Eigenschaften der ADDI Data-Karten und das Prozessvisualisierungssystem WinErs beschrieben.

### 2.1 Grundaufbau der nachgebildeten Windenergieanlage

Eine Windenergieanlage (WEA) erzeugt elektrische Energie aus der kinetischen Energie des Windes. Hierfür wird die kinetische Energie des Windes zum Teil von den Rotorblättern der WEA absorbiert und in eine Rotation gewandelt. Die Rotationsgeschwindigkeit wird gegebenenfalls durch ein Getriebe den Bedürfnissen des Asynchrongenerators angepasst, welche die Rotation in elektrische Energie wandelt. Beim Frequenzrichter wird die erzeugte elektrische Energie in einem Gleichstrom umgewandelt. Die Ein- und Rückspeiseeinheit speist die Energie schließlich ins Stromnetz. Die Abbildung 2-1 zeigt den Grundaufbau einer WEA.



**Abbildung 2-1 Grundsätzlicher Aufbau einer Windenergieanlage<sup>3</sup>**

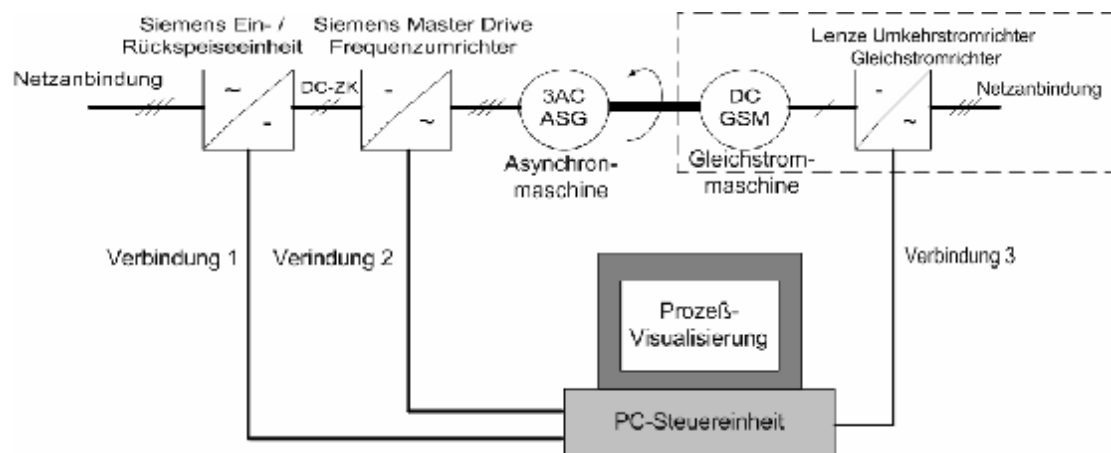
In der Labornachbildung wird der Teil des Rotors weggelassen, siehe Abb. 2-2. Für die Simulation der Windenergie wird eine Gleichstrommaschine verwendet. Die Gleichstrommaschine wird von einem Gleichrichter gespeist, welche durch die Prozessvisualisierung gesteuert werden kann.

Die in der Abbildung 2-2 gekennzeichneten Verbindungen sind vereinfachte Darstellungen für die Datenübertragung zwischen der WEA und der Steuer-/Regelungseinheit. Jede Verbindung besteht aus mehreren Leitungen, die zum Übertragen der digitalen oder analogen Signale dienen. In der Tabelle 2-1 sind die Signale unter jeder Verbindung zu erkennen. Mit der ADDI Data-Karten können die Signale im Rechner bearbeitet werden.

<sup>3</sup> [21] Seite 4, Abbildung 2.1/2

**Tabelle 2-1 Signaleübersicht der einzelnen Verbindung**

<b>Verbindung 1</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Binäre Steuerung der Betriebszustände</li> <li>2. Binäre Rückmeldungen der Betriebszustände</li> <li>3. Analoger Leistungs-Istwert</li> </ol>
<b>Verbindung 2</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Binäre Steuerung der Betriebszustände</li> <li>2. Binäre Rückmeldungen der Betriebszustände</li> <li>3. Analoge Istwerte der moment- und flussbildenden Stromkomponenten</li> <li>4. Analoger Drehzahl-Sollwert</li> </ol>
<b>Verbindung 3</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Binäre Steuerung der Betriebszustände</li> <li>2. Binäre Rückmeldungen des Betriebszustandes</li> <li>3. Analoger Momenten-Sollwert</li> </ol>

**Abbildung 2-2 Aufbau der Labornachbildung<sup>4</sup>**

<sup>4</sup> [21] Seite 4, Abbildung 2.1/1

## 2.2 Eigenschaft der ADDI-Data Karten

Zur Datenübertragung zwischen der WEA und dem PC wurden folgende Interface-Karten im Rechner eingebaut:

- 1) Digitale Ein- und Ausgabekarte ADDINUM PA150[8] besitzt jeweils 16 Eingangs- und Ausgangskanäle. Die Ein- und Ausgänge sind durch Optokoppler galvanisch getrennt. Der Pegel von 24V entspricht dem logischen Zustand '1' und 0V dem Zustand '0'. In der Tabelle 2-1 und der Tabelle 2-2 sind alle binären ein- und ausgehenden Signale dargestellt.

**Tabelle 2-2 Binäre Eingangssignale**

Kanal	Signalbezeichnung	Bemerkung
1	MD_ist_in_Betrieb	Betriebsstatus der Master Drive
2	MD_keine_Störung	Störungssignal der Master Drive
3	Fangen_ist_aktive	Signal für Master Drive, wenn das Zuschalten der Gleichstrommaschine erlaubt ist.
4	ER_ist_in_Betrieb	Betriebsstatus der Ein- & Rückspeiseeinheit
5	ER_keine_Störung	Störungssignal der Ein- & Rückspeiseeinheit
6	Lenze_keine_Störung	Störungssignal des Lenze-Umrichters

**Tabelle 2-3 Digitalen Ausgangssignale**

Kanal	Signalbezeichnung	Bemerkung
1	Master_Drive_EIN	Einschaltsignal für Master Drive
2	MD_S_AUS	Ausschaltsignal für Master Drive
3	Quittierung	Signal zum Quittieren der Ein- & Rückspeiseeinheit, Master Drive sowie Lenze-Umrichter
4	ER_Einschalten	Einschaltsignal für Ein- & Rückspeiseeinheit
5	Lenze_Regl_Freigabe	Freigabesignal für Lenze-Umrichters

- 2) Die analoge Eingangskarte ADDIALOG PA 302[9] hat 16 analoge Single-ended- oder 8 analoge Differenz-Eingänge. Die Karte digitalisiert die Eingangssignale mit 12 Bit Auflösung, dabei kann der Eingangsbereich zwischen 0-10V, +/- 5V oder +/- 10V frei eingestellt werden. Für die Steuerung wurden folgende Kanäle verwendet:

**Tabelle 2-4 Analoge Eingangssignale**

Kanal	Signalbezeichnung	Bemerkung
0	Drehzahl_Istwert	Drehzahlwert des Generators
1	Id_Istwert	Istwert des Zwischenkreisstroms zur Berechnung des Leistungsistwertes
2	Isq	Momentbildende Stromkomponente
3	Isd	Flussbildende Stromkomponente

- 3) Die analoge Ausgangskarte PA 350[10] besitzt 4 analoge Ausgänge über einen Bereich von +/- 10V oder 0 - 10V mit 12 Bit Auflösung. Nur zwei Kanäle wurden hier verwendet, siehe Tabelle 2-5.

**Tabelle 2-5 Analoge Ausgangssignale**

Kanal	Signalbezeichnung	Bemerkung
0	n_Sollwert_für_MD	Drehzahlsollwert des Generators für Master Drive
1	Ankerstrom_soll	Ankerstromsollwert für Lenze-Umrichter

Die Kabel, die aus den Geräten kommen, enthalten gemischte Signale. Sie werden gemäß den verwendeten Karten in drei Gruppen gegliedert, welche sich in binäre Ein- und Ausgangssignale, analoge Eingangssignale und analoge Ausgangssignale unterteilen. Leitungen desselben Typs werden in einem D-Sub Stecker zusammengeführt und an der Karte angeschlossen<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Die Pinbelegungen des D-Sub Steckers wurden als Bilddateien auf der beigefügten CD hinterlegt.

## 2.3 Prozessvisualisierungssystem WinErs

Zur Prozessvisualisierung wurde im ursprünglichen Projekt WinErs verwendet. WinErs ist ein Prozessleit-, Automatisierungs- und Simulations-System mit integrierter Soft-SPS<sup>6</sup> und wurde vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop entwickelt.

Ein vollständiges WinErs-Projekt besteht aus Prozessbildern (Abbildung 2-3) und Blockstrukturen (Abbildung 2-4). In einem Prozessbild werden alle Bedienelemente platziert. Ein Projekt kann aus mehreren Prozessbildern bestehen. Zwischen den einzelnen Prozessbildern können mit Bedingungsabfrage umgeschaltet werden, z. B. durch Betätigen eines Buttons. Eine Blockstruktur besteht aus verdrahteten Blöcken. Das Projekt kann ebenfalls aus mehreren Blockstrukturen bestehen. Durch Freigabe der Steuerung werden alle Prozessbilder und Blockstrukturen aktiviert und zyklisch abgearbeitet.

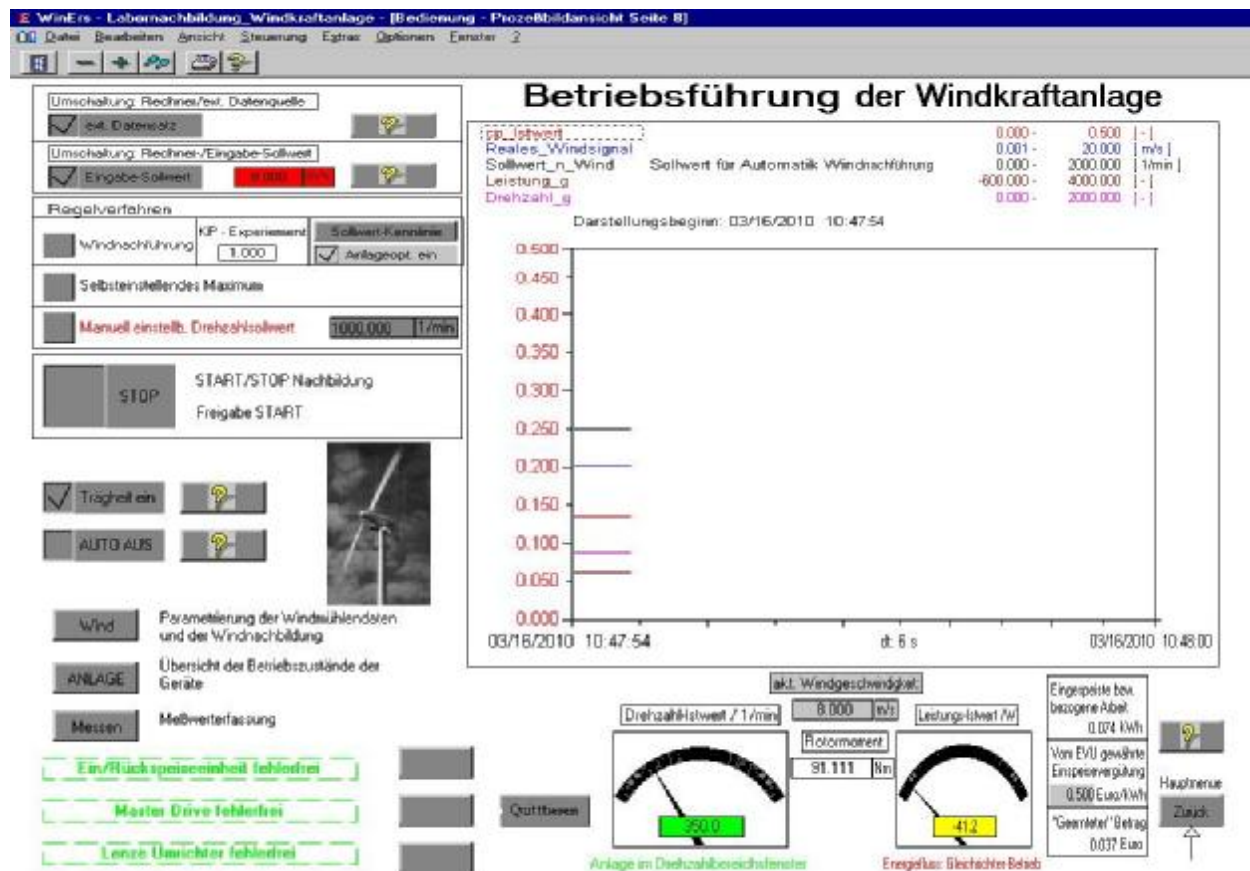


Abbildung 2-3 Prozessbild eines WinErs-Projektes

<sup>6</sup> Speicherprogrammierbare Steuerung ohne Hardwarekomponenten(virtuell)

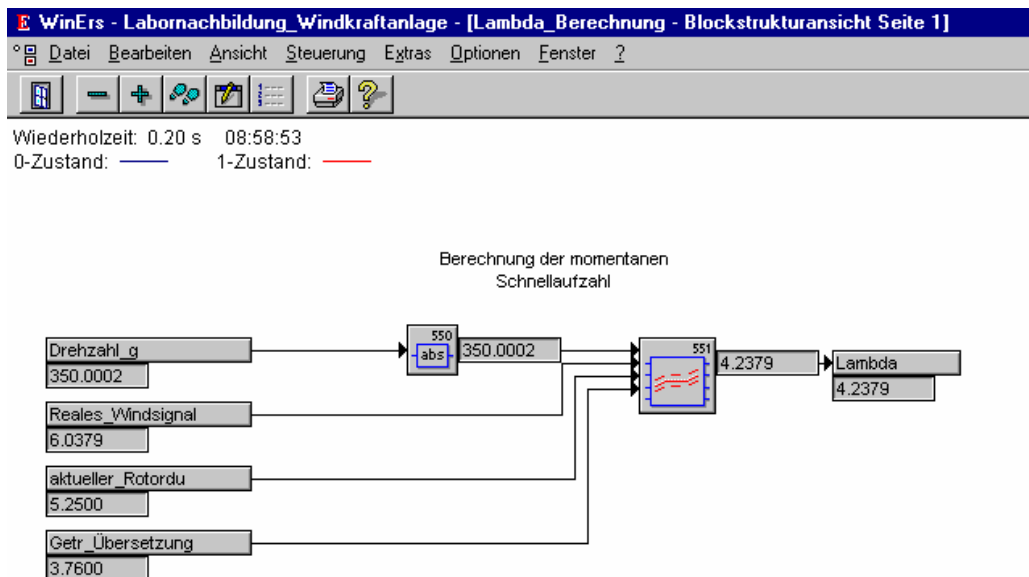


Abbildung 2-4 Blockstruktur eines WinErs-Projektes<sup>7</sup>

### 2.3.1 Gliederung der Blockstrukturen

Ein Projekt setzt sich aus mehreren Prozessbildern zusammen, wodurch das Erkennen der Zusammenhänge der einzelnen Strukturen und der Signalflüsse erschwert werden. Eine Gliederung dient zum besseren Verständnis des Programms.

Die Blockstrukturen werden in vier Gruppen gegliedert: Hardware, Simulation, Visualisierung und Daten. Unter jeder Gruppe werden alle Blockstrukturen zusammengefasst, die zu einer Aufgabe gehören. Als Beispiel zeigt die Abbildung 2-5 die gegliederten Blockstrukturen zur Ermittlung des Ankerstromsollwertes, welcher für die Steuerung der Gleichstrommaschine zuständig ist. Die Gliederung erleichtert die Umsetzung der Steuerungslösung in LabView<sup>8</sup>.

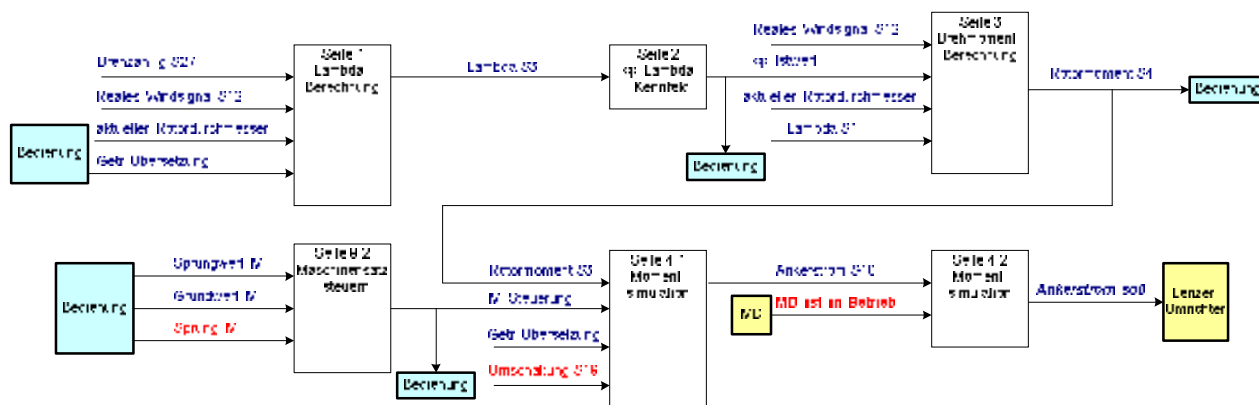


Abbildung 2-5 Blockstrukturen für Ermittlung des Ankerstromsollwertes

<sup>7</sup> [21] Blockstruktur Seite 1

<sup>8</sup> Weitere Gliederungen siehe Bilddateien auf beigefügter CD.

### 3 Einführung in die neue Entwicklungsumgebung

In diesem Kapitel wurden die Änderung im Grundaufbau des Labormodells und die Eigenschaften des neuen Ein- und Ausgabensystems beschrieben. Am Ende wird eine Einführung in die grafische Programmiersprache von LabView gegeben.

#### 3.1 Änderung im Grundaufbau der nachgebildeten WEA

Die einzige Änderung im Grundaufbau ist die Signalerfassung außerhalb des Rechners (siehe Abbildung 3-1). Das Wago I/O-System 750 sammelt die Signale aus allen Geräten der Windenergieanlage. Über ein Netzwerkkabel werden die Daten vom Wago I/O-System 750 an den PC gesendet bzw. von dem PC empfangen. Der Versuchsaufbau bleibt hierbei unverändert. Auch die Signale werden unverändert in das neue System übernommen.

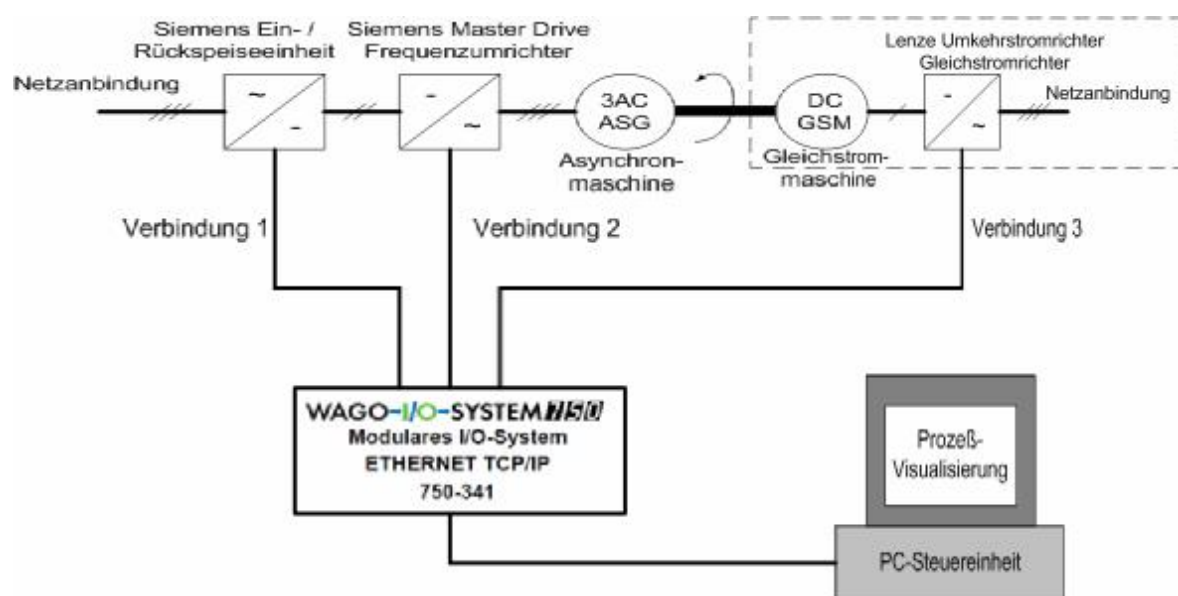


Abbildung 3-1 Geänderter Aufbau des Labormodells „Windenergieanlage“



## 3.2 Eigenschaft des Wago I/O-Systems 750

Als Auswahl gab es zwei Möglichkeiten: ein Datenerfassungsgerät von NI z. B. National Instruments Analog/Digital-I/O-Modul oder ein Ein- und Ausgabegerät vom anderen Hersteller z. B. Wago I/O-System. Der Vorteil für ein NI Datenerfassungsgerät liegt darin, dass die Hardware mit LabView kompatibel ist. Die Schwierigkeit bei der zweiten Lösung wäre die Kommunikation zwischen dem Gerät und der Software LabView. Aufgrund der geringeren Anschaffungskosten und des besseren Supports des Herstellers, wurde sich für das Wago-System entschieden.

### 3.2.1 Beschreibung des Wago Feldbus-Kopplers 750-341

Der Feldbus-Koppler 750-341 (Abbildung 3-2) verbindet die Busklemmen über den Feldbusanschluss mit dem Ethernet. Nach dem Anschluss mit Ethernet ermittelt der Koppler die angereichten Busklemmen und erstellt daraus ein lokales Prozessabbild mit dem Eingangs- und Ausgangsbereich (Abbildung 3-3). Die analogen Daten werden zuerst wortweise nach der Reihenfolge der Kanäle ins Prozessabbild angehängt und dann die digitalen Daten als ein Wort ins Prozessabbild hinzugefügt. Für den Datenaustausch werden Netzwerkprotokoll Modbus TCP oder UDP verwendet.

Die Konfigurationsschnittstelle wurde nicht verwendet. Stattdessen wurde das Gerät über einem vom Koppler zur Verfügung gestellten Webserver konfiguriert, indem die Konfiguration über die IP-Adresse im WEB-Browser aufgerufen wird.

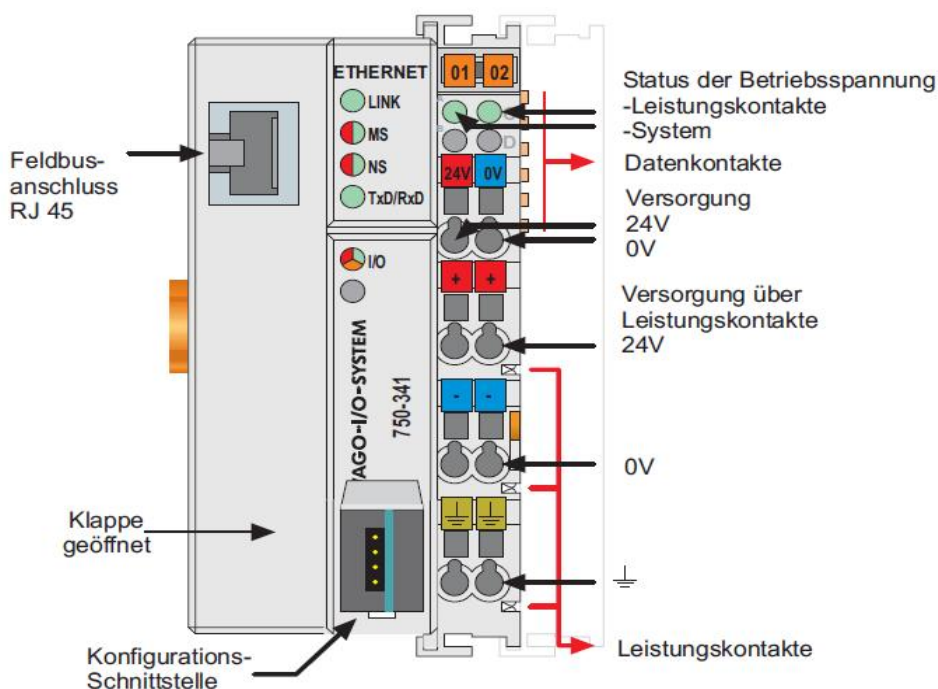


Abbildung 3-2 Buskoppler 750-341<sup>9</sup>

<sup>9</sup> [13] Seite 46, Abbildung 3.1-1

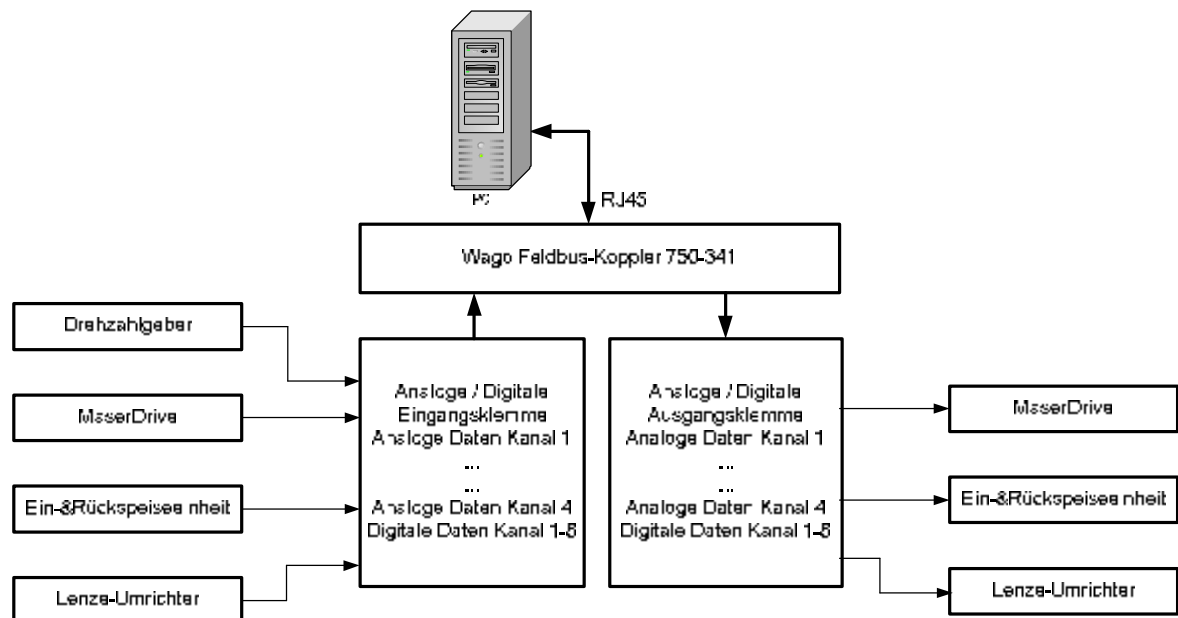


Abbildung 3-3 Prozessabbild des Wago I/O-Systems 750

### 3.2.2 Beschreibung der Wago Busklemmen 750-xxx

Zum Datenaustausch wurden jeweils eine Eingangs- und Ausgangsklemme für digitale und analoge Übertragung der Signale benötigt. Zum Verbinden des Wago I/O-Gerätes mit der Anlage müssen drei Kabelanschlüsse mit D-Sub Stecker wie bei den Anschlüssen der ADDI Data-Karten nachgebaut werden. Auf einer Seite werden die Kabel mit der Anlage verbunden und auf anderer Seite mit den Busklemmen.

#### 3.2.2.1 Digitale Eingangsklemme 750-430

Mit der digitalen Eingangsklemme 750-430 können acht Kanäle mit 3 ms abgetastet werden. Die Eingänge sind positiv schaltend. Alle Signale werden unverändert übernommen bis auf die Kanalnummer (siehe Abbildung 3-5). Da auf der Klemme kein freier Anschluss für die Masse vorhanden ist, muss zusätzlich eine gemeinsame Masse für alle Eingänge zur Verfügung gestellt werden, z. B. die Masse vom Buskoppler zu benutzen.

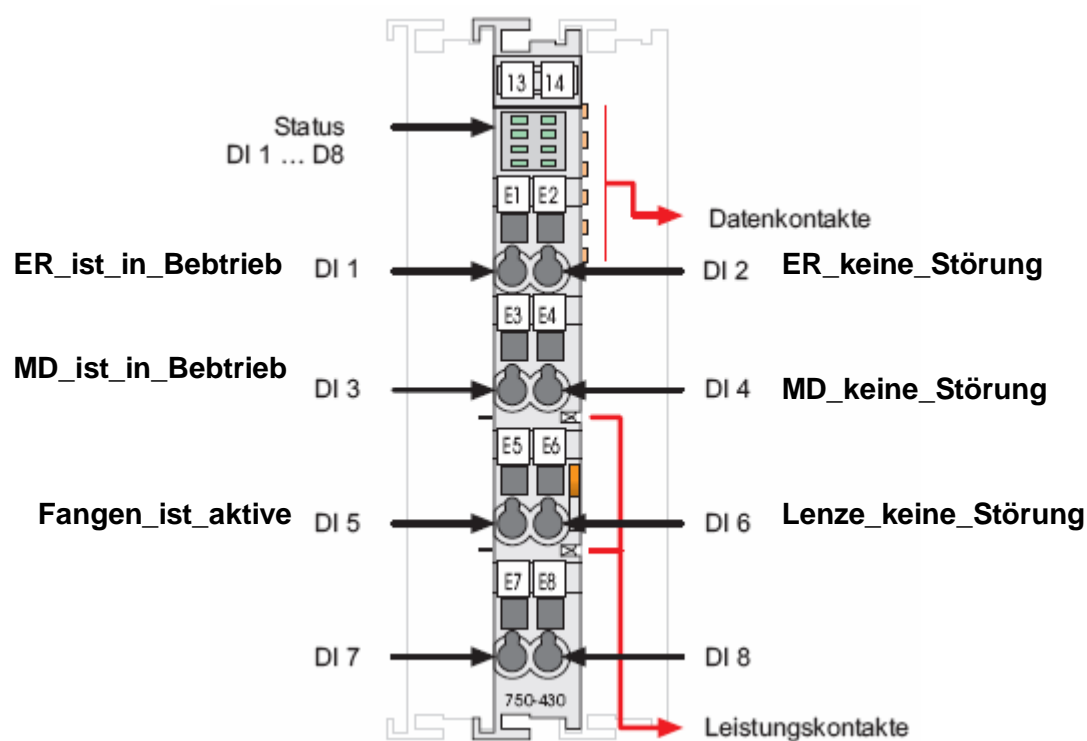


Abbildung 3-4 8-Kanal Digitale Eingangsklemme 750-430<sup>10</sup>

<sup>10</sup> [14] Seite 7, Abbildung 2.1.1-1

### 3.2.2.2 Digitale Ausgangsklemme 750-530

Die digitale Ausgangsklemme 750-530 besitzt ebenfalls acht digitale Ausgänge und die Ausgänge sind positiv schaltend. Die benutzten Kanäle werden in der Abbildung 3-5 gezeigt. Die Masse muss ebenfalls zusätzlich zur Verfügung gestellt werden.

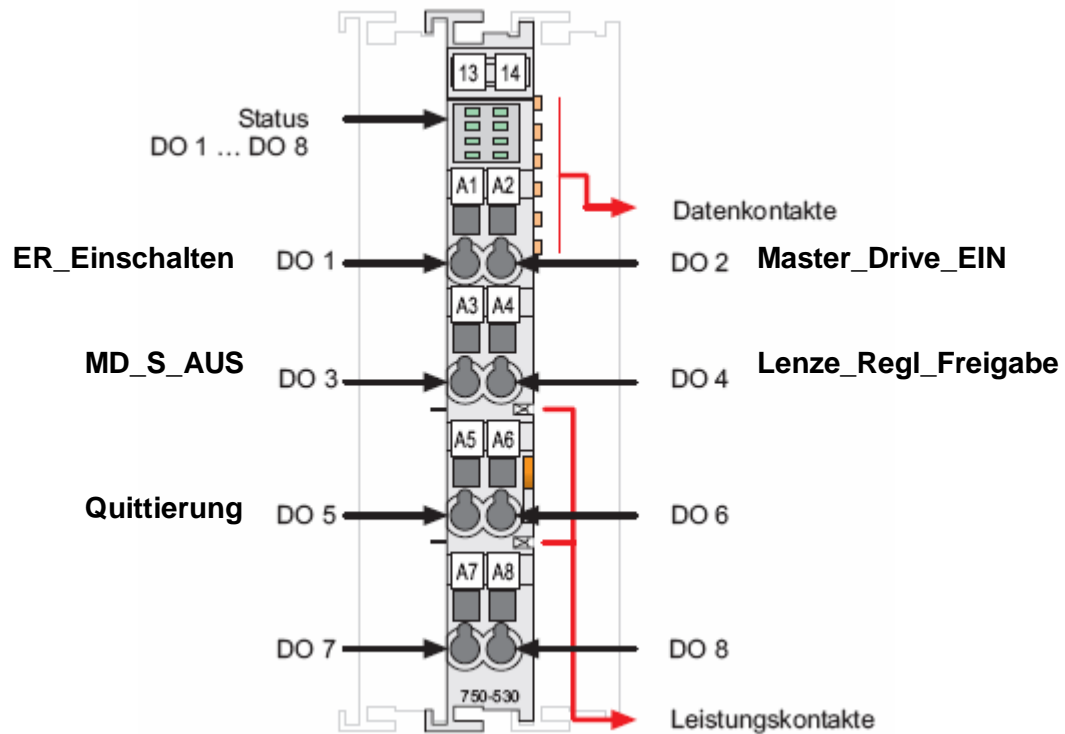


Abbildung 3-5 8-Kanal Digitale Ausgangsklemme 750-530<sup>11</sup>

<sup>11</sup> [16], Seite 7, Abbildung 2.1.1-1

### 3.2.2.3 Analoge Eingangsklemme 750-457

Die analoge Eingangsklemme 750-457 besitzt nur vier Single-Ended Eingänge. Der Eingangsbereich liegt zwischen -10V und +10V. Die Abbildung 3-6 stellt die Kanalbelegung dieser Klemme dar. Die Kanäle besitzen ein gemeinsames Massepotential. Alle vier Kanäle werden verwendet. Falls später weitere Eingänge benötigt werden, muss eine zweite Eingangsklemme beschafft werden. Die I/O-Klemme lässt sich mühelos erweitern.

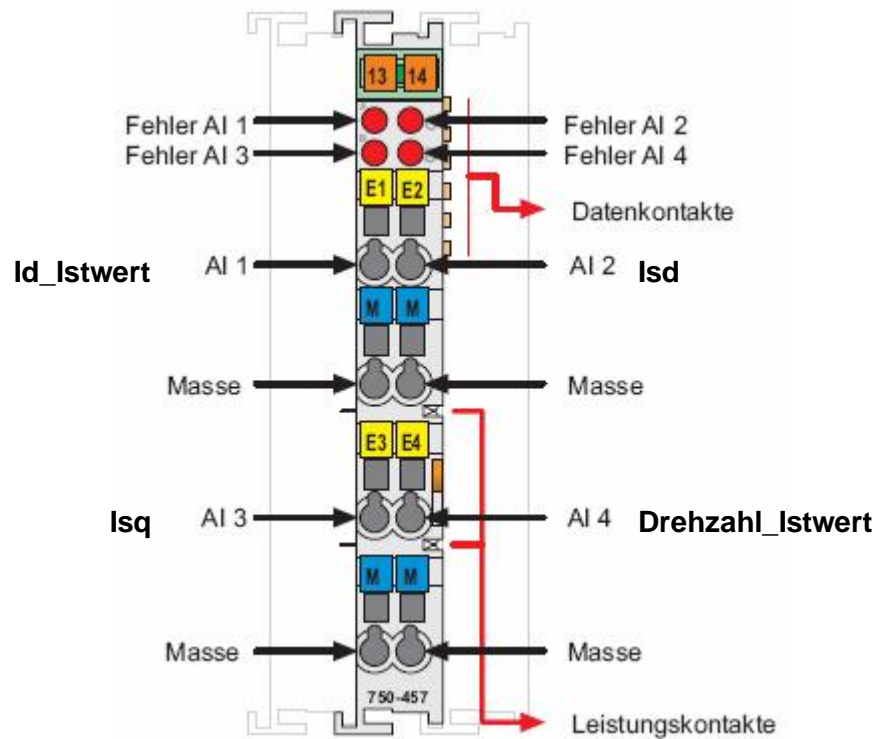


Abbildung 3-6 4-Kanal Analog Eingangsklemme 750-457<sup>12</sup>

<sup>12</sup> [15] Seite 7, Abbildung 2.1.1-1

### 3.2.2.4 Analoge Ausgangsklemme 750-559

Die analoge Ausgangsklemme 750-559 besitzt vier analoge Ausgänge mit dem Wertbereich von 0 bis 10V. Ein gemeinsames Massepotential ist ebenfalls bei dieser Klemme vorhanden.

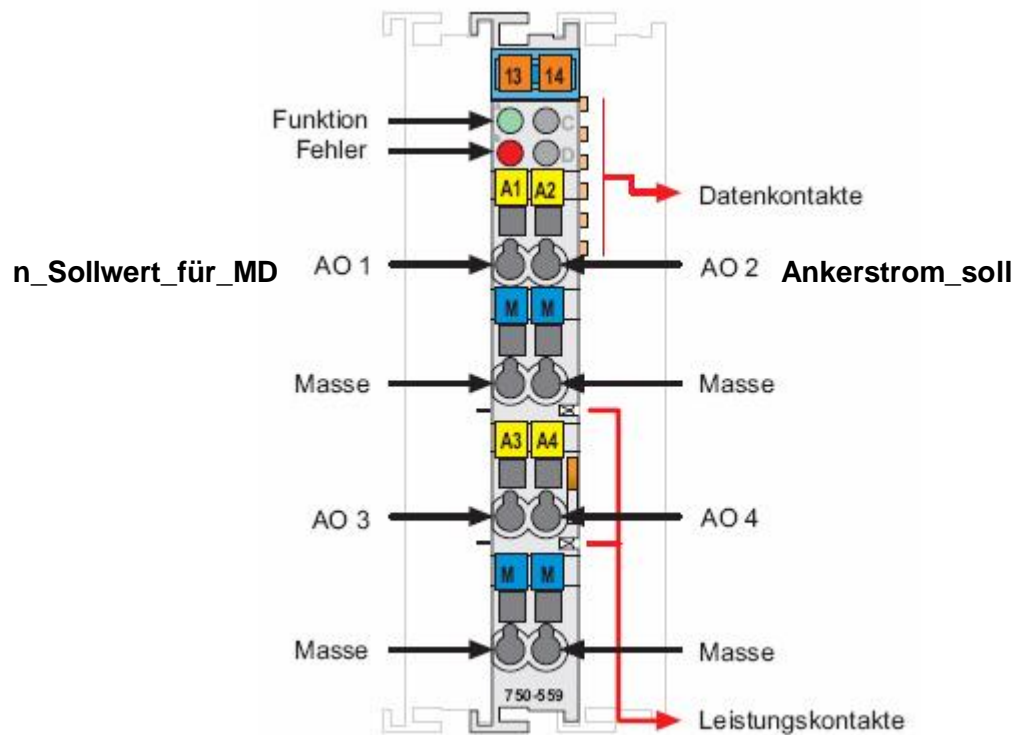


Abbildung 3-7 4-Kanal analoge Ausgangsklemme 750-559<sup>13</sup>

<sup>13</sup> [17] Seite 7, Abbildung 2.1.1-1

### 3.2.2.5 Wago Busendlemme 750-600

Die Busendklemme 750-600 (Abbildung 3-8) wird am Ende der Ein- und Ausgangsklemme eingesetzt. Für das Wago I/O-System 750 ist diese Endklemme notwendig, um eine ordnungsgemäße Datenübertragung zu garantieren.

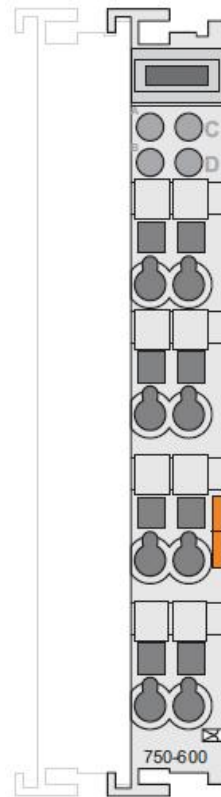


Abbildung 3-8 Bus-Endklemme 750-600<sup>14</sup>

## 3.3 Grafisches Programmiersystem NI LabView

Die grafische Programmiersprache LabView von NI hat sich in den letzten Jahren sehr weit verbreitet und ist für die Entwicklung dieses Projektes sehr gut geeignet, besonders für das Erstellen grafischer Bedienoberfläche und Prozessvisualisierung.

Labview ist eine grafische Programmiersprache von National Instruments. LabView steht für „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“ und wird hauptsächlich in den Bereichen der Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik angewendet. Die erstellten LabView-Programme werden als „Virtuelle Instrumente“, kurz VI, bezeichnet. Ein VI besteht aus zwei Komponenten: das Frontpanel und das Blockdiagramm. Ein LabView Projekt besteht aus einem main-Programm und mehreren Unterprogrammen.

<sup>14</sup> [17] Seite 7, Abbildung 2.1.1-1

## 1) Frontpanel

Das Frontpanel enthält die Benutzerschnittstelle. Durch Anklicken der rechten Maustaste erscheint die Element-Palette, welche verschiedene Elemente für die Gestaltung beinhaltet. Wird das gewünschte Element ausgewählt und in das Frontpanel gezogen, wird das Element hinzugefügt (siehe Abbildung 3-10). Im Frontpanel wird nicht programmiert, sondern nur die Bedienoberfläche bearbeitet.

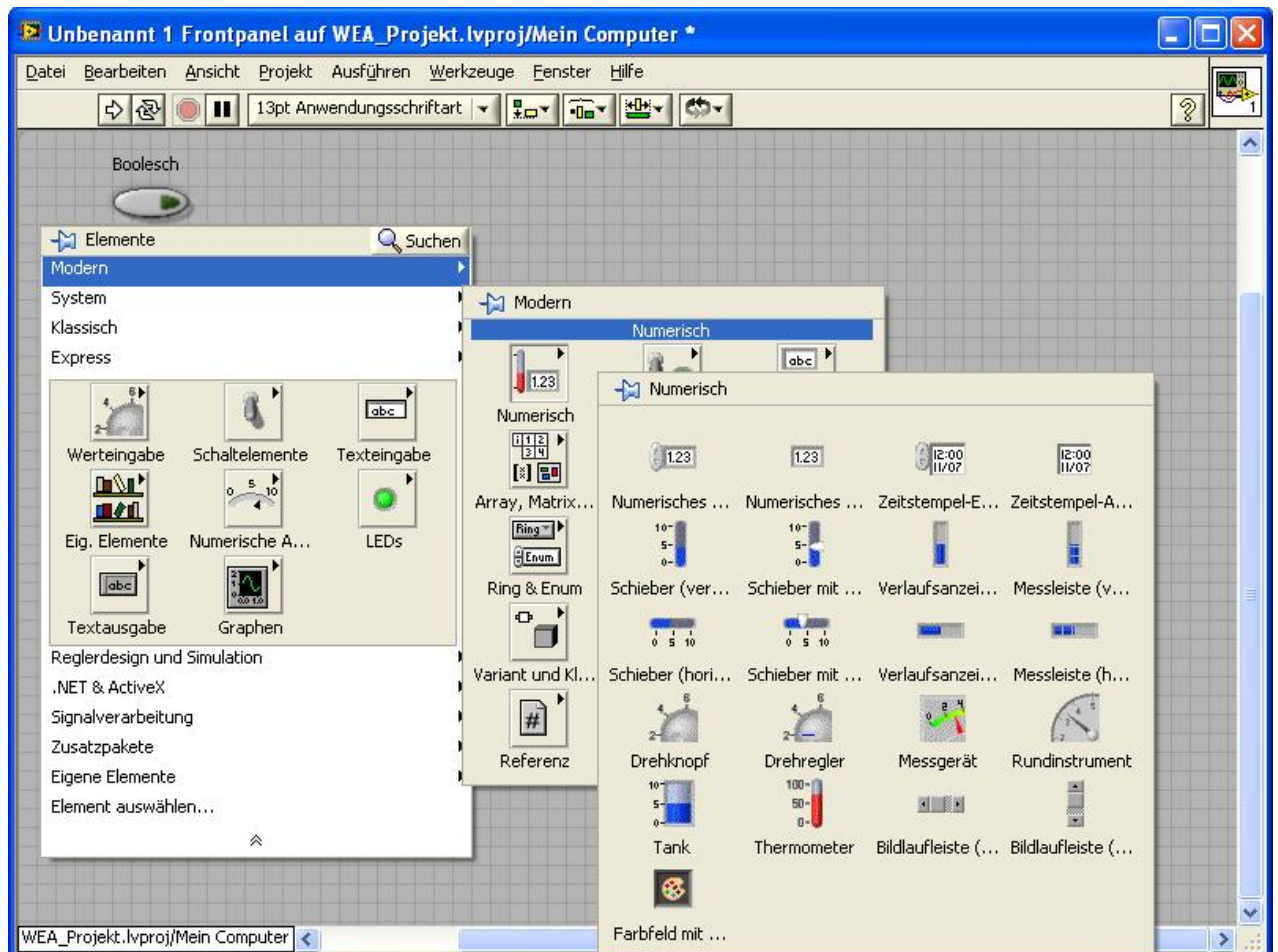


Abbildung 3-9 Frontpanel mit Bedienelement



## 2) Blockdiagramm

Das Blockdiagramm enthält den grafischen Programmcode. Nach dem Platzieren des Bedienelementes im Frontpanel wird im Blockdiagramm automatisch ein Elementsymbol erzeugt, welches dem Bedienelement entspricht (siehe Abbildung 3-10). Hier wird das Elementsymbol programmiert. Die Funktionspalette enthält alle Funktionsblöcke, die von LabView zur Verfügung stehen. Durch Anbindung zusätzlicher LabView Bibliotheken kann die Funktionsplatte beliebig erweitert werden.

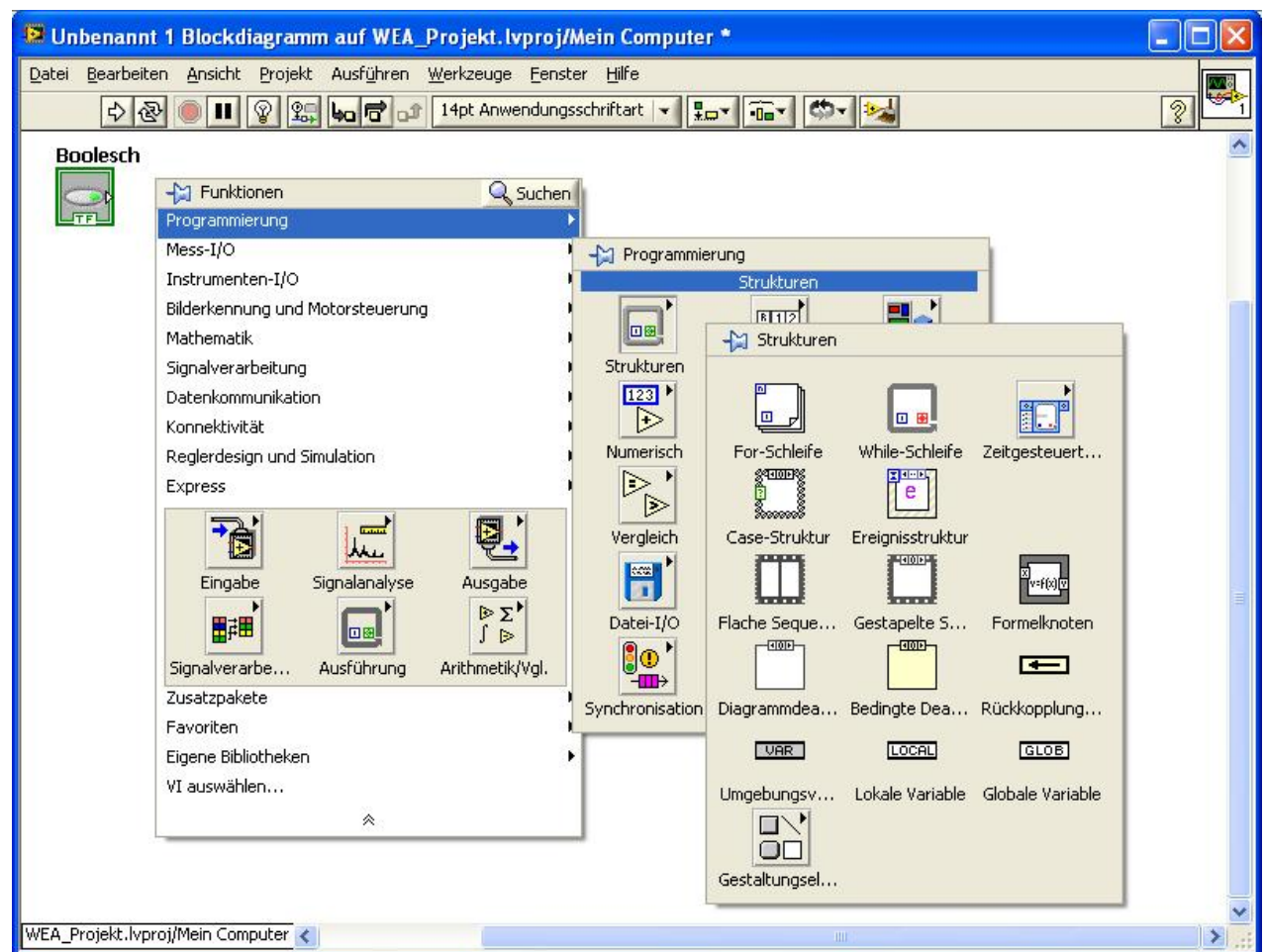
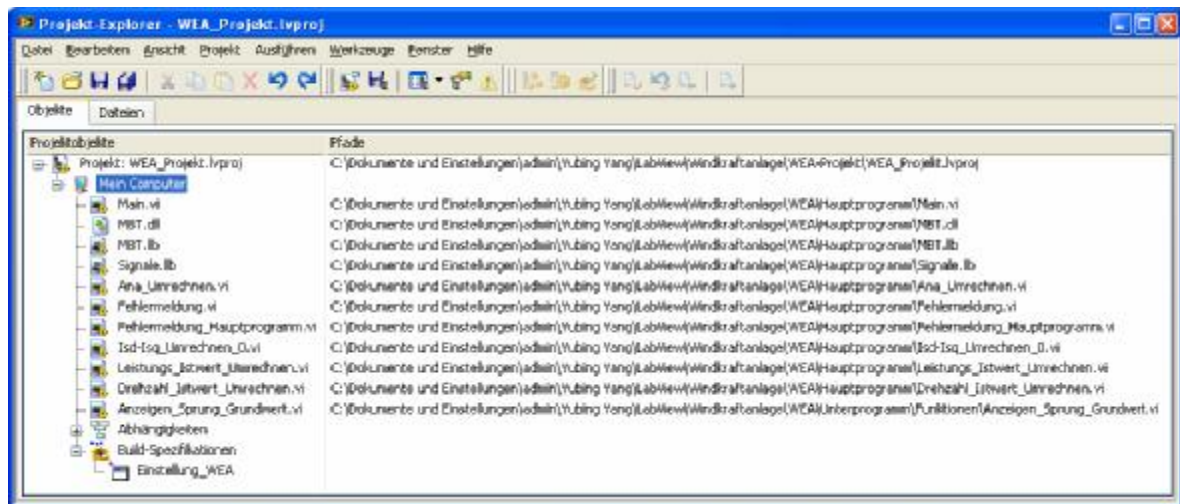


Abbildung 3-10 Diagramm mit Elementsymbol

### 3) LabView Projekt

Ein Projekt besteht aus mehreren Dateien. Ein Projekt-Explorer (Abbildung 3-11) ermöglicht, alle zu einem Projekt gehörenden Dateien zusammen zu stellen und zu verwalten. Dadurch wird eine bessere Übersicht gewährleistet.



**Abbildung 3-11 LabView Projekt-Explorer**

Ein Projekt kann aus einem main-Programm und mehreren Unterprogrammen bestehen. Ein main-Programm enthält den übergeordneten Programmcode und wird anschließend kompiliert. Die Unterprogramme, auch SubVIs genannt, sind untergeordnete Programme und können vom main-Programm oder auch von anderen Unterprogrammen aufgerufen werden. Sie müssen eigenständig lauffähig sein. Durch Verwendung eines Unterprogrammes wird ein umfangreiches Programm in einfache Teile zerlegt und dadurch besser verständlich<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Eine tiefer eingehende Einführung in Labview siehe [3]

### 3.3.1 Wago LabView Bibliothek

Zur Vereinfachung der Verbindung zwischen LabView und dem Wago Bussystem steht eine LabView Bibliothek MBT.llb von der Firma Wago zur Verfügung. Diese Bibliothek enthält die wichtigen Funktionen, wie z. B. MBTConnect zum Aufbau der Verbindung, zur Kommunikation unter dem LabView-System mit den Busklemmen. Im Kapitel 4.1.1 „Verbindung mit Wago-Klemmen“ werden die verwendeten Funktionen ausführlich erläutert.

### 3.3.2 Gliederung der SubVIs

Die Gliederung der SubVIs für LabView wurden wenig verändert, da die Ein- und Ausgänge der einzelnen Blockstruktur übernommen wurden. Daher bleibt der Zusammenhang zwischen den Blockstrukturen unverändert. Zu erwähnen ist, dass die SubVIs im LabView, wie in der Abbildung 3-12 zeigt wird, beim Programmieren tatsächlich mit Drähten verbunden sein müssen und im WinErs nicht<sup>16</sup>.

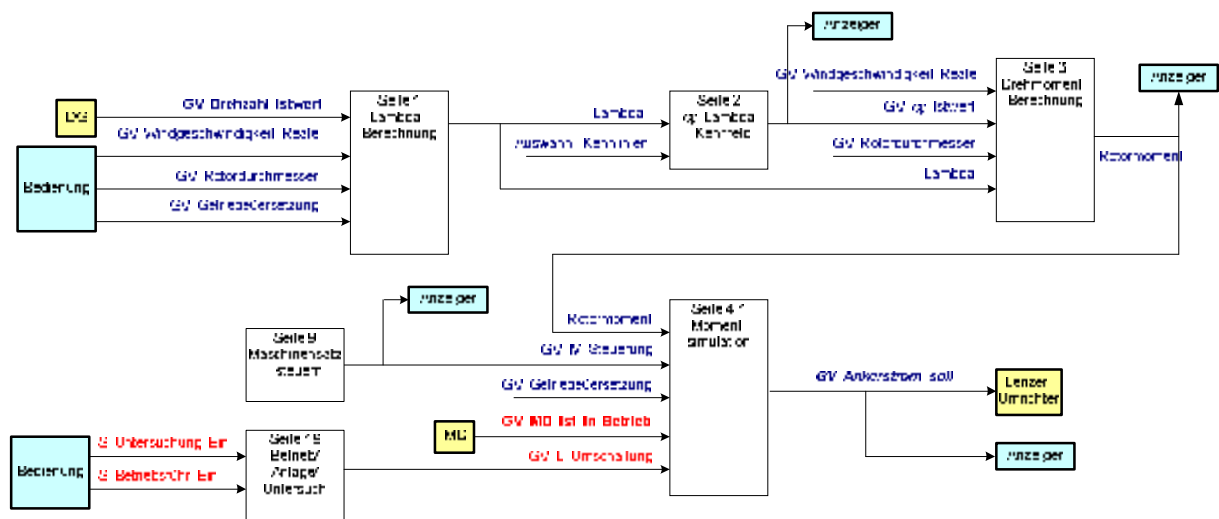


Abbildung 3-12 Gliederung der SubVIs

<sup>16</sup> Weitere Gliederungen sind als Bilddateien auf beigefügter CD zu finden

## 4 Realisierung mit LabView

In diesem Kapitel wird auf die Einzelheiten der Realisierung mit LabView eingegangen. Im ersten und zweiten Abschnitt werden die Aufgaben des main-Programmes und der SubVIs beschrieben. Im dritten Abschnitt wird das Erstellen einer ausführbaren Datei erläutert. Anschließend wird das Verhalten des neuen Systems mit dem Verhalten des alten Systems verglichen.

### 4.1 Aufgaben des main-Programms

Zum Starten der Steuerung wird das Main-Programm aufgerufen. Hauptsächlich wurden folgende Funktionen im Main-Programm ausgeführt:

- 1) Die Geräte können nach einer definierten Reihenfolge ein- und ausgeschaltet werden.
- 2) Die Verbindung zwischen LabView und Wago Busklemmen wird aufgebaut.
- 3) Die ein- und ausgehenden Signale werden hier in die gewünschte Form umgewandelt und zur Datenübertragung bereitgestellt.
- 4) Die Bedienoberfläche für die grafische Darstellung der Signale wird festgelegt.

#### 4.1.1 Aufbau der Verbindung zwischen Wago-Klemmen und LabView

Wie im Kap. 3.3.1 beschrieben kann LabView mit Hilfe der Bibliothek MBT.llb mit den Busklemmen kommunizieren. Das Flussdiagramm in der Abb. 4-1 zeigt einen einfachen Ablauf für die Verbindung des Lesens und Schreibens. Mit der Funktion „MBTConnect“ wird die Verbindung aufgebaut. Solange kein Stop-Signal vorhanden ist, werden die Funktion „MBTReadRegister“ und „MBTWriteRegister“ zyklisch aufgerufen und die Daten von den Eingängen gelesen bzw. an die Ausgänge geschrieben. Mit der Funktion „MBTDisconnect“ wird die Verbindung getrennt.

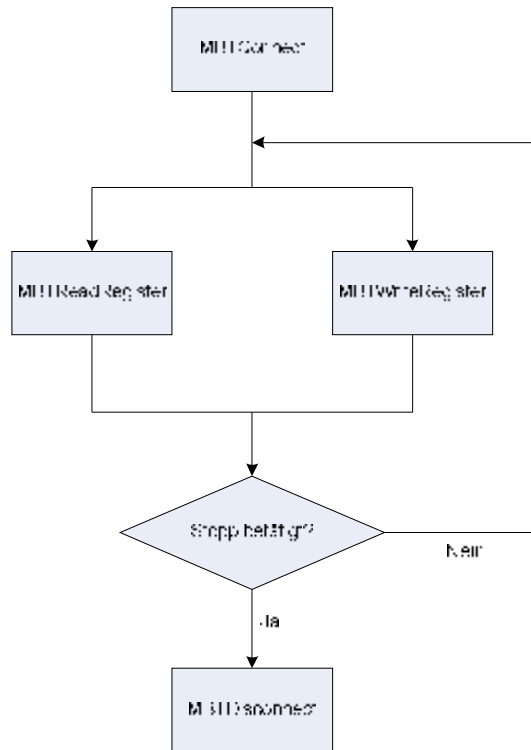


Abbildung 4-1 Flussdiagramm für den Verbindungsaufbau

4.1.1.1 MBTConnect

Durch die Übergabe der IP-Adresse des Buskopplers (192.168.10), der Kommunikationsart (hier useTCP=False) und der Fehlereingang wird die Verbindung mit den Busklemmen hergestellt. Die Funktion gibt den hSocket und den Fehlerausgang aus. Der hSocket ist eine Handle-Nummer für die erzeugte Verbindung. Diese Nummer bleibt unverändert und wird später beim Lesen und Schreiben bzw. zur Trennung der Verbindung benötigt.

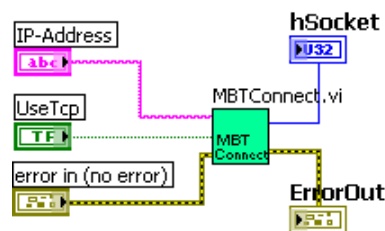


Abbildung 4-2 MBTConnect

4.1.1.2 MBTReadRegister

Mit der Funktion MBTReadRegister (oberes Bild in der Abbildung 4-3) können sowohl die digitalen als auch die analogen Eingangsklemmen gelesen werden. Die numWords ist die Anzahl der zu lesenden Worte. Da die analogen Werte wortweise, die digitalen Werte bitweise gelesen und als Wort gespeichert werden, ist hier „5“ einzugeben: vier Worte für die 4-kanalige analoge Eingangsklemme und ein Wort für die 8-kanalige digitale

Eingangsklemme.

Die Rückgabe ist ein eindimensionaler Array mit fünf Werten (siehe unteres Bild in der Abbildung 4-3).

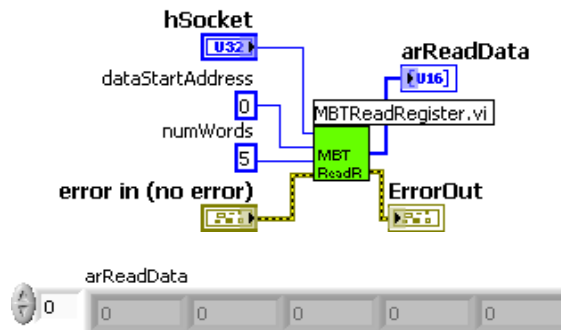


Abbildung 4-3 MBTReadRegister

#### 4.1.1.3 MBTWriteRegister

Die Funktion „MBTWriteRegister“ kann die Werte in die digitalen und in die analogen Ausgangsklemmen schreiben, indem man die zu schreibenden Werte in einem Array zusammenfasst und an die Funktion übergibt (siehe Abbildung 4-4). Ebenfalls werden zuerst die analogen Werte und dann die digitalen Werte geschrieben.

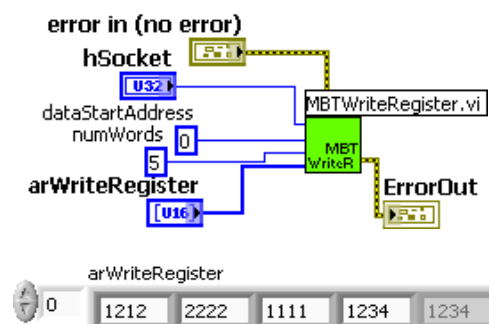


Abbildung 4-4 MBTWriteRegister

#### 4.1.1.4 MBTDisconnect

Zum Abtrennen der Verbindung wird die Funktion MBTDisconnect aufgerufen. Getrennt wird nur die Verbindung mit der angegebenen hSocket-Nummer. Es können mehrere Verbindungen vorhanden sein.

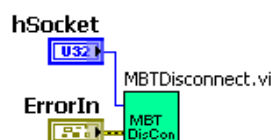


Abbildung 4-5 MBTDisconnect

## 4.1.2 Bearbeitung der Signale

Die gelesenen Signale vom ReadRegister müssen hier in die gewünschte Form umgewandelt werden. Die zu schreibenden Signale müssen für die WriteRegister bereitgestellt werden. Sowohl zum Lesen als auch zum Schreiben benötigt man ein eindimensionales Array mit fünf Werten. Das Array enthält die digitalen und analogen Daten. Zu beachten ist, dass bei analogen Signalen ein Wert einem Kanal entspricht und bei digitalen ein Wert acht Kanälen entspricht. Die Werte werden mit der entsprechenden Funktion getrennt.

### 4.1.2.1 Analoge Eingangssignale

Die gelesenen Werte müssen nach dem Index des Arrays (siehe Abbildung 4-6) zugewiesen werden. Die ersten vier Arrayelemente sind analoge Signale und das 4. enthält digitale Signale. Für analoge Eingangssignale werden nur die ersten 4 Werte benötigt (siehe „Array indizieren“ in der Abbildung 4-7).



Abbildung 4-6 Array mit gelesenen Werte vom ReadRegister

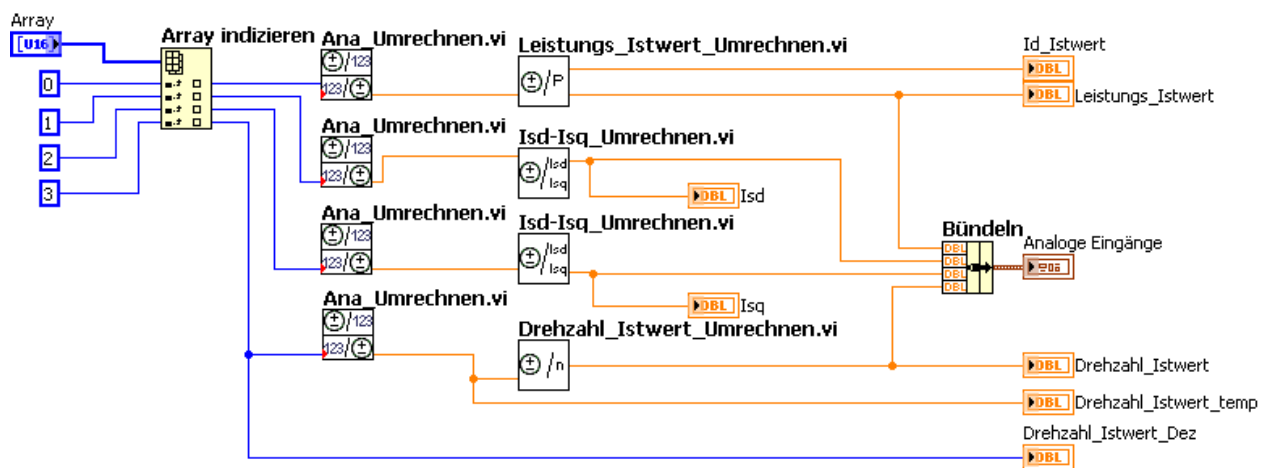


Abbildung 4-7 Bearbeitung der analogen Eingangssignale

Die zugewiesenen Werte müssen in die gewünschte Form umgerechnet werden. Für die Umrechnung werden folgende Funktionen erstellt:

#### 1) Funktion „Ana\_Umrechnen“

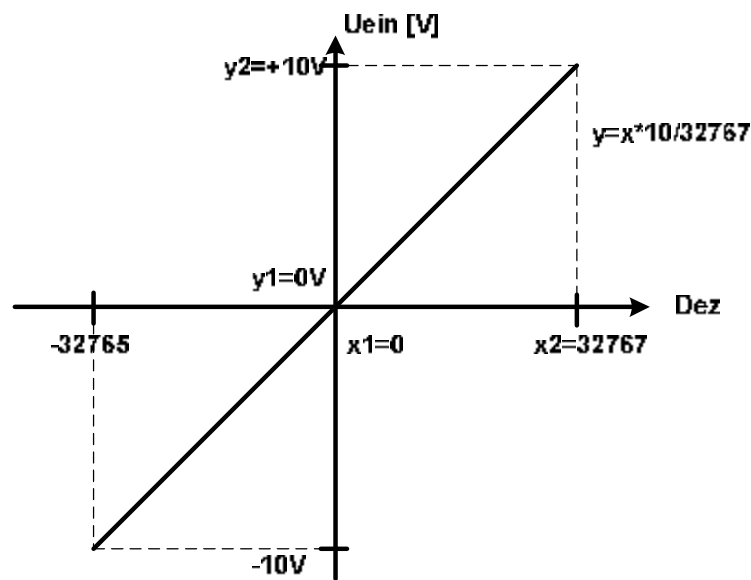
Diese Funktion kann eine Dezimalzahl in Spannung mit Hilfe einer Geradengleichung umgerechnet werden. Die Steigung  $m$  und der Achsenschnitt  $b$  von einer Geradengleichung lässt sich mit der Formel 4-2 und 4-3 berechnen.

$$y = m \cdot x + b \quad 4-1$$

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad 4-2$$

$$b = y_1 - m \cdot x_1 = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 = \frac{x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1}{x_1 - x_2} \quad 4-3$$

Aus der Abbildung 4-8 ist der Achsenabschnitt sofort zu erkennen, weil die Gerade durch die Ursprung ist.



**Abbildung 4-8 Skalierung des analogen Eingangs**

Für die Berechnung der Eingangsspannung wird mit Hilfe der Abbildung 4-8 wurde folgende Formel erstellt:

$$y = x \cdot \frac{10V}{32767} \quad 4-4$$

## 2) Leistungs\_Istwert\_Umrechnen

Der Leistungsistwert ist mit Hilfe einer Geradenfunktion zu berechnen (siehe Abbildung 4-9). Die Steigung  $m$  und der Achsenabschnitt  $b$  lassen sich ebenfalls mit der Gleichung 4-2 und 4-3 ermitteln.



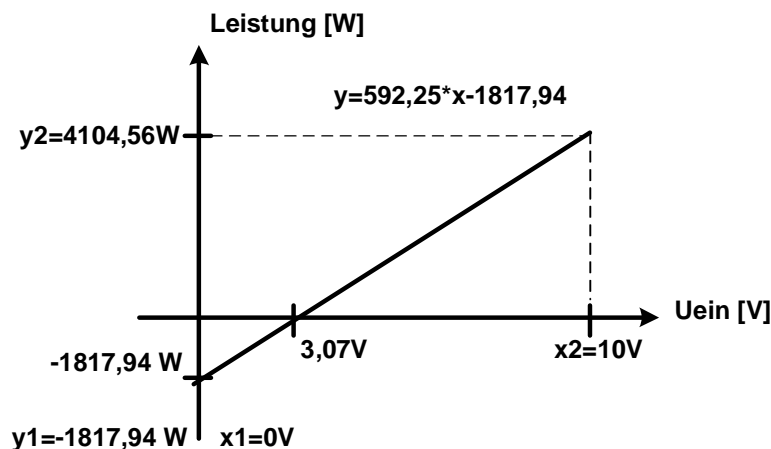


Abbildung 4-9 Berechnung der Leistungsistwerte

Die max. und min. Leistung 4104,56W und -1817,94W wurden aus dem alten Programm abgelesen. Damit wurde die Gleichung 4-5 für die Berechnung des Leistungsistwertes erstellt.

$$P_{\text{ist}} = 592,25 \left[ \frac{\text{W}}{\text{V}} \right] \cdot P[\text{V}] - 1817,94[\text{W}] \quad 4-5$$

### 3) Isd-Isq\_Umrechnen

Die momentbildenden (Isq) und flussbildenden (Isd) Stromkomponenten sind eine im Master Drive umgerichtete Größe. Wenn die Asynchronmaschine im Generatorbetrieb arbeitet, ist die momentbildende Stromkomponente negativ. Im Fall des Motorbetriebs ist sie im positiven Bereich. Die flussbildende Stromkomponente ist relativ konstant. Berechnet wurde mit folgender Gleichung:

$$I_{\text{ist}} = \frac{(I[\text{V}] - I_{\text{Offset}}[\text{V}])}{I_{\text{Verstärkung}}[\text{V}]} \cdot I_{\text{normiert}}[\text{A}] \quad 4-6^{17}$$

Die Offsetspannung, Spannungsverstärkung und der normierte Strom wurden aus dem Gerät Master Drive abgelesen.

### 4) Drehzahl\_Istwert\_Umrechnen

Mit dieser Funktion wird der gelesene Drehzahlwert in Volt aus dem Drehzahlgeber als Drehzahl ausgegeben. Zur Berechnung wurden die ersten zwei Werte aus der Tabelle A-1 genommen. Dies ist in der Abbildung 4-10 zu erkennen.

<sup>17</sup> Vgl. [7] Seite 4-33

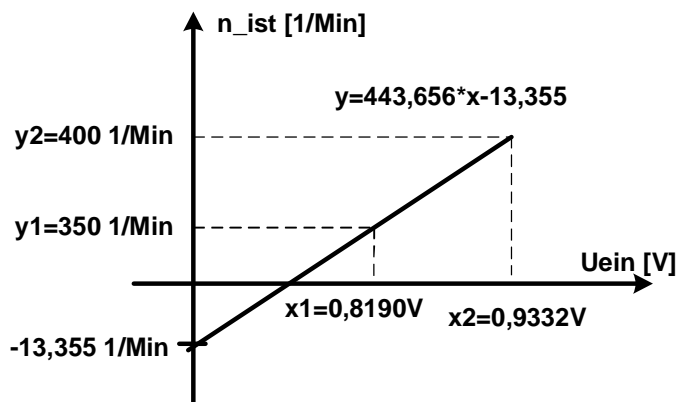


Abbildung 4-10 Berechnung des Drehzahlwertes

Die Steigung und der Achsenabschnitt wurden ebenfalls mit der Gleichung 4-2 und 4-3 berechnet. Damit wurde die Gleichung 4-7 erstellt.

$$n_{ist} = 443,656 \left[ \frac{Min^{-1}}{V} \right] \cdot n[V] - 13,355 [Min^{-1}] \tag{4-7}$$

#### 4.1.2.2 Digitale Eingangssignale

Für die digitalen Eingangssignale muss das fünfte Element des Arrays (Abbildung 4-6) zugewiesen werden. Dieses Element muss so umgeformt werden, dass die Dezimalzahl am Ende binär angezeigt wird (Abbildung 4-11). Der gelesene digitale Eingangswert aus der Abbildung 4-6 ist eine „11“ in Dezimal. Diese Dezimalzahl entspricht einer Binärzahl 1101 000. Das heißt Kanal 1, 2 und 4 sind auf "1" und Kanal 3, 5, 6, 7, 8 auf "0". Allerdings werden hier nur 6 Kanäle benutzt.

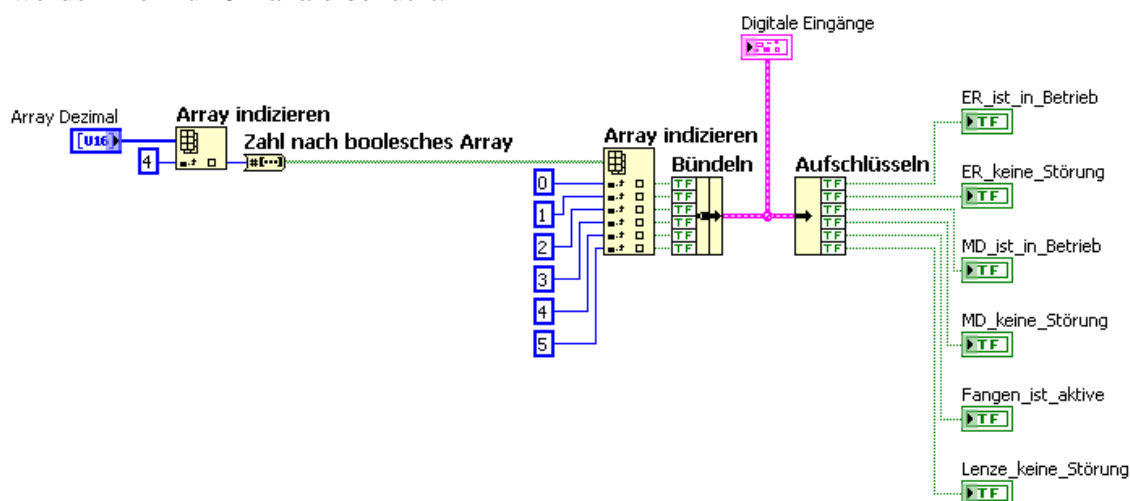


Abbildung 4-11 Blockdiagramm für die digitalen Eingangssignale

### 4.1.2.3 Analoge Ausgangssignale

Die Funktion „WriteRegister“ kann nur dezimale Zahlen verarbeiten. Aus diesem Grund muss die zu schreibende Ausgangsspannung mit der Funktion „Ana\_Umrechnen“ in Dezimal umgewandelt werden. Mit der Abbildung 4-12 kann die Gleichung (4-8) zur Berechnung der Dezimalzahl erstellt werden.

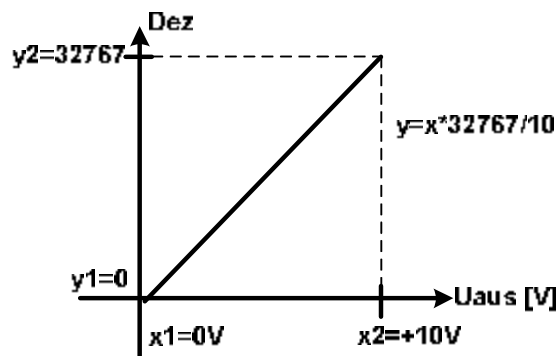


Abbildung 4-12 Skalierung des analogen Ausgangs

$$y = x \cdot \frac{32767}{10V}$$

4-8

Weil die analoge Ausgangsklemme vier Kanäle besitzt, muss das Array um zwei Elemente vergrößert werden, obwohl nur zwei Kanäle benutzt werden. Das erweiterte Array („Array Anzeigen“ in der Abbildung 4-13) wird zum Schreiben bereitgestellt. Im main-Programm wird dieses mit dem digitalen zu schreibenden Werten als ein Array erfasst und zusammen an die Funktion „WriteRegister“ weitergegeben. Der Cluster „Analoge Ausgänge“ dient zur internen Anzeige.

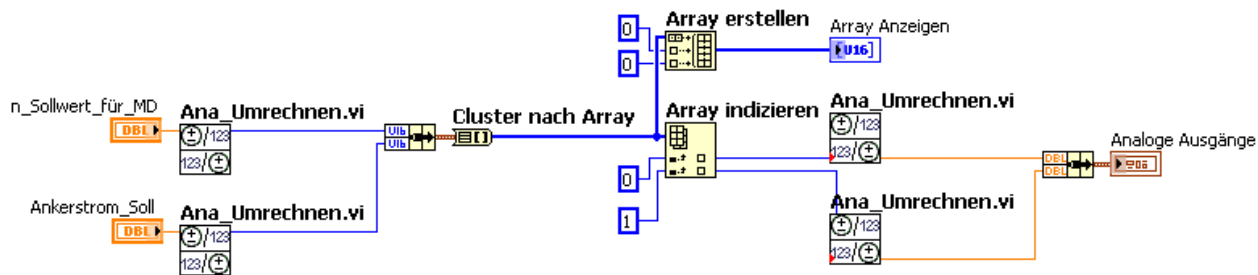


Abbildung 4-13 Blockdiagramm für die analogen Ausgangssignale

### 4.1.2.4 Digitale Ausgangssignale

Das Zusammenfassen der zu schreibenden digitalen Signale ist viel einfacher als bei den analogen Signalen. Für eine digitale Ausgangsklemme mit acht Kanälen wird eine einzige Dezimalzahl benötigt. Das einzelne Signal wird in ein Array gespeichert und in eine Zahl konvertiert (siehe Abbildung 4-14).

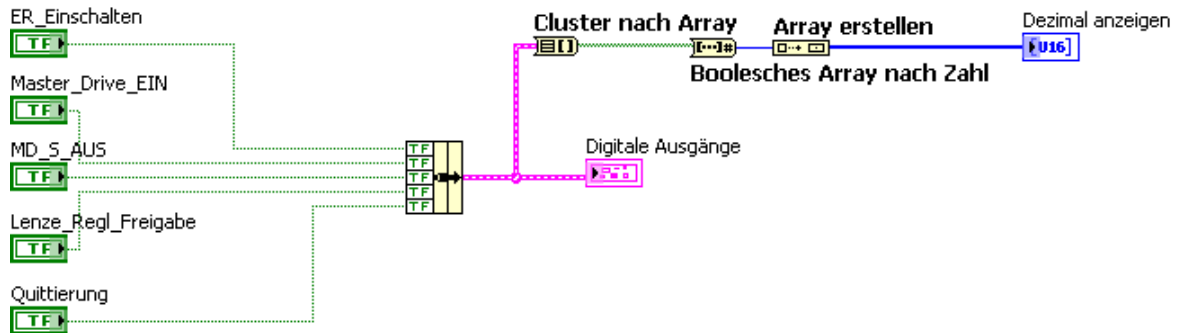


Abbildung 4-14 Blockdiagramm für die digitalen Ausgangssignale

Die Abbildung 4-15 zeigt im main-Programm das Erstellen eines Arrays zum Schreiben von analogen und digitalen Werten.

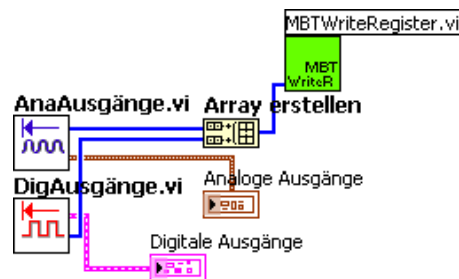


Abbildung 4-15 Zusammenfügen der Array im Main-Programm

In der Abbildung 4-16 ist ein Array mit zwei analogen zu schreibenden Werten und einem digitalen zu schreibenden Wert für 8 Kanäle.



Abbildung 4-16 zu schreibenden Werte für WriteRegister

### 4.1.3 Ein- und Ausschaltkreis der Anlage

Die Reihenfolge zum Ein- und Ausschalten des Gerätes muss beim Programmieren vordefiniert werden. Die Ein- und Rückspeiseeinheit, kurz ER, steuert den Gleichstromzwischenkreis, welches die Energie ins Netz einspeist und aus dem Netz entnimmt. Das Gerät Master Drive ist ein Spannungs-Frequenzumrichter (U/f Umrichter). Er steuert die Asynchronmaschine<sup>18</sup>.

Zum Einschalten muss die ER zuerst in Betrieb sein, damit das Gerät Master Drive den erzeugten Zwischenkreis übernimmt. Nachdem die Ein- und Rückspeiseeinheit fehlerfrei in Betrieb ist, wird Master Drive zugeschaltet. Anschließend wird die Gleichstrommaschine eingeschaltet.

Beim Ausschalten ist es umgekehrt. Master Drive wird zuerst ausgeschaltet und dann die ER. Zum Schluss wird die Gleichstrommaschine ausgeschaltet.

Die Abb. 4-16 stellt ein Flussdiagramm des Ein- und Ausschaltkreises dar. Beim Programmieren werden die Schleifen verschachtelt. Die Schleifen 2 bis 5 wird gestoppt, wenn die Variable „Schleife\_Stopp“ auf 1 gesetzt und die Bedingung (z. B. ER\_ist\_in\_Betrieb=1) erfüllt wird. Die äußere Schleife wird gestoppt, wenn die Stopp-Taste betätigt wird.

---

<sup>18</sup> Die Funktionsweise der Geräte siehe [19] Kapitel 6.1 und 6.2 sowie [21] Kapitel 2.6.2

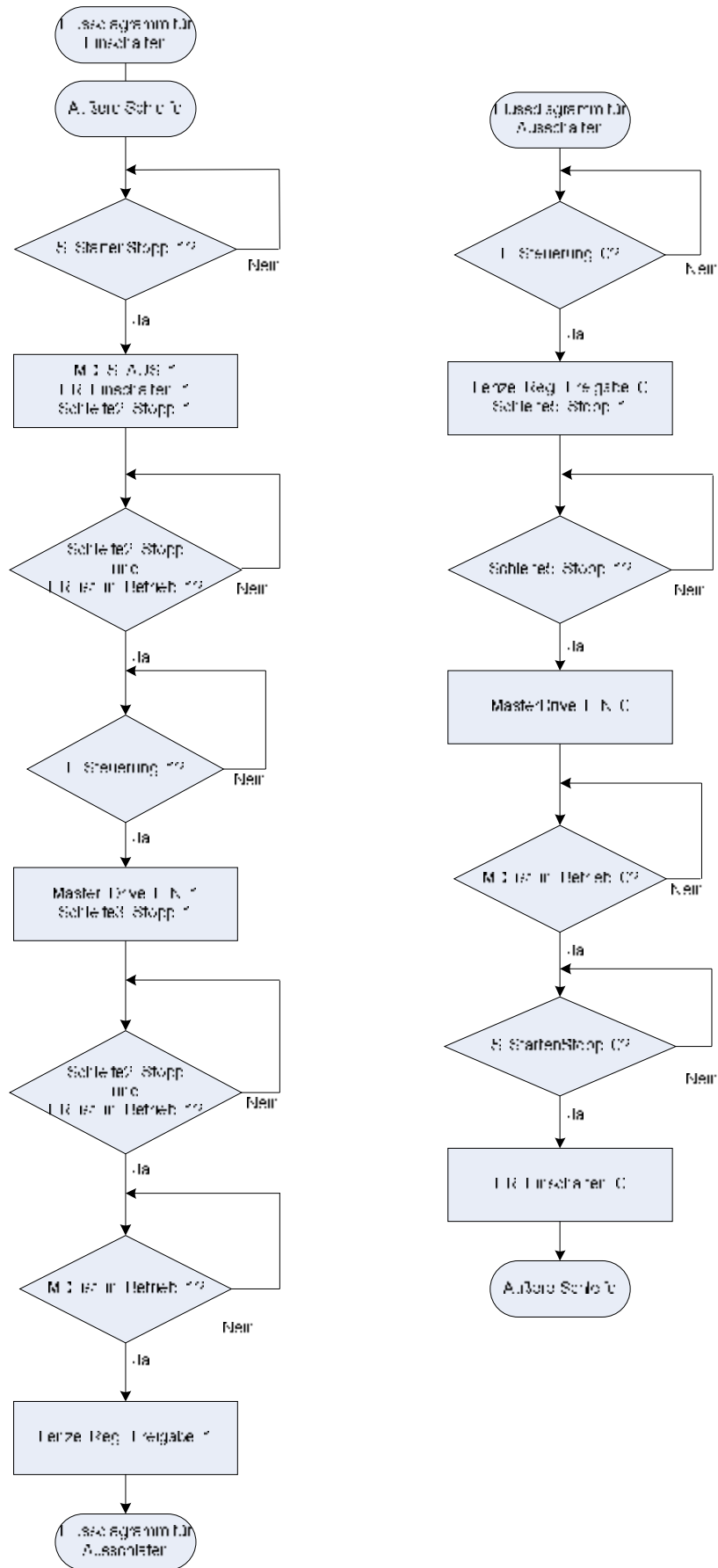


Abbildung 4-17 Flussdiagramm für Ein- und Ausschaltkreis

### 4.1.4 Entwurf der Bedienoberfläche

Eine der Hauptaufgaben ist die Entwicklung der Bedienoberfläche. Als Vorlage wurde das Prozessbild „Bedienung“ vom alten Programm genommen, siehe Abbildung 4-18.

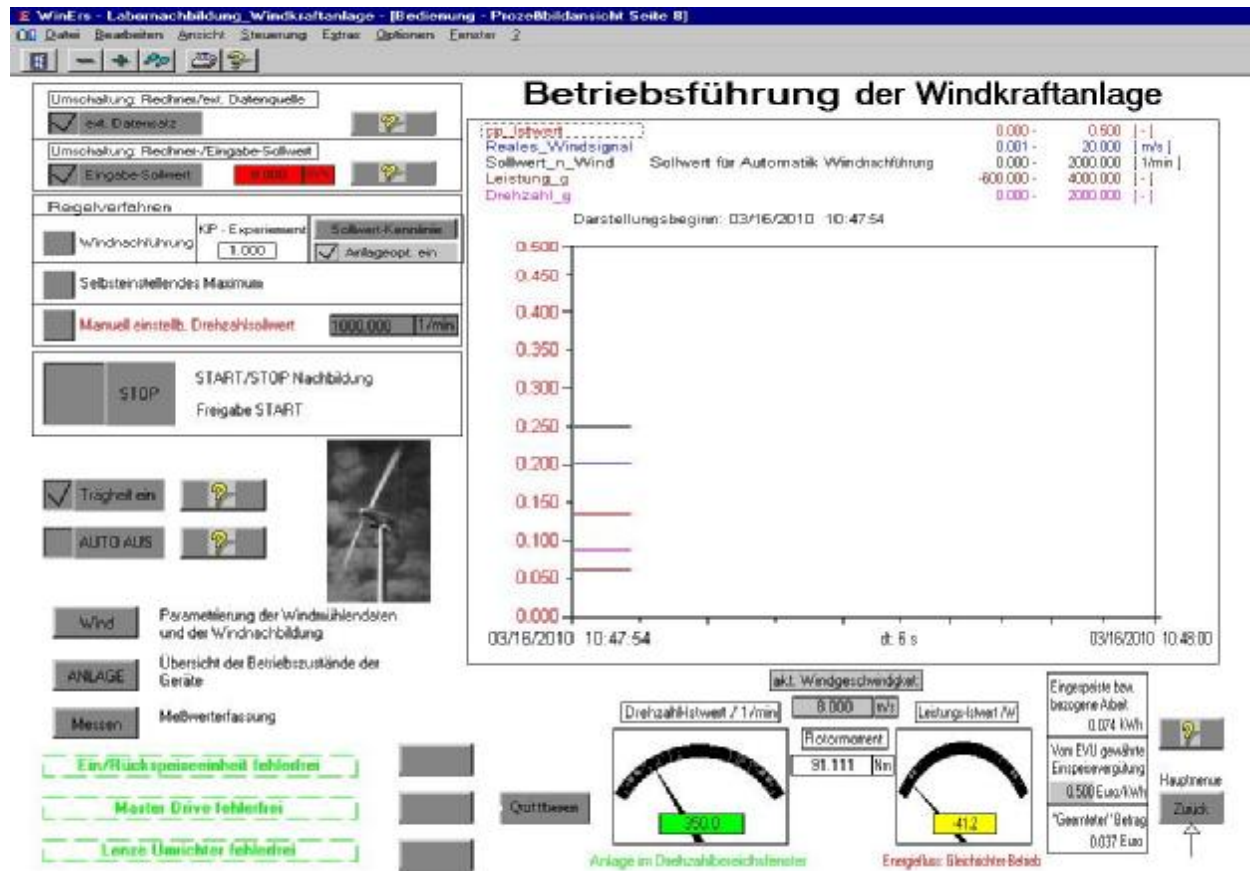


Abbildung 4-18 Bedienoberfläche des WinErs-Programms

Die Eingabefelder, Einschaltknöpfe und Signalanzeiger sind unverändert geblieben. Die Änderungen bestehen darin, dass die neue Bedienoberfläche gegenüber der alten Benutzerüberfläche aus einem einzigen Fenster besteht. Die weiteren Prozessbilder werden als Karteikarte im Hauptregister angelegt. Durch Mausclicken kann die entsprechende Registerseite aktiviert werden.

#### 4.1.4.1 Eingabefelder und Anzeigetafel

Die Eingabefelder (erste drei eingerahmte Bereiche in der Abb. 4-18) dienen dazu, die Anlage ein- und auszuschalten, sowie die Sollwerte für die Anlage zu erfassen. Die Anzeigetafel (vierter eingerahmter Bereich in der Abbildung 4-19 **Abbildung 4-21**) besteht aus vier Anzeigeelementen, welche aus dem Drehzahlwert, Leistungswert, Rotormoment und Ankerstrom bestehen. Die Werte sind teilweise gefiltert, um ein flackerndes Anzeigen zu vermeiden.

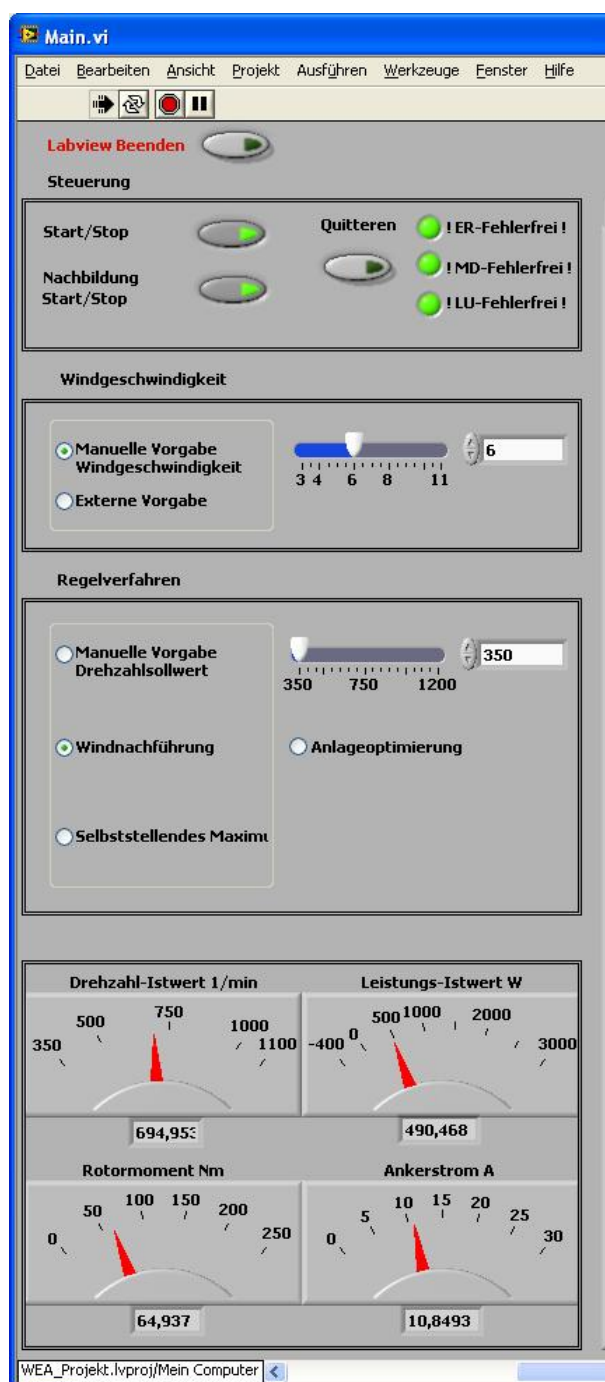


Abbildung 4-19 Eingabefelder



## 1) Steuerung

Hier kann die Steuerung gestartet werden. Die Voraussetzung ist, dass alle Geräte fehlerfrei sind. Falls einer von den drei Fehler-Anzeigern eine Störung meldet, ist die Anlage nicht betriebsbereit. Die Störung kann an den einzelnen Geräten oder am I/O-Gerät liegen. Die Störungen müssen quittiert werden, um die Steuerung fortzusetzen.

Wenn alle Fehler beseitigt sind, kann die Ein- und Rückspeiseeinheit durch Betätigen des Knopfes „Start/Stop“ eingeschaltet werden. Anschließend kann der Frequenzumrichter Master Drive und der Gleichstromrichter Lenze eingeschaltet werden, indem der Schalter „Nachbildung Start/Stop“ betätigt wird.

Mit dem Schalter „LabView beenden“ kann man LabView sofort verlassen, wenn die Schalter „Start/Stop“ und „Nachbildung Start/Stop“ ausgeschaltet sind. Eine Verriegelung der Schalter wurde programmiert. Ein Beenden der Anwendung bei laufenden Maschinen und Geräten müssen vermieden werden.

## 2) Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit kann manuelle zwischen 3 m/s und 11 m/s vorgegeben oder durch Computer simuliert werden. Die Abbildung 4-21 zeigt simulierte Windböen. Die Windgeschwindigkeit liegt ebenfalls zwischen 3 m/s und 11 m/s.

## 3) Regelverfahren

Mit dem Regelverfahren kann der Drehzahlswert für den Asynchrongenerator bestimmt werden. Die drei Regelverfahren sind manuelle Vorgaben des Drehzahlswertes, Windnachführung und selbststellendes Maximum (MPP-Tracking).

### I Manuelle Vorgabe des Drehzahlswertes

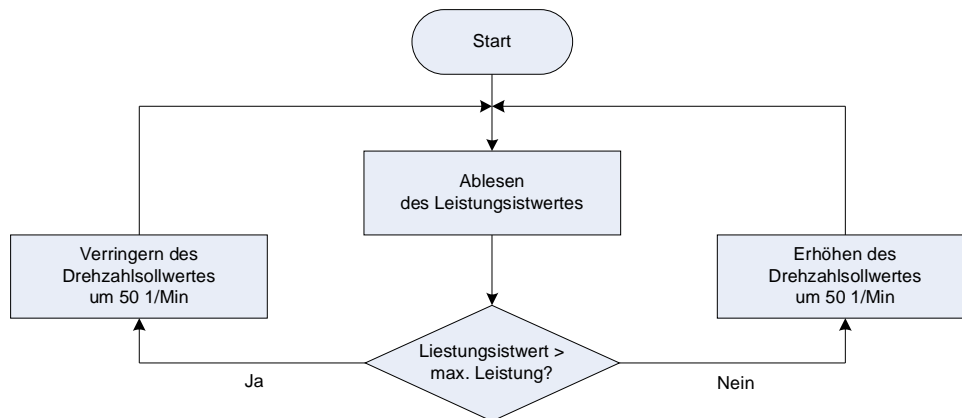
Die Drehzahl kann manuell zwischen 350 1/Min und 1100 1/Min variiert werden.

### I Windnachführung

Mit Windnachführung wird die Drehzahl so eingestellt, dass die mechanische oder elektrische Leistung sein Maximum erreicht. Eine ausführliche Beschreibung befindet sich in Abschnitt 4.2.1.2.

### I Selbststellendes Maximum

Mit dem Steuerverfahren „selbststellendes Maximum“, auch „MPP-Tracking“ genannt, wird die Drehzahl schrittweise eingestellt, bis die Leistung das Maximum erreicht. Die tatsächliche eingespeiste Leistung wird abgefragt, ob sie größer als die maximale Leistung ist. Falls sie kleiner als die maximale Leistung ist, wird die Drehzahl um 50 1/Min erhöht. Im Gegenteil wird die Drehzahl um 50 1/Min verringert. Diese Abfragung wird zyklisch hervorgerufen. Die Abbildung 4-20 zeigt das Flussdiagramm für das Steuerverfahren „MPP-Tracking“.



**Abbildung 4-20 Flussdiagramm für MPP-Tracking**

#### 4.1.4.2 Hauptregister

Das Hauptregister dient zur grafischen Darstellungen der Signale. Durch Mausklicken kann man zwischen den Registerseiten umschalten. Beim alten Programm wird durch Freigabe eines Buttons das entsprechende Prozessbild aktiviert und gleichzeitig alle anderen Prozessbilder deaktiviert. Ein Zugriff auf die deaktivierten Seiten ist dann nicht möglich. Daher ist eine nachträgliche Änderung z. B. Windgeschwindigkeit nicht möglich, falls das Prozessbild „Arbeitspunkt“ gerade aktiviert ist. Damit die Sollwerte jederzeit geändert werden können, sind die Eingabefelder außerhalb des Hauptregisters. Eine Wertänderung kann sofort vom System übernommen werden. Das Hauptregister enthält vier Registerseiten: Signalverläufe, Windsimulation, Untersuchung und Energiefluss.

## 1) Signalverläufe

Die Registerseite „Signalverläufe“ enthält ein cp-Lambda-Kennfeld und verschiedene Kennlinien. In der Abbildung 4-21 wurde die Windböen durch Computer simuliert.

### I cp-Lambda-Kennfeld

Zu sehen ist eine cp-Lambda-Kennlinie, die manuell in einem Unterprogramm erzeugt wurde. Mit Hilfe der Cursor-Funktion kann man den Arbeitspunkt während der Steuerung verfolgen.

### I Anzeigen von Kennlinien

Die Kennlinien können ausgewählt werden, indem die Checkbox für die gewünschten Kennlinien angekreuzt wird. Um die Kennlinien in einem Diagramm vernünftig darstellen zu können, haben die Kennlinien unterschiedliche Skalierungen.

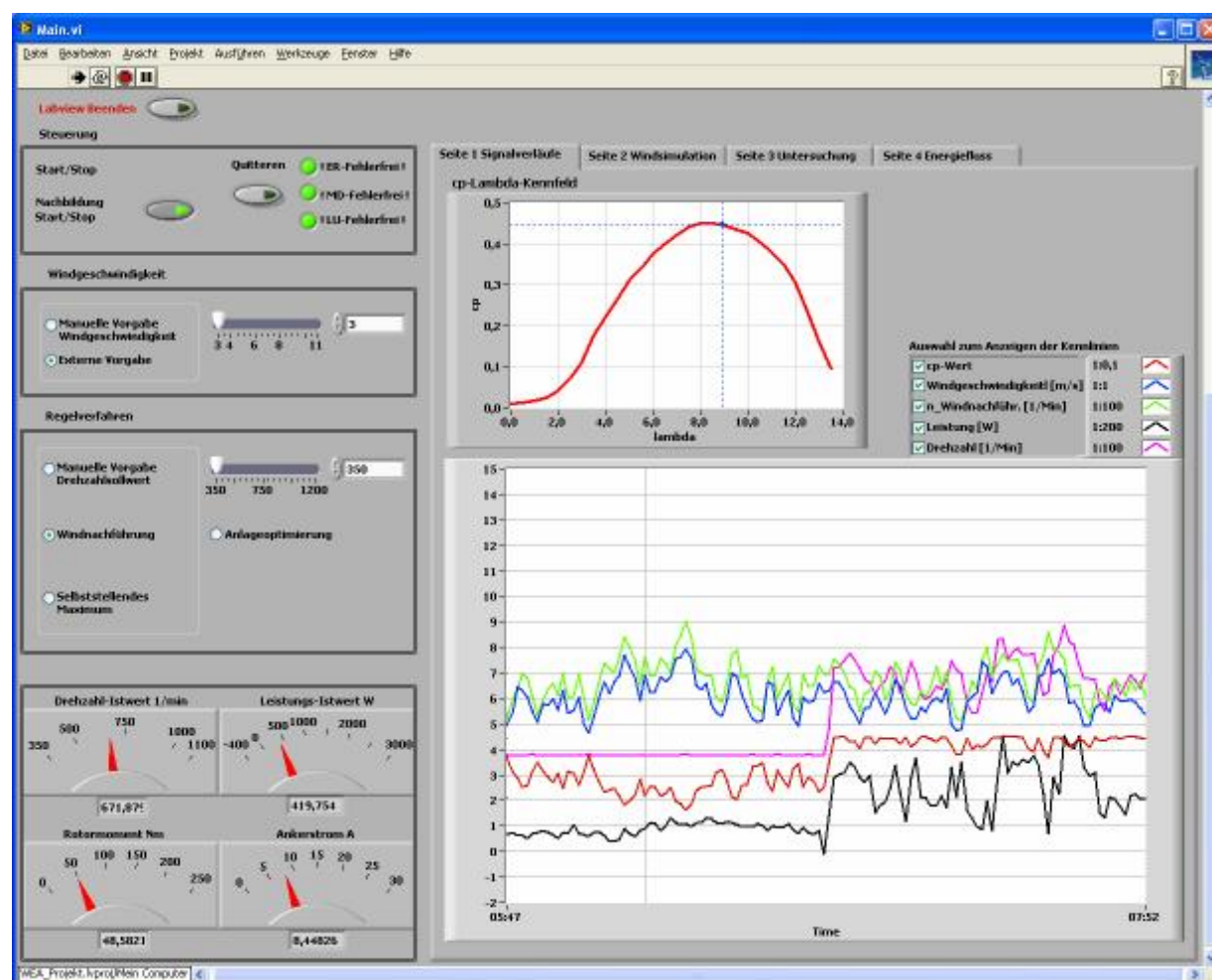


Abbildung 4-21 Bedienoberfläche mit Registerseite „Signalverläufe“

## 2) Windsimulation

In der Seite „Windsimulation“ werden die Grunddaten der Windturbine gespeichert. Festgelegt sind die Nennleistung der Windkraftanlage, die Nennwindgeschwindigkeit, die Auslegungsschnellaufzahl und die Anzahl des Rotorblattes. Andere Parameter z.B. die Getriebeübersetzung kann jederzeit geändert werden.

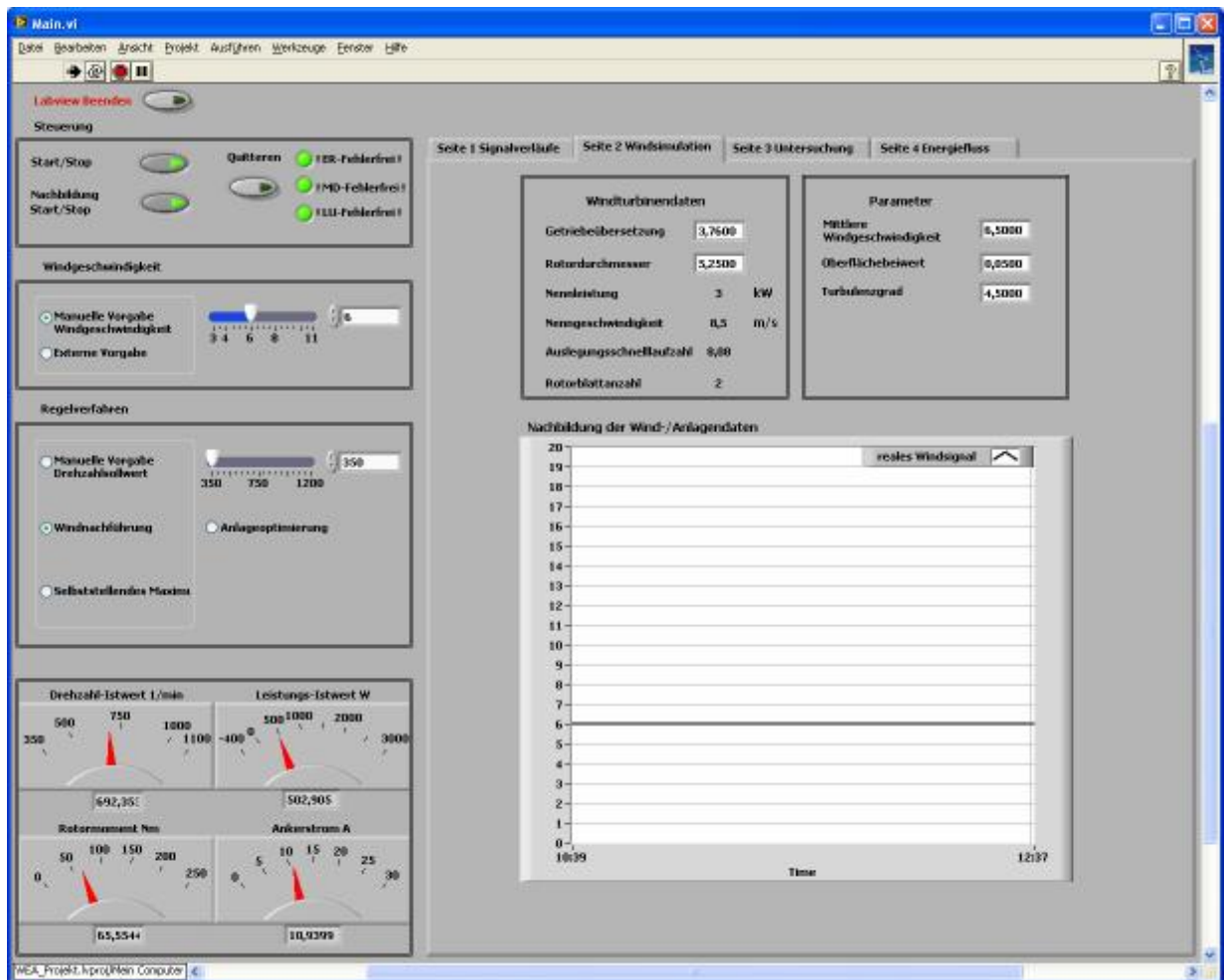


Abbildung 4-22 Bedienoberfläche mit Registerseite „Windsimulation“

### 3) Untersuchung

Um die Eigenschaft der Maschine zu untersuchen, wählt man die Registerseite „Untersuchung“ aus. Das System kann entweder im Betrieb „Nachbildung“ oder „Untersuchung“ sein. Um eine Fehlbedienung vom Benutzer zu vermeiden, wurde eine Verriegelung durch Ausblenden eines der beiden Knöpfe implementiert. Beide Knöpfe können nicht gleichzeitig betätigt werden. Zum Starten der Untersuchung muss die Steuerung freigegeben werden. Der Sollwert kann vor dem Start oder während der Untersuchung eingegeben werden. Mit dem Kipp-Schalter kann man zwischen Sprung- und Grundwert wechseln und somit einen Sprung erzeugen (siehe Abbildung 4-23).

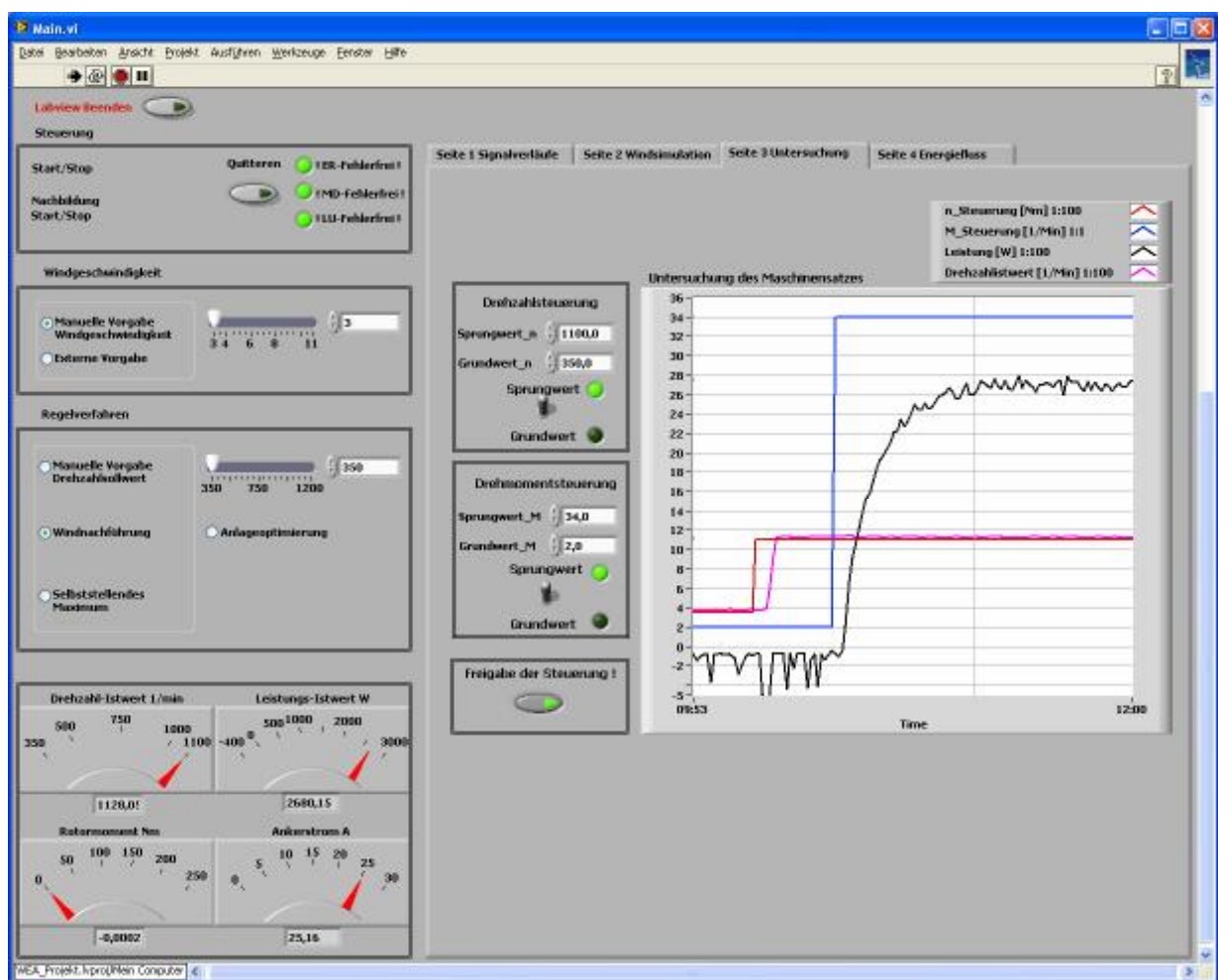


Abbildung 4-23 Bedienoberfläche mit Registerseite „Untersuchung“

#### 4) Energiefluss

In der Registerseite „Energiefluss“ ist der vereinfachte Aufbau der Anlage mit dem Energiefluss und dem Verhalten der moment- und flussbildenden Stromkomponente zu sehen. Ist die Anlage im Generatorbetrieb, wie die Abbildung 4-24 zeigt, wird die Energie, die von der Gleichstrommaschine erzeugt wird, ins Netz eingespeist. Im anderen Fall (Abbildung 4-25) wird die Energie aus dem Netz entnommen und treibt die Asynchronmaschine an.

Moment- und Flussbildende Stromkomponente wird als ein Arbeitspunkt dargestellt. Die flussbildende Stromkomponente ist fast konstant. Die momentbildende Stromkomponente ist bei einem Generatorbetrieb negativ und bei einem Motorbetrieb positiv.

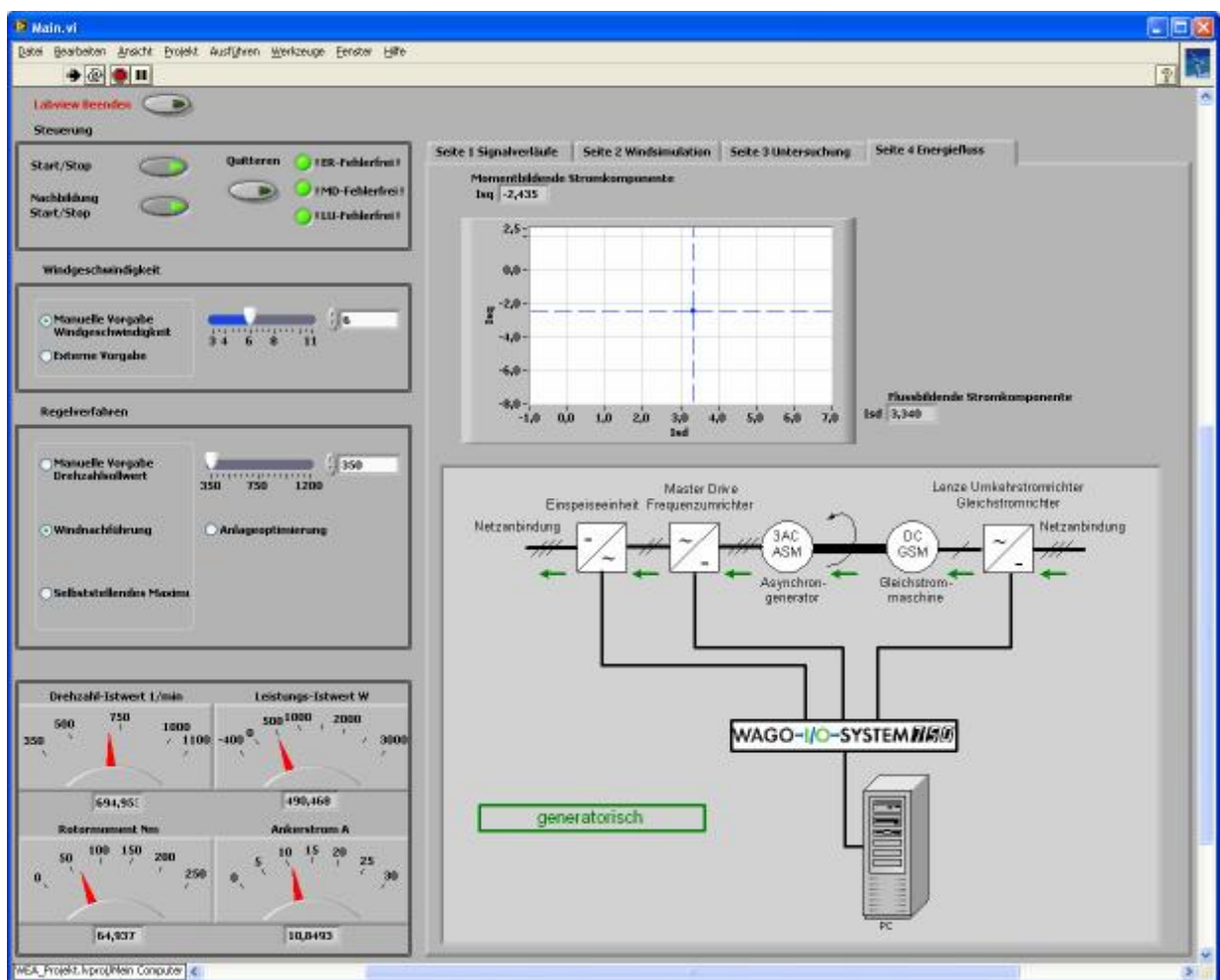


Abbildung 4-24 Bedienoberfläche mit Registerseite „Energiefluss“

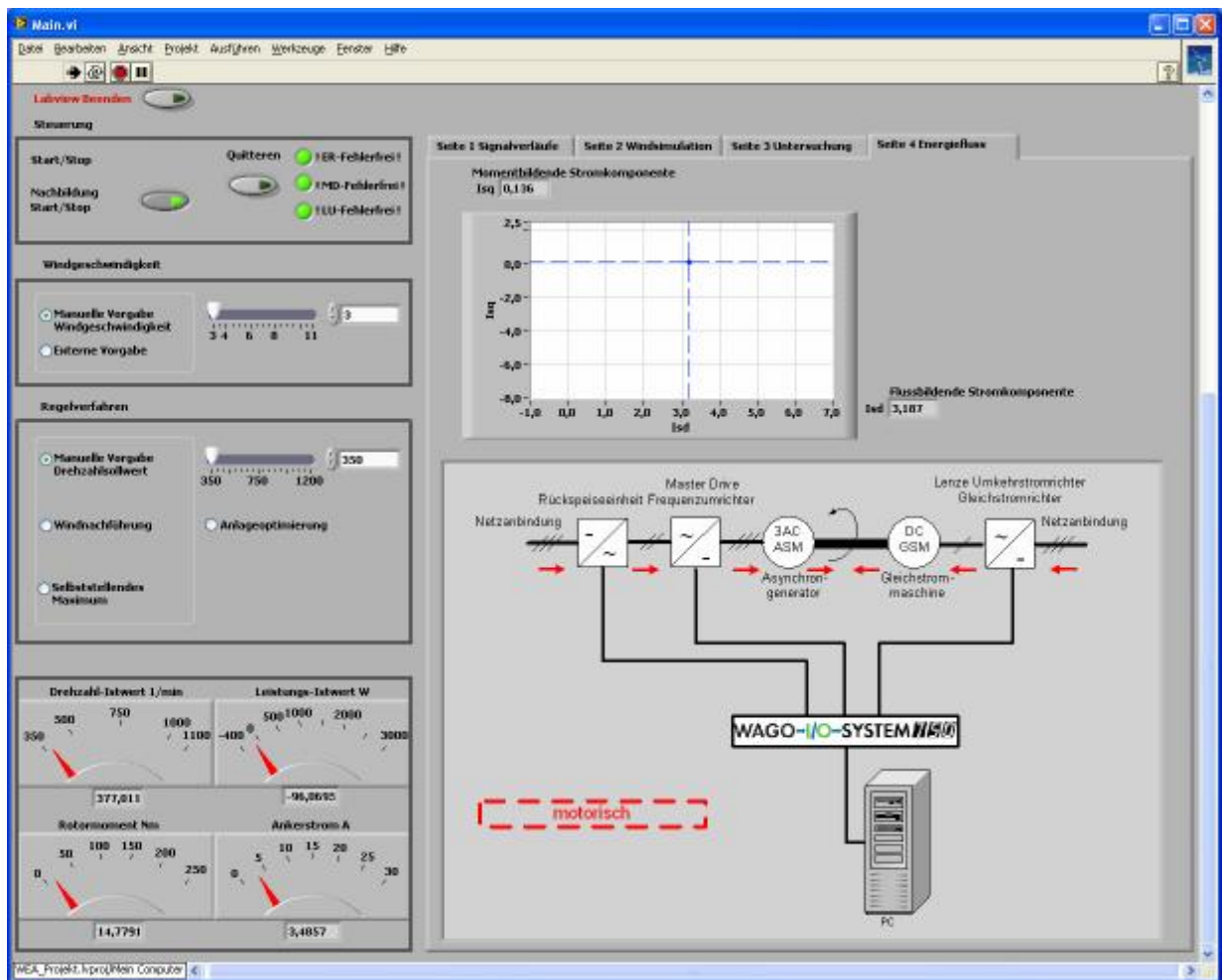


Abbildung 4-25 Bedienoberfläche mit Registerseite „Energiefluss“



### 4.1.4.3 Hilfsregister

Das Hilfsregister (Abbildung 4-26) dient dazu, die einzelnen Signale oder auch die Zwischenvariable während der Steuerung zu überwachen. Für die Benutzer ist dieses Register uninteressant und kann ausgeblendet werden. Diese ist nur für den Programmierer gedacht, um ein bestimmtes Signal oder eine Variable während der Steuerung zu verfolgen.

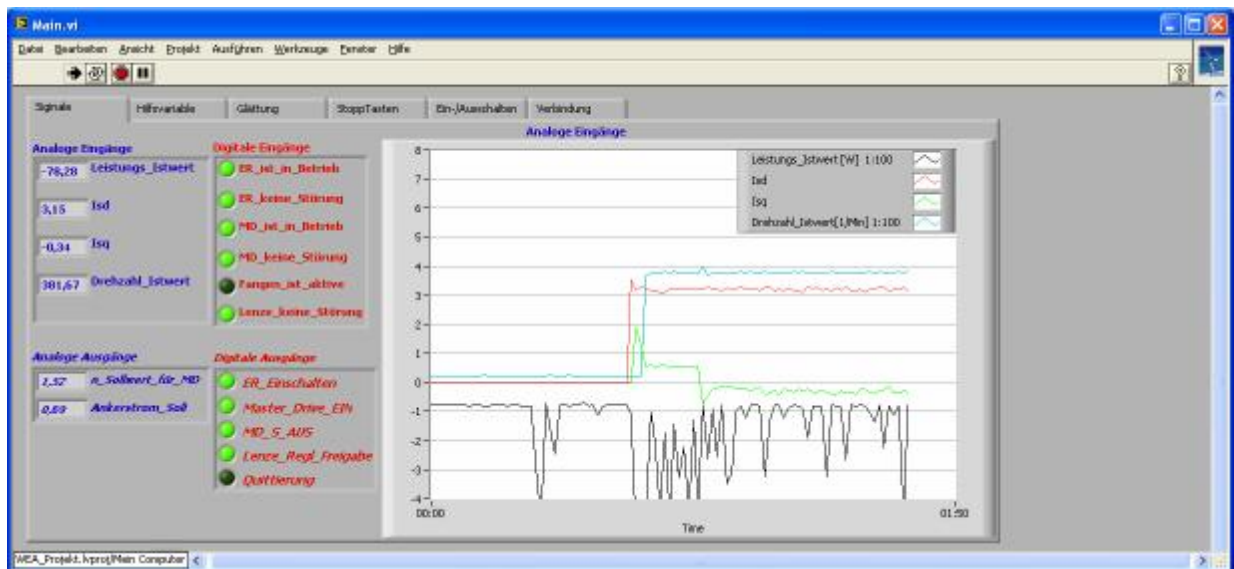


Abbildung 4-26 Hilfsregister mit der Registerseite „Signale“

## 4.2 Aufgaben der Sub-VIs

Die Sub-VIs sind Unterprogramme, die vom Main-Programm oder von einem anderen Programm aufgerufen werden können. Die Unterprogramme befinden sich in unterschiedlichen Ebenen. Die Unterprogramme werden in zwei Gruppen aufgeteilt. In der obersten Ebene befindet sich das main-Programm. Eine Ebene tiefer sind die Sub-VIs, die vom main-Programm direkt aufgerufen werden. Daraus entstehen die Blockdiagramme, z. B. MBTWriteRegister. In der untersten Ebene sind die Hilfsfunktionen, die eine bestimmte Aufgabe erfüllen oder indirekt vom main-Programm aufgerufen werden, zum Beispiel cp\_Graifsch. Die Abbildung 4-27 zeigt die Hierarchie der bereits erstellten Funktionen des gesamten Projektes.



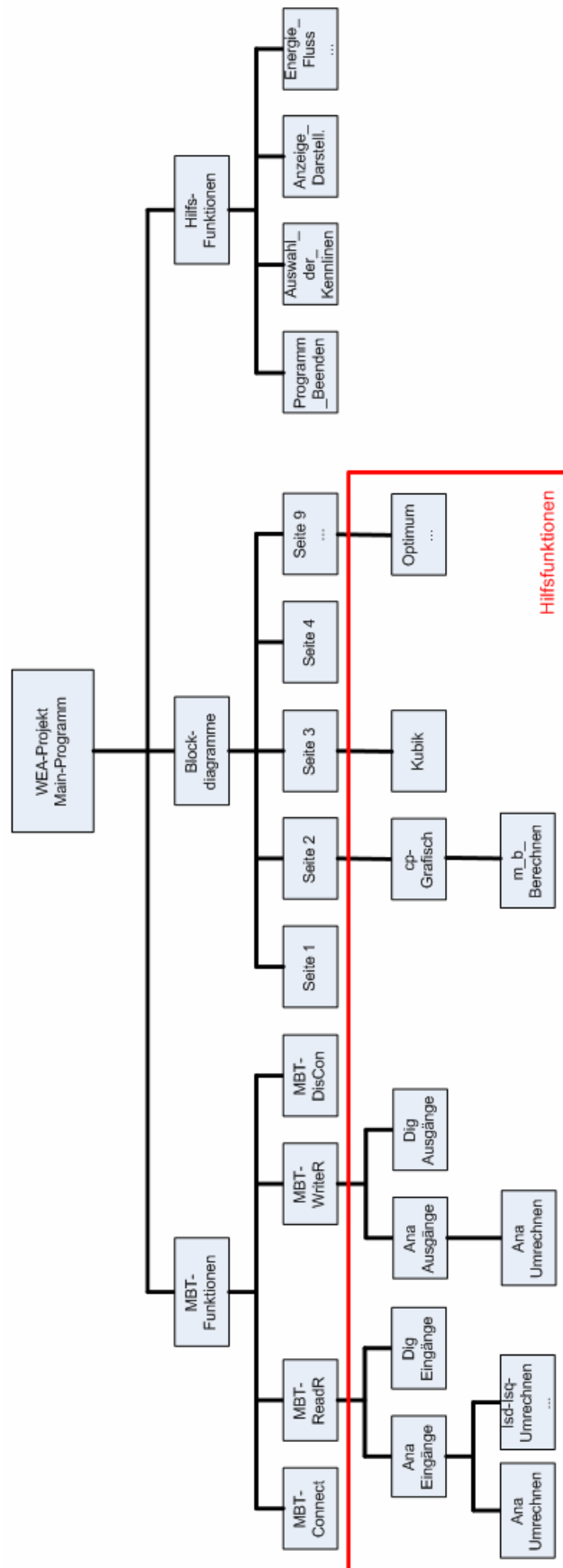


Abbildung 4-27 Übersicht für Sub-VIs

## 4.2.1 Blockdiagramme mit Sub-VIs

Durch Verdrahtung der Sub-VIs entstehen die Blockdiagramme. Im main-Programm werden alle Sub-VIs, die für die Berechnung der Soll- und Istwerte zuständig sind, miteinander verbunden. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigen Berechnungen detailliert erklärt.

### 4.2.1.1 Berechnen der Ausgangsspannung des Ankerstromsollwertes

Der Ankerstromsollwert muss für Wago analoge Ausgangsklemme angepasst werden. D. h. der Sollwert muss in Spannung umgewandelt werden. Alle unbekanntes Größen werden Schritt für Schritt berechnet.

#### 1) Berechnen des Drehmomentes

Laut der Maschinengleichung Formel 4-9 ist der Ankerstrom proportional zu Drehmoment, wenn der Fluss  $\Phi$  konstant bleibt.

$$M = c_m \cdot f \cdot I_A \quad 4-9^{19}$$

Um den Ankerstrom zu bestimmen, muss das Drehmoment berechnet werden. Es lässt sich mit untenstehender Gleichung herleiten.

$$M = \frac{P}{\Omega} \quad 4-10^{20}$$

$$P = \frac{r \cdot p \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot c_p(I)}{2} \quad 4-11^{21}$$

$$I = \frac{u}{v} = \frac{\Omega \cdot R}{v} \quad 4-12^{22}$$

$$\Omega = \frac{I \cdot v}{R} \quad 4-13$$

Nach dem Einsetzen der Gleichung 4-11 und 4-13 in die Gleichung 4-10 erhält man die untenstehende Gleichung zum Berechnen des Drehmomentes.

$$M = \frac{r \cdot p \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot c_p(I)}{2 \cdot I} \quad 4-14$$

<sup>19</sup> [4] Seite 68, Gl. 2.38

<sup>20</sup> [2] Seite 216, Gl. 6.8

<sup>21</sup> [2] Seite 217, Gl. 6-9

<sup>22</sup> [1] Seite 34, Gl. 2.35

Die Luftdichte  $\rho$  und der Radius des Rotors  $R$  sind konstant. Die Windgeschwindigkeit wird vom Benutzer vorgegeben. Unbekannt sind der Leistungsbeiwert und die Schnelllaufzahl.

## 2) Berechnen der Schnelllaufzahl

Weil der Leistungsbeiwert  $c_p$  abhängig von der Schnelllaufzahl  $\lambda$  ist, wird zuerst  $\lambda$  mit der Gleichung 4-12 berechnet. Mit Berücksichtigen des Getriebes in der Anlage muss die Gleichung 4-9 durch das Übersetzungsverhältnis geteilt werden und erhält die Gleichung 4-15.

$$I = \frac{u}{v \cdot \ddot{u}} = \frac{\Omega \cdot R}{v \cdot \ddot{u}} \quad 4-15$$

Wird die Gleichung 4-16 für mechanische Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  in die Gleichung 4-15 eingesetzt, folgt die Gleichung 4-17.

$$\Omega = 2 \cdot p \cdot n [\text{Min}^{-1}] = 2 \cdot p \cdot \frac{n}{60} [\text{Sec}^{-1}] \quad 4-16$$

$$I = \frac{2 \cdot p \cdot n [\text{Min}^{-1}] \cdot R}{v \cdot \ddot{u}} = \frac{2 \cdot p \cdot n [\text{Sec}^{-1}] \cdot R}{v \cdot \ddot{u} \cdot 60} \quad 4-17$$

## 3) Berechnen des Leistungsbeiwertes $c_p$

Wenn die Schnelllaufzahl  $\lambda$  bekannt ist, wird der Leistungsbeiwert  $c_p$  berechnet. Zwei Möglichkeiten gibt es: grafisch über Stützstellen oder analytisch. Verwendet wird die grafische Methode, weil das  $c_p$ -Lambda-Kennfeld mit der analytischen Methode nur näherungsweise zum Teil nachgebildet werden, siehe Abbildung 4-28. Nach der grafischen Methode wird der  $c_p$ -Wert aus dem  $c_p$ -Lambda-Kennfeld (siehe Abbildung 4-29) abgelesen. Im LabView wurde der  $c_p$ -Wert mit der Hilfsfunktion „ $c_p$ \_Grafisch“ ermittelt, siehe Abschnitt 4.2.2.1.

Die Abbildung 4-29 zeigt ein  $c_p$ -Lambda-Kennfeld mit geglätteten Punkten. Analytisch wird der  $c_p$ -Wert mit der Formel 4-18 berechnet.

$$c_p = 0,45 \cdot \sin(I \cdot 0,2617994) \quad 4-18^{23}$$

<sup>23</sup> [21] Blockstruktur Seite 2

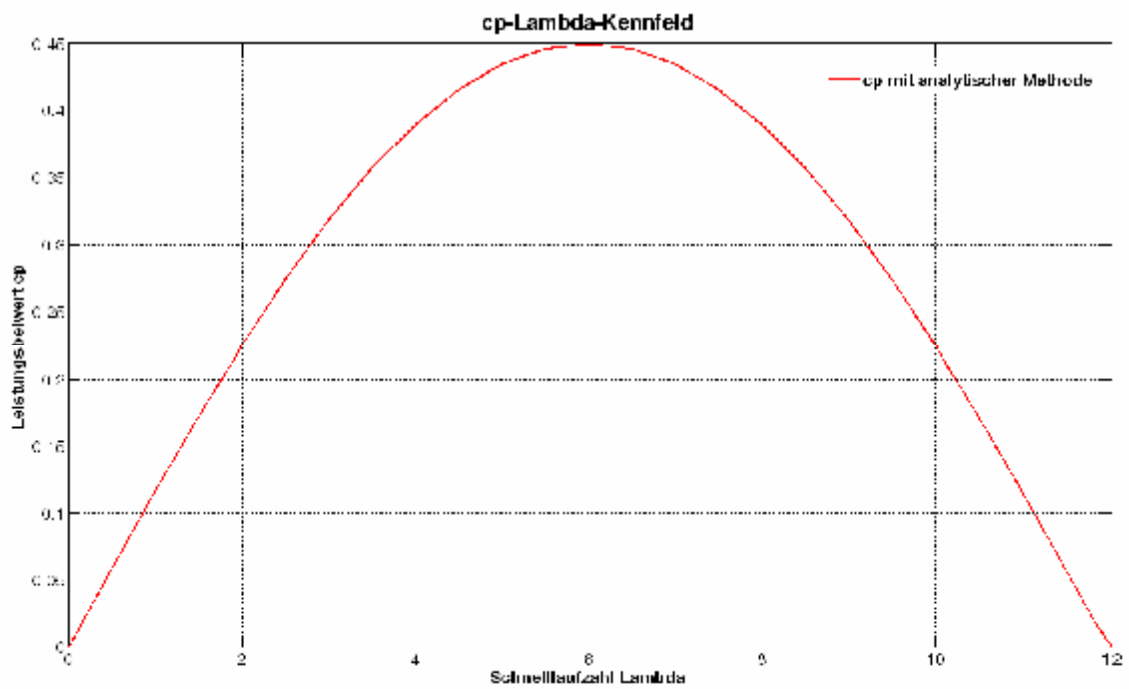


Abbildung 4-28 cp-Lambda-Kennfeld mit analytischer Methode<sup>24</sup>

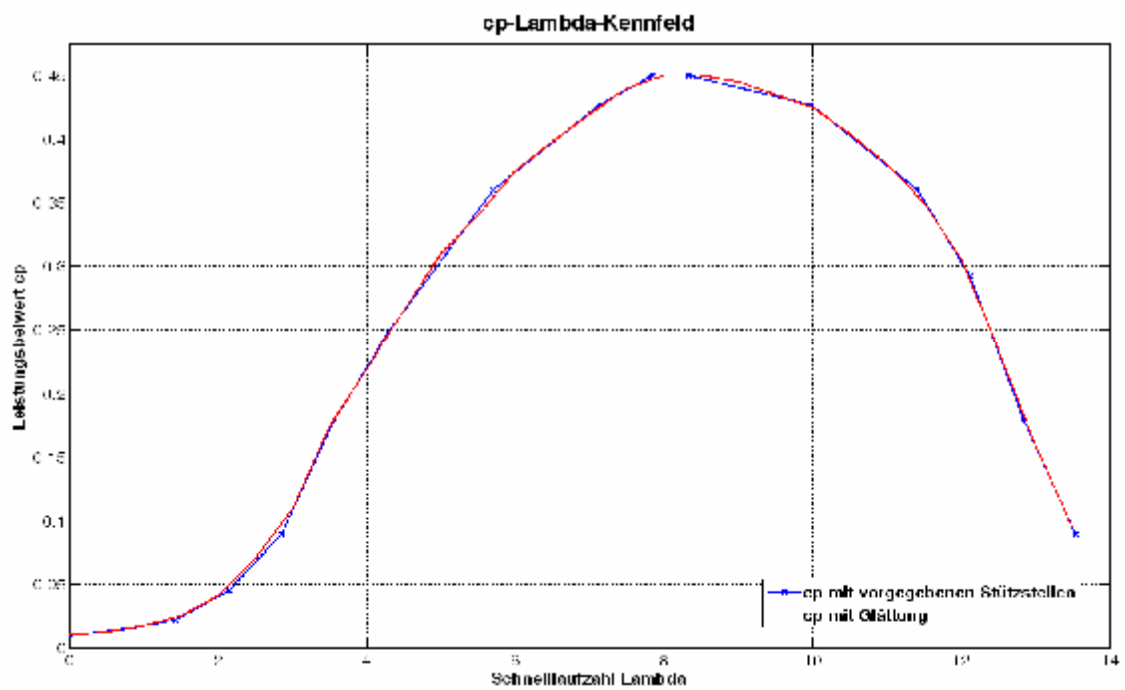


Abbildung 4-29 cp-Lambda-Kennfeld mit Glättung

<sup>24</sup> Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

#### 4) Berechnen des Ankerstromsollwertes

Wenn das Drehmoment des Rotors bekannt ist, wird der Ankerstromsollwert mit der Gleichung 4-19 oder 4-20 berechnet.

$$I_{\text{ Soll}} = M \cdot 0,69 + 1,7 \quad 4-19^{25}$$

$$I_{\text{ Soll}} = \frac{M \cdot 0,69}{\ddot{u}} + 1,316 \quad 4-20^{26}$$

Die Gleichung 4-16 ist anzuwenden, wenn die Untersuchung der Maschine aktiv ist. Das Drehmoment wird direkt vom Benutzer vorgegeben und der Strom muss ohne Berücksichtigung der Getriebeübersetzung berechnet werden. Im anderen Fall ist das Drehmoment mit der Gleichung 4-17 zu berechnen, weil das Drehmoment von der Windgeschwindigkeit, Lambda und  $c_p$  abhängig sind und auf der Generatorseite bestimmt werden. Die Getriebeübersetzung muss dann beim Berechnen einbezogen werden.

#### 5) Umwandeln des Ankerstromsollwertes in Spannung

Anschließend wird der Sollwert für die Wago-Ausgangsklemme mit der Gleichung 4-21 in Spannung umgewandelt.

$$I_{\text{ Soll}}[V] = \frac{I_{\text{ Soll}}[A] - 1,024[A]}{3,201\left[\frac{A}{V}\right]} \quad 4-21^{27}$$

#### 6) Blockdiagramm für die Berechnung

Die Abbildung 4-30 ist das Blockdiagramm mit fünf miteinander verbundenen Sub-VIs. Auf der Seite 1 bis 4 werden die Rechnungen durchgeführt. Auf der Seite 19 werden zwei globale Variablen „Steuerung\_Ein“ und „Umschaltung“ erzeugt. Eine globale Variable ist für alle Funktionen verfügbar. Die Variable „Steuerung\_Ein“ zeigt, dass die Anlage in Betrieb (Nachbildung oder Untersuchung) ist. Wenn die Anlage von Nachbildung auf Untersuchung umgeschaltet wird, wird die Variable „Umschaltung“ auf „1“ gesetzt.

---

<sup>25</sup> [21] Blockstruktur Seite 4

<sup>26</sup> [21] Blockstruktur Seite 4

<sup>27</sup> [21] Blockstruktur Seite 4

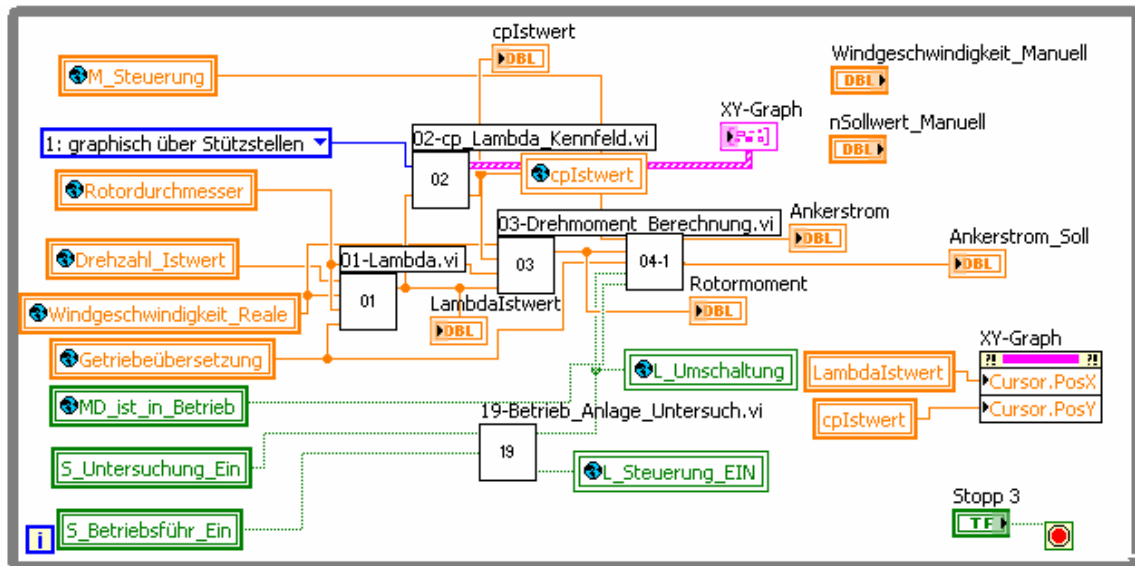


Abbildung 4-30 Blockdiagramm zum Berechnen des Ankerstromsollwertes

#### 4.2.1.2 Berechnen des Drehzahl Sollwertes für Windnachführung

Bei Windnachführung ist die Drehzahl so einzustellen, dass die Leistung mechanisch oder elektrisch optimiert wird.

##### 1) Mechanische Optimierung

Für die mechanische Optimierung der Leistungsentnahme wird die Drehzahl mit folgender Gleichung bestimmt:

$$n_{soll} = \frac{v \cdot I_{opt} \cdot \ddot{u}}{p \cdot d} \tag{4-22}^{28}$$

Die Drehzahl ist nur abhängig von der Windgeschwindigkeit, weil die optimale Schnellaufzahl  $\lambda_{opt}$ , Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ , Durchmesser  $d$  konstant sind.

##### 2) Elektrische Optimierung

Zur elektrischen Optimierung der Leistung wird eine optimale Drehzahlkennlinie in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit erstellt. Im WinErs-System wird die Kennlinie als Funktionsgeber mit Stützstellen dargestellt, siehe Abbildung 4-31.

<sup>28</sup> [21] Blockstruktur Seite 24

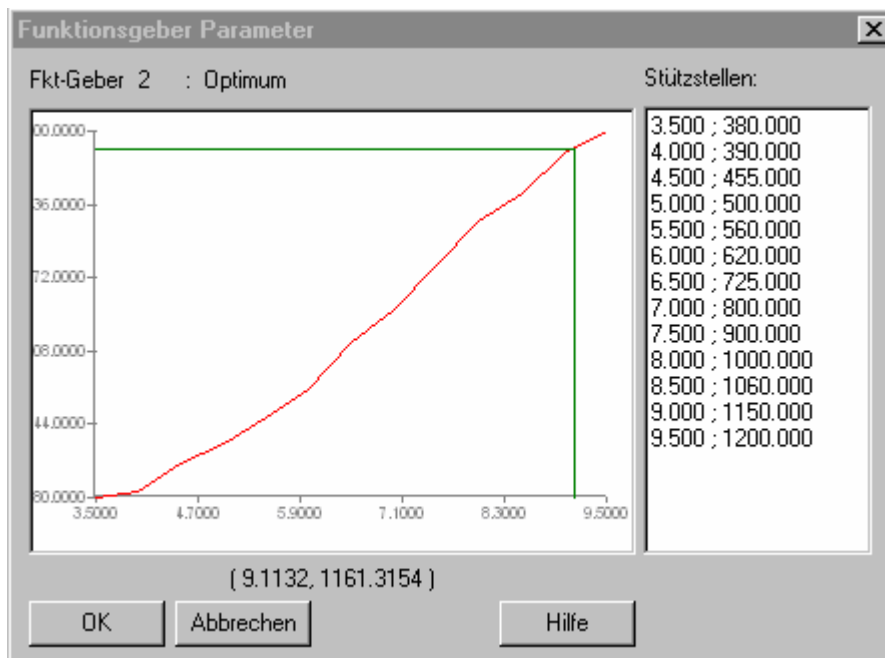


Abbildung 4-31  $n_{\text{Optimum}}(v_{\text{Wind}})$ -Kennlinie mit Stützstellen in WinErs

Um die Kennlinien in LabView exakt nachzubilden, wird die Kennlinie zuerst mit MatLab experimentell ermittelt (siehe Abbildung 4-32). Die Stützstellen aus der Abbildung 4-31 sind nicht ausreichend für die Ermittlung der optimalen Drehzahl bei einer Windgeschwindigkeit zwischen den gegebenen Werten, z. B. bei einer Windgeschwindigkeit von 3.9 m/s ist keine entsprechende Drehzahl aus der Abbildung 4-31 zu finden. Als Lösung wird eine Geradengleichung zwischen zwei Stützstellen ermittelt (siehe Beispiel 4-1).

$$v_{\text{Windl}} = 3,5 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad n_{\text{Optl}} = 380 [\text{Min}^{-1}]$$

$$v_{\text{Windl}} = 4,0 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad n_{\text{Optl}} = 390 [\text{Min}^{-1}]$$

$$y = m \cdot x + b \quad \text{mit} \quad m = \frac{(390 - 380) [\text{Min}^{-1}]}{(4,0 - 3,5) \left[ \frac{m}{s} \right]} = 20 \left[ \text{Min}^{-1} \cdot \frac{s}{m} \right]$$

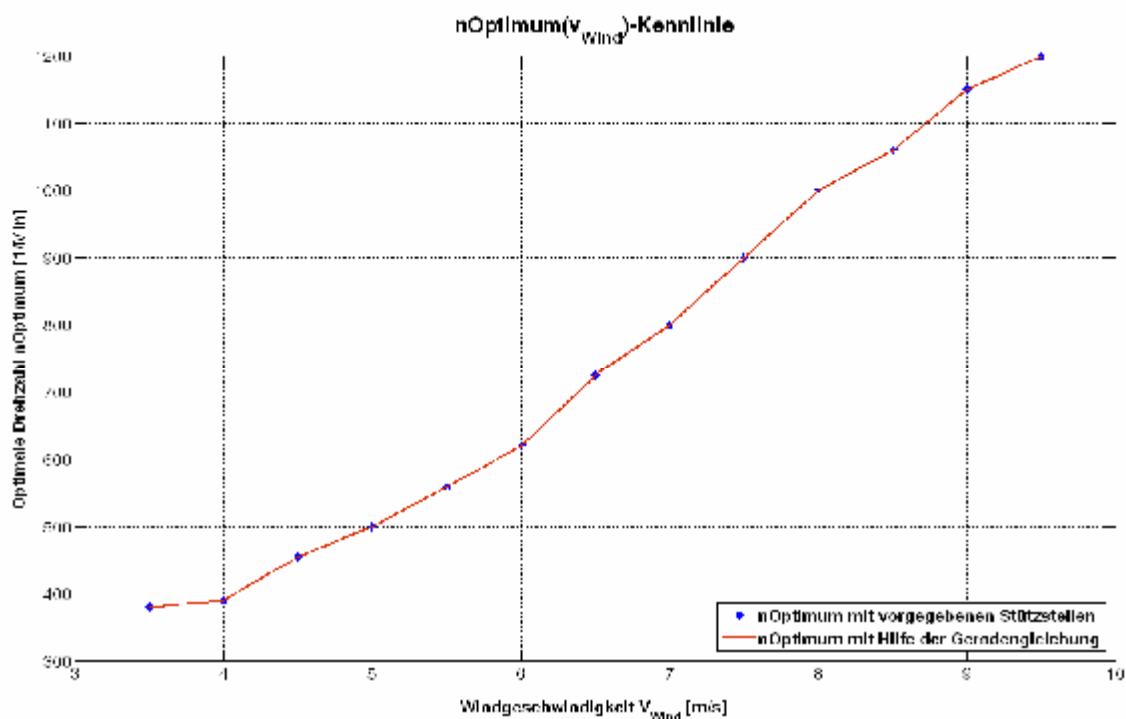
$$b = 380 [\text{Min}^{-1}] - 20 \left[ \text{Min}^{-1} \cdot \frac{s}{m} \right] = 310 [\text{Min}^{-1}]$$

**Beispiel 4-1 Berechnen einer Geradefunktion für Bestimmung der optimalen Drehzahl bei  $v_{\text{Wind}}$  zwischen 3.5m/s und 4.0m/s**

$$y = 20 \left[ \text{Min}^{-1} \cdot \frac{s}{m} \right] \cdot x \left[ \frac{m}{s} \right] + 310 [\text{Min}^{-1}]$$

4-23

Die Steigung  $m$  und der Achsenabschnitt  $b$  in der Formel 4-23 wurde am Beispiel 4-1 hergeleitet und gilt nur für eine Windgeschwindigkeit zwischen 3.5 m/s und 4 m/s. Für die Windgeschwindigkeit außerhalb dieses Bereichs z. B. zwischen 4 m/s und 4.5 m/s muss eine neue Geradenfunktion bestimmt werden, weil die Steigung und der Achsenabschnitt der Funktion anders sein könnten.



**Abbildung 4-32** Nachgebildete  $n_{Optimum}(v_{Wind})$ -Kennlinie mit MatLab

Aus der Abbildung 4-32 ist es gut zu erkennen, dass die Stützstellen genau auf der nachgebildeten Geradenlinie liegen. Damit kann die optimale Drehzahl bei  $v_{Wind}$  zwischen 3.5m/s und 9.5m/s bestimmt werden. Eine Hilfsfunktion „Optimum“ wurde zur Nachbildung dieser Kennlinie im LabView erstellt (siehe Abschnitt 4.2.2.2).

### 3) Blockdiagramm

Die Abbildung 4-33 ist das Blockdiagramm für Simulation der Windgeschwindigkeit durch Computer. Die Seite 12-1 erzeugt mit einem Zufallszahlengenerator eine Windböe zwischen 3 m/s und 13 m/s.



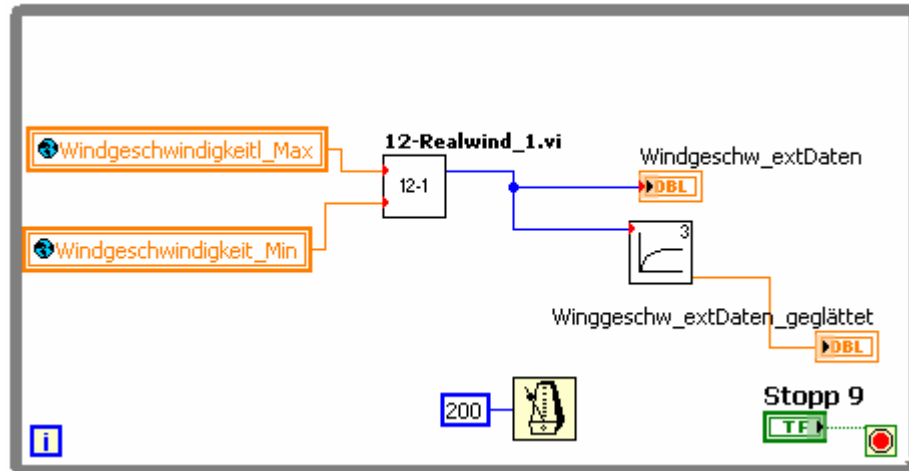


Abbildung 4-33 Erzeugen einer Windbö

In der Abbildung 4-34 wird die Windgeschwindigkeit mit der Seite 12-2 ermittelt. Die Anlageoptimierung kann in der Seite 24 gewählt werden.

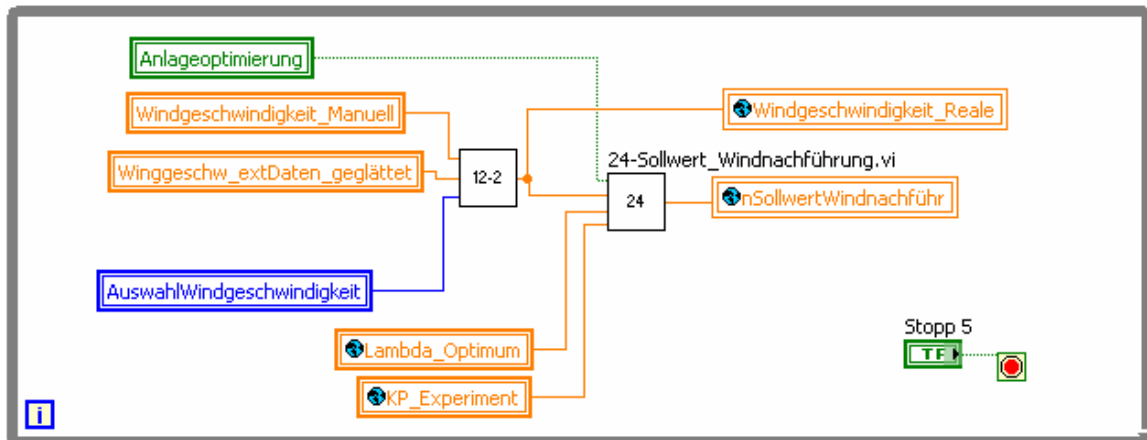


Abbildung 4-34 Berechnen des Drehzahlsollwertes mit Windnachführung

#### 4.2.1.3 Berechnen des Drehzahlsollwertes für Master Drive

Der Drehzahlsollwert ist vor allem abhängig von der Steuerungsart. Schaltet man „Betriebsführ\_Ein“ aus und wählt „Freigabe\_der\_Steuerung“ wird der Grundwert oder Sprungwert der Drehzahl auf der Seite 9 ermittelt (siehe Abbildung 4-35). Das Drehmoment kann hier ignoriert werden.

Wird der Schalter „Betriebsführ\_Ein“ betätigt, ist die Drehzahl abhängig vom Regelverfahren, siehe Teil 1 Eingabefeld im Kap. 4.1.4 „Benutzeroberfläche“. Auf der Seite 22-1 wird die Drehzahl nach dem Regelverfahren bestimmt und mit der Gleichung 4-24 in eine Spannung umgerechnet.

$$n\_soll[V] = \frac{n\_soll[Min^{-1}] - 200[Min^{-1}]}{99[\frac{Min^{-1}}{V}]}$$

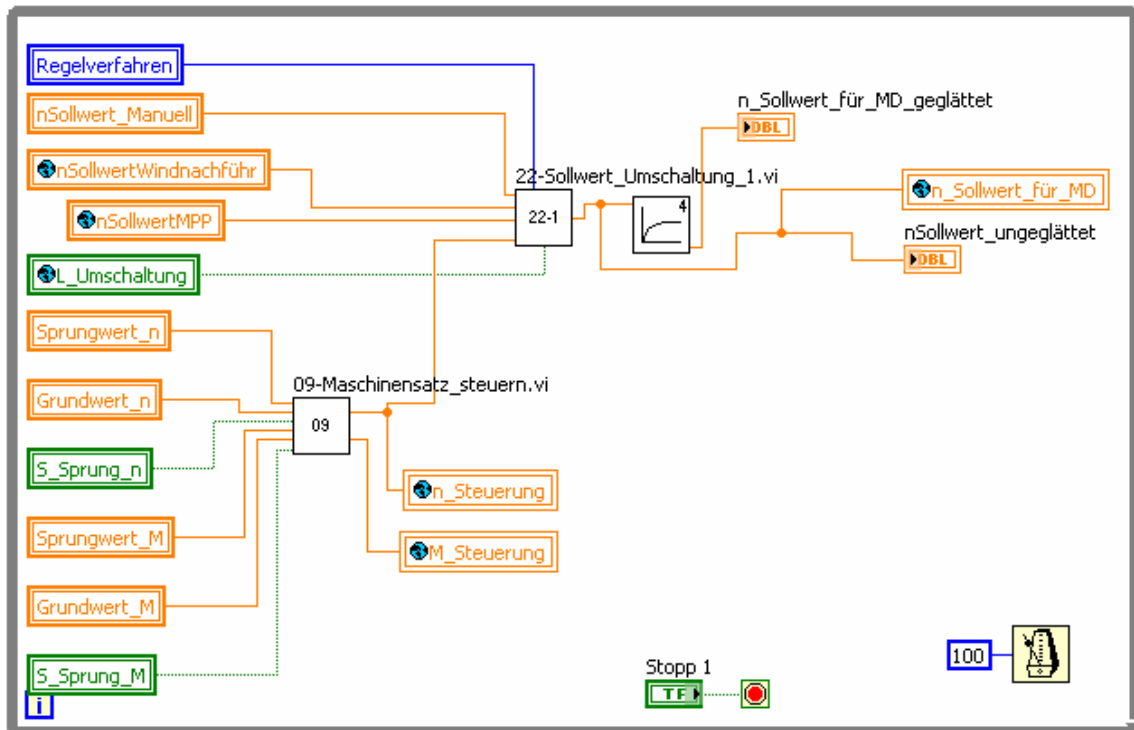
4-24<sup>29</sup>

Abbildung 4-35 Blockdiagramm zum Bestimmen des Drehzahlsollwertes

#### 4.2.1.4 Glättung der Istwerte

##### 1) Glättung durch Mittelwertbilden

Zur Glättung wird zuerst ein Mittelwert aus 10 Werten gebildet (siehe Abbildung 4-36). Die For-Schleife sorgt dafür, dass der Istwert solange in eine Array schreibt, bis der Zähler 10 erreicht. Mit der Funktion „Mean“ wird der Mittelwert vom Array berechnet. Wenn man weitere Mittelwerte bilden möchte, muss man nur ein neues Array erstellen und den Mittelwert vom neuen Array bilden.

<sup>29</sup> [21] Blockstruktur Seite 22

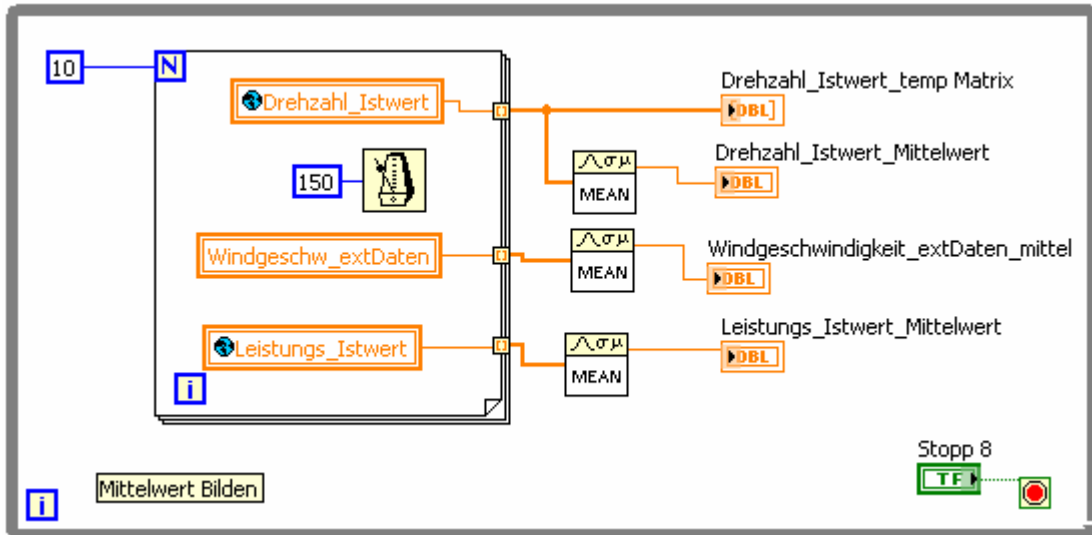


Abbildung 4-36 Blockdiagramm für Mittelwertbilden

2) Glättung des Leistungswertes

Die Abbildung 4-37 zeigt das Blockdiagramm für die Leistungsglättung. Auf der Seite 42 wird der Wert durchgeschaltet, wenn die Bedingungen erfüllt sind. Der Mittelwert des Leistungswertes wird mit einem Filter geglättet.

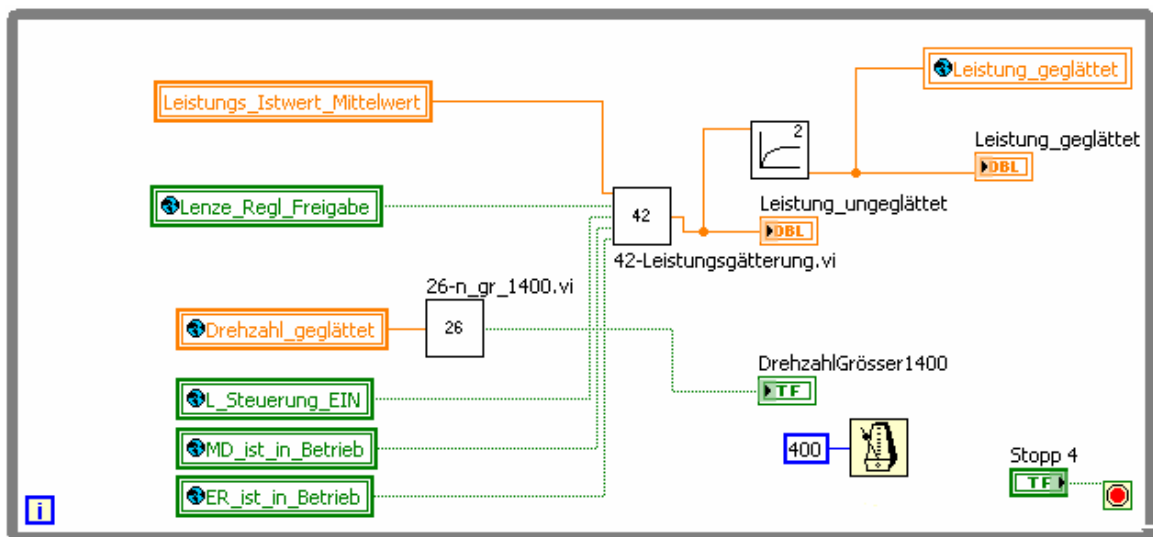


Abbildung 4-37 Blockdiagramm zur Glättung des Leistungswertes

3) Glättung des Drehzahlwertes

Die Drehzahl wird mit derselben Methode geglättet (siehe Abbildung 4-38).

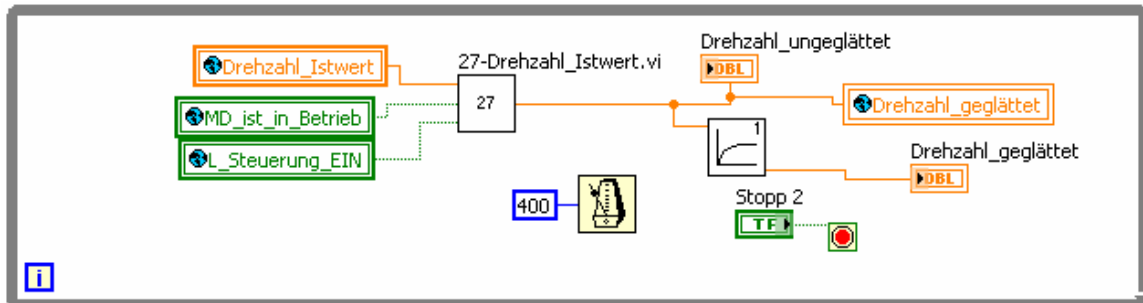


Abbildung 4-38 Blockdiagramm zur Glättung des Drehzahlwertes

## 4.2.2 Sub-VIs als Hilfsfunktionen

Die Hilfsfunktionen sind nicht anders als normale Unterprogramme. Sie befinden sich auf der untersten Ebene des main-Programms (siehe Abbildung 4-27). Sie ersetzen einen Teil des Gesamtprogramms, z. B. eine bestimmte Aufgabe durch eine Hilfsfunktion. Dadurch wird ein komplexes und unübersichtliches Programm, z. B. Main-Programm, in mehrere Unterprogramme zerlegt. Sie dienen zur Vereinfachung des Programmcodes und zum besseren Verständnis. Als Beispiele werden folgende Hilfsfunktionen erklärt.

### 1) Grafische Ermittlung des Leistungsbeiwerts

Der Leistungsbeiwert  $cp$  wird mit Hilfe des  $cp$ -Lambda-Kennfeldes bestimmt. Wie bei der Funktion Optimum wird das  $cp$ -Lambda-Kennfeld in der Funktion „ $cp$ \_grafisch“ mit Stützpunkten gezeichnet. Der Leistungsbeiwert wird durch Eingabe des Lambda-Istwertes im Kennfeld durchgesucht und ermittelt. Das Kennfeld in der Abbildung 4-39 wurde mit LabView erstellt.

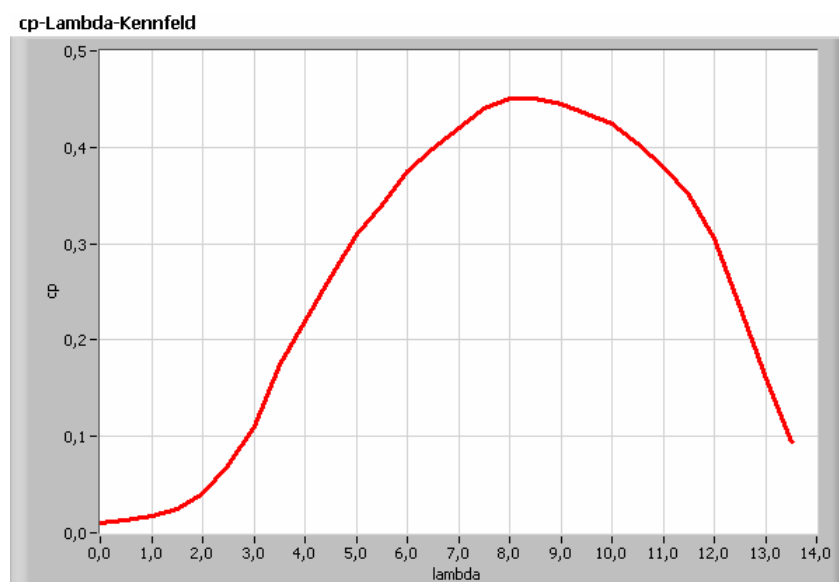


Abbildung 4-39  $cp$ -Lambda-Kennfeld mit grafischen Stützstellen

## 2) Grafische Ermittlung der optimalen Drehzahl

Mit der Funktion „Optimum“ wird der Drehzahlsollwert bei Leistungsoptimierung grafisch bestimmt. Die Drehzahlkennlinie, in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit (Abbildung 4-40), wurde mit Stützpunkten gezeichnet. Wird die gewünschte Windgeschwindigkeit eingegeben, sucht die Funktion die entsprechende optimale Drehzahl.

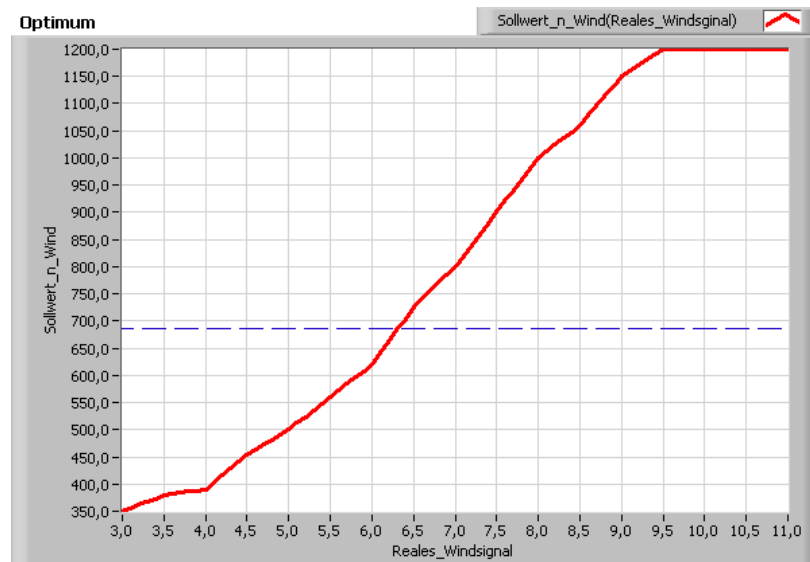


Abbildung 4-40 Optimale Drehzahlkennlinie

## 3) Filter zur Wertglättung

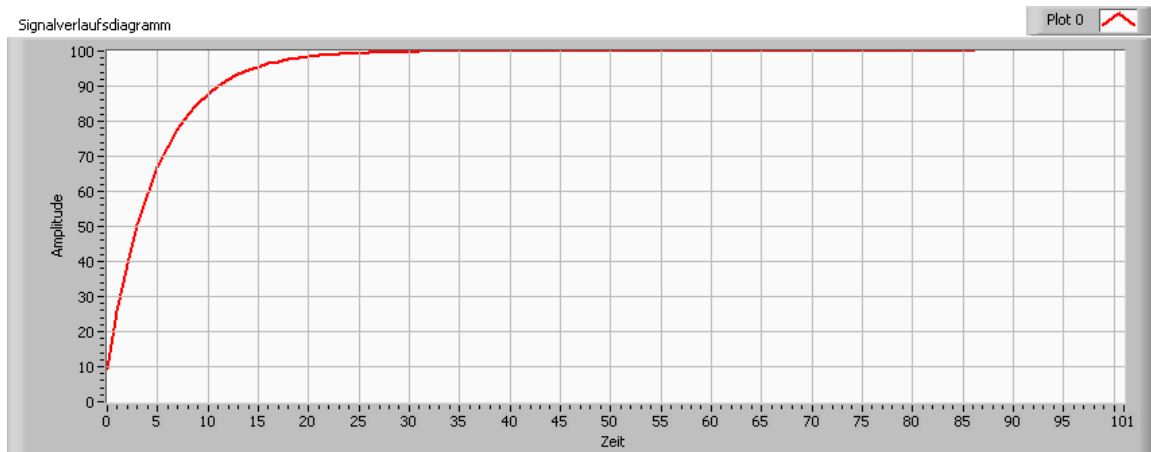
Die Glättungsfilter werden mit Butterworth-Filter PtByPt realisiert. Für den Filter müssen folgende Koeffizienten eingestellt werden.

Filtertyp: Tiefpass

Samplefrequenz(fs): 1Hz

Untere Frequenzgrenze: 0,03Hz

Ordnung: 1



**Abbildung 4-41 Geglättetes Signal**

Die Abbildung 4-41 zeigt das geglättete Signal. Die Anstiegszeit lässt sich verändern, wenn die Samplefrequenz und untere Frequenzgrenze eingestellt werden.

#### **4) Energiefluss des Laborversuchs**

Der Energiefluss wird mit den Bildern veranschaulicht. Im motorischen Betrieb wird die Energie auf beiden Seiten aus dem Netz gezogen und den Generator und die Gleichstrommaschine betreiben (siehe Abbildung 4-24). Im generatorischen Betrieb ist es umgekehrt. Die Gleichstrommaschine entnimmt Energie aus dem Netz und erzeugt wie ein Rotor mechanische Energie. Diese Energie wird dem Generator übertragen und in elektrische Energie umgewandelt. Anschließend wird die erzeugte elektrische Energie ins Netz eingespeist (siehe Abbildung 4-25).

Um eine Animation des Energieflusses zu realisieren wurden jeweils sechs Bilder für jede Betriebsart gezeichnet. Alle Bilder werden in einem Grafik-Ring gespeichert. Sie werden fortlaufend nummeriert und mit dieser Nummer gesteuert, welches Bild gerade angezeigt werden muss.

#### **5) Auswahl der Kennlinien**

Mit der Funktion „Auswahl der Kennlinien“ kann die Kennlinie zum Anzeigen gewählt werden. Außerdem wird die Skalierung für die Kennlinien festgelegt, damit sie in einem Signalanzeiger vernünftig dargestellt werden können. Die Signale haben unterschiedliche Wertebereiche.

#### **6) Globale Variablen**

Die SubVI „Globale Variablen“ ist keine Unterfunktion. Dort werden alle globalen Variablen definiert bzw. initialisiert (Abbildung 4-42). Daher entsteht kein Blockdiagramm. Die globalen Variablen können sowohl im main-Programm als auch im Unterprogramm gelesen und geschrieben werden.



Abbildung 4-42 Definition der globalen Variablen

### 4.3 Erstellen einer ausführbaren Datei

Um das Programm ohne LabView-Editor und alle anderen Werkzeuge ausführen zu können, wird eine ausführbare Datei erstellt. Zur Erstellung dieser Datei muss sich das main-Programm in einem Projekt befinden. Über „Build-Spezifikationen“ in dem Projektextporer kann eine neue Applikation erstellt werden, siehe Abb. 4-1 LabView Projekt-Explorer. Im Fenster „Eigenschaften“ stehen alle Informationen über zu erstellende Programmdatei. Folgende Einstellungen müssen festgelegt werden:

- 1) In der Kategorie „Informationen“ werden der Name der Build-Spezifikation z.B. „Einstellung\_WEA“ und der Zieldateiname z.B. „WEA\_Version0.0.exe“ festgelegt.
- 2) In der Kategorie „Quelldateien“ wird die Ausgangsdatei gewählt, die von der zu startende VI-Datei aufgerufen wird. Die zu startende VI-Datei ist meistens das main-Programm.

Weitere Einstellungen sind optional, z.B. Symbol. Die Einstellungen können mit dem Button „OK“ gespeichert werden (siehe Abbildung 4-43). Eine spätere Änderung ist möglich, wenn die Datei „Einstellung\_WEA“ aufgerufen wird. Die ausführbare Datei, in diesem Fall „WEA\_Version0.0.exe“ wird mit dem Button „Erstellen“ erzeugt. Diese Datei muss aktualisiert werden, wenn die Quelldatei bzw. zu startende Datei geändert wird.

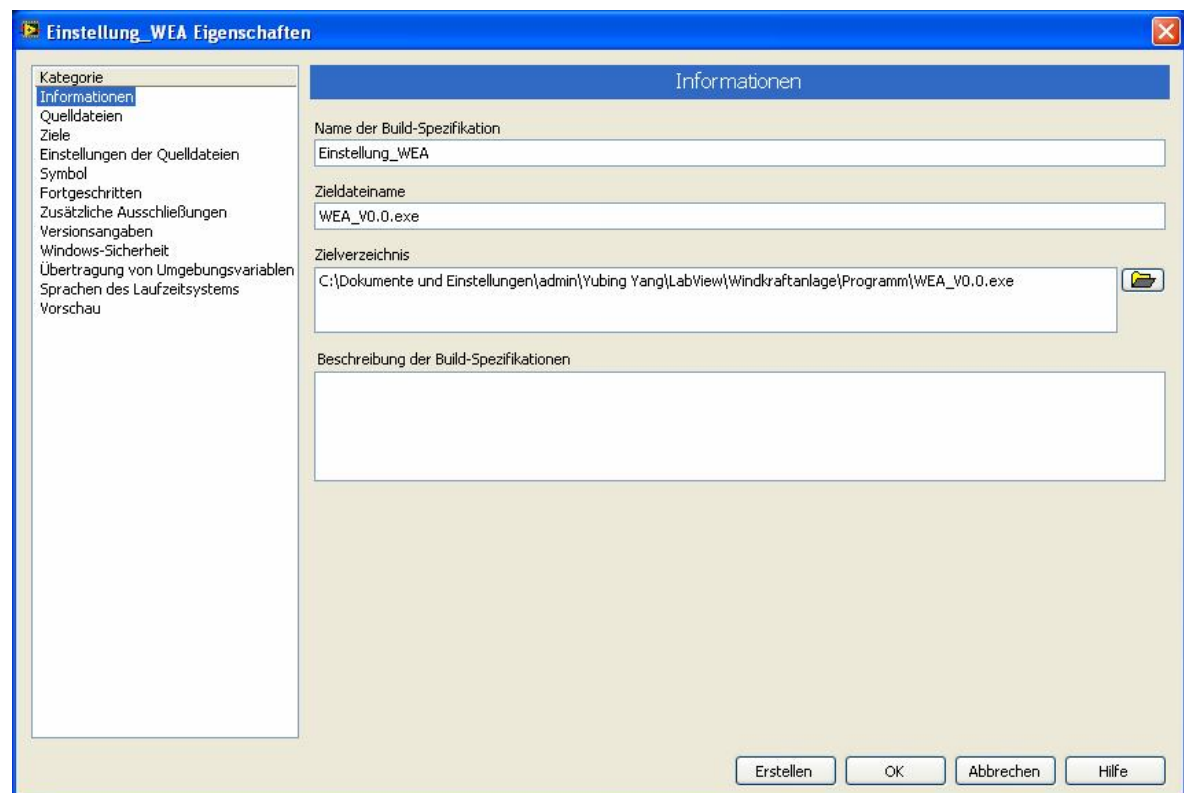


Abbildung 4-43 Erstellen einer ausführbaren Datei



## 4.4 Verifizierung

Um die Genauigkeit bzw. die Richtigkeit des entwickelten Systems zu überprüfen, wird in diesem Abschnitt das Verhalten der Windenergieanlage untersucht, sowie die grafische Darstellung von beiden Systemen verglichen.

### 4.4.1 Kennlinien der WEA

#### 1) Drehmomentkennlinien der WEA

Hier wurden die Drehmomentkennlinien von beiden Systemen verglichen. Gemessen wurden mit dem Drehzahlgeber die Drehzahl und das Drehmoment für unterschiedliche Windgeschwindigkeit (siehe Tabelle A-2 und A-3). Damit kann man die Korrektheit bei der Soll- und Istwertumrechnung überprüfen. Mit den Messwerten wurden diverse Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien für unterschiedliche Windgeschwindigkeit mit MatLab dargestellt (siehe Abbildung A-1 und Abbildung A-2).

Im Vergleich der Abbildung A-1 mit der Abbildung A-2 wird gezeigt, dass die Verläufe der Kennlinien von den beiden System fast identisch sind. Leichte Abweichungen sind bei den Tabelle A-2 und Tabelle A-3 zu erkennen. Diese Abweichungen können beim Auslesen der Messwerte entstehen.

#### 2) Leistungskennlinien der WEA

Die Leistung lässt sich mit der Gleichung 4-25 berechnen. Das Drehmoment und die Drehzahl werden gemessen. Zu beachten ist die Einheit der Drehzahl. Beim Rechnen muss die Einheit von  $[\text{Min}^{-1}]$  nach  $[\text{Sec}^{-1}]$  umgerechnet werden.

$$P = M \cdot \Omega = M \cdot 2 \cdot p \cdot n \quad 4-25^{30}$$

Die Leistungskennlinien wurden ebenfalls mit Matlab gezeichnet (siehe Abbildung A-3 und Abbildung A-4). Es ist zu erkennen, dass die Leistungskennlinien zum größten Teil übereinstimmen. Die mit „o“ markierten Punkte sind jeweils die maximale Leistung bei den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Diese maximalen Punkte entsprechen den optimalen Drehzahlkennlinien (siehe Abbildung 4-31). Die Abweichungen sind in der Tabelle A-4 und Tabelle A-5 erkennbar. Sie sind nicht vermeidbar, weil der Anzeiger ein bisschen rauscht.

### 4.4.2 Stationäres Verhalten bei unterschiedlichen Generatorsystemen

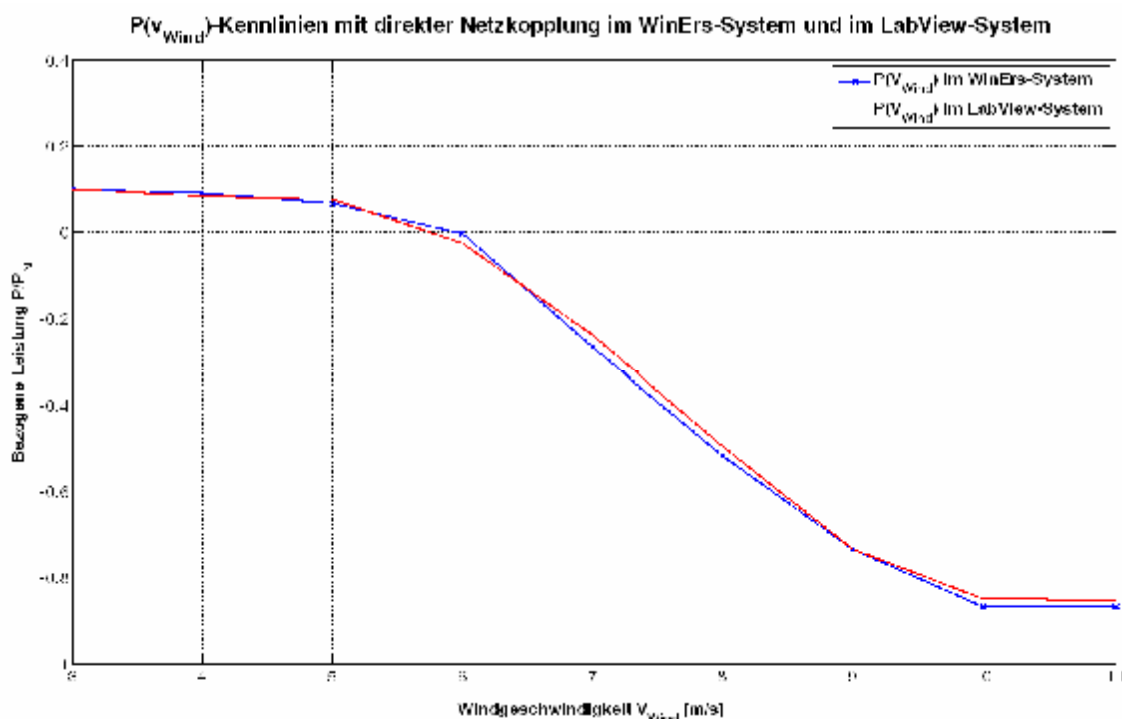
Wie beim alten System wurden zwei Generatorsystemen im LabView-System implementiert: Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung und mit Vollumrichter bzw. Windnachführung. Bei direkter Netzkopplung wurde die Leistung und das Drehmoment bei

---

<sup>30</sup> [2] Seite 216, Formel 6.8

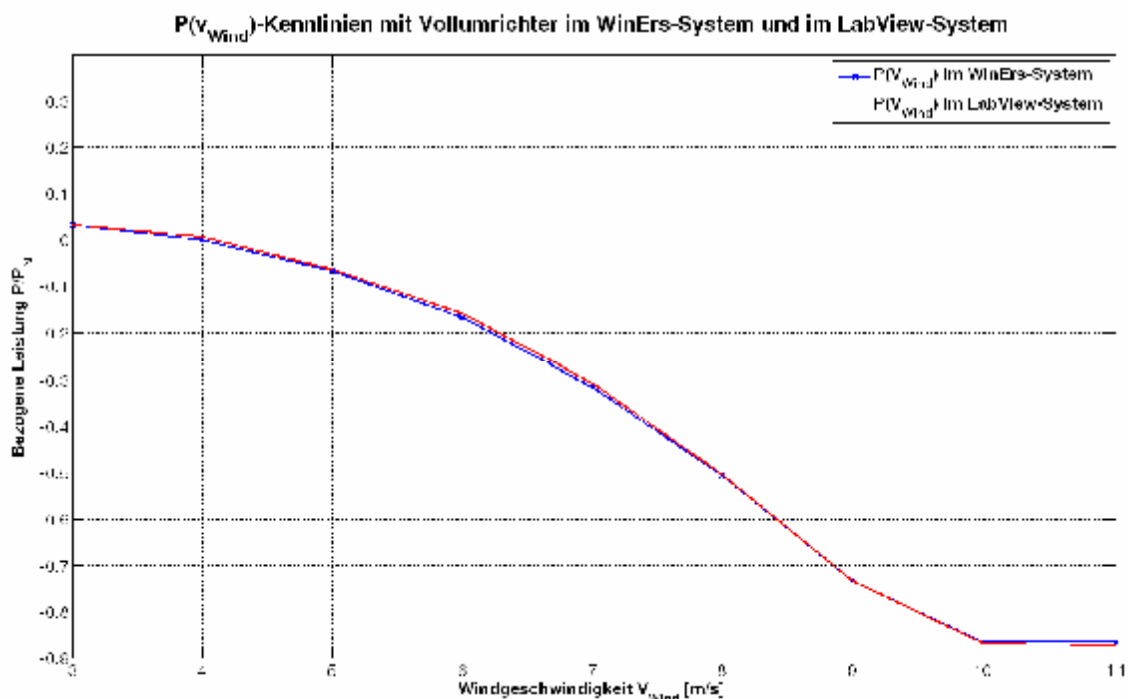
einer Drehzahl von  $1050 \text{ Min}^{-1}$  gemessen. Um den Wirkungsgrad der WEA zu ermitteln, wird die mechanische Leistung mit der Gleichung 4-26 berechnet. Daraus wird der Wirkungsgrad mit der unten stehender Gleichung bestimmt.

$$h(v_{\text{Wind}}) = \frac{P_{el}}{P_{mech}} \quad 4-26$$



**Abbildung 4-44 Vergleich von  $P(v_{\text{Wind}})$  mit direkter Netzkopplung**

Beim Generatorsystem mit Vollumrichter wurde außer Leistung und Drehmoment die Drehzahl des Generators gemessen, weil die Drehzahl mit Vollumrichter von der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Die Berechnung für die mechanische Leistung und Wirkungsgrad bleibt unverändert.



**Abbildung 4-45 Vergleich von  $P(v_{\text{Wind}})$  mit Vollumrichter**

Aus der Abbildung 4-44 und der Abbildung 4-45 ist zu erkennen, dass die Leistungskennlinien von beiden Generatorsystemen im WinErs-System und im LabView-System gut übereinstimmen. Es ist noch zu erkennen, dass die Anlage mit Vollumrichter schon bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s anfängt die Energie ins Netz einzuspeisen. Mit direkter Netzkopplung wird die Energie erst bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s ins Netz eingespeist.

### 4.4.3 Vergleich der grafischen Darstellung

Zum Vergleichen der grafischen Darstellung im WinErs- und LabView-System werden ein Paar Kennlinien mit unterschiedlichen Einstellungen aufgenommen. In den Abbildung 4-46 und 4-52 wurden diverse Kennlinien mit folgenden Einstellungen aufgenommen:

**Windgeschwindigkeit:** 3 m/s -> 6 m/s

**Drehzahlollert:** 350  $\text{Min}^{-1}$  -> 500  $\text{Min}^{-1}$

**Regelverfahren:** manuelle Vorgabe des Drehzahlollwertes

Die Verläufe von beiden Systemen sehen fast identisch aus. Ein Knick des Leistungsbeiwertes (Rote Kennlinie in der Abbildung 4-46 und Abbildung 4-47) tauchte beim Ändern der Windgeschwindigkeit ( $v_{\text{Wind}}$ ) und des Drehzahlollwertes ( $n_{\text{soll}}$ ) in beiden Systemen auf. Die Ursache liegt daran, dass die Drehzahl nicht sofort für die Berechnung da ist, sondern erst nach ein paar Sekunden. Die Schnelllaufzahl wird mit der alten Drehzahl berechnet. Als Folge wird der  $c_p$ -Beiwert auch falsch aus dem  $c_p$ -Lambda-Kennlinienfeld ausgelesen. Erst wenn die Drehzahl mit dem Drehzahlollwert übereinstimmt, wird die Schnelllaufzahl richtig berechnet und der  $c_p$ -Wert richtig

ausgelesen<sup>31</sup>.

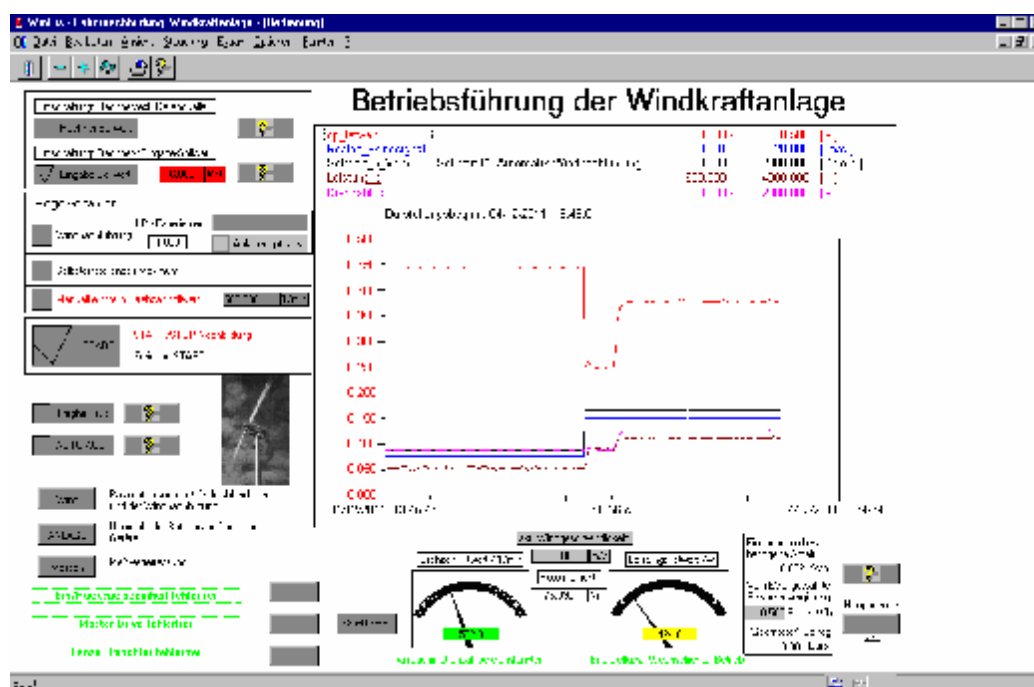


Abbildung 4-46 Signalverläufe von  $v_{wind}$  und  $n_{soll}$  in WinErs

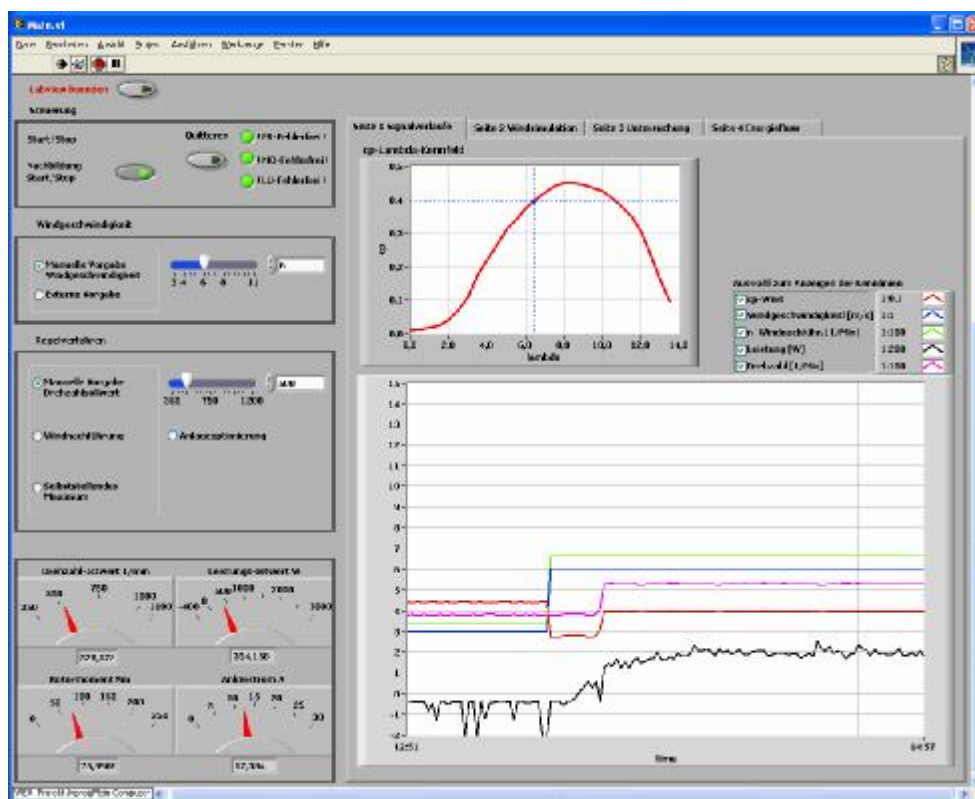


Abbildung 4-47 Signalverläufe von  $v_{wind}$  und  $n_{soll}$  in LabView

<sup>31</sup> Weitere Vergleiche sind in der PDF-Datei „Vergleich\_GrafischeDarstellung.pdf“ auf beigefügter CD zu finden.

## 5 Schluss

### 5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Laborversuch Windenergieanlage auf dem aktuellen technischen Stand modernisiert. Basierend auf einer bestehenden Arbeit wurde das Bedien- und Visualisierungsprogramm für die WEA erfolgreich in LabView umgesetzt. Dabei wurden im neuen System die für den Datenaustausch zuständigen Interface-Karten, durch die Verbindungsklemmern Wago I/O-Systems 750 ersetzt.

Das neue Programm wurde im Betrieb getestet und funktioniert einwandfrei. Dabei wurden folgende Grundfunktionen realisiert:

- I Die Komponenten der WEA können nach Reihenfolge ein- und ausgeschaltet werden.
- I Die Fehler aus den Umrichtern können quittiert werden.
- I Der Maschinensatz kann durch Vorgabe des Grund- und Sprungwertes von Drehzahl oder Drehmoment untersucht werden.
- I Die Windgeschwindigkeit kann durch den Benutzer vorgegeben oder vom Computer generiert werden.
- I Auswahl des Regelverfahrens ist zwischen manuelle Drehzahlvorgabe und Windnachführung möglich.
- I Die Signale, der Arbeitspunkt und der Energiefluss des Aufbaus können grafisch dargestellt werden.

Auch für Übersicht und Verständlichkeit des ganzen Systems wurden die Dokumentationen vervollständigt.

Für eine zeitliche begrenzte Bachelorarbeit ist es nicht möglich, das umfangreiche Programm für den Laborversuch vollständig umzuschreiben. In der vorliegenden Arbeit wurden zwar alle Grundfunktionen implementiert, es können aus zeitökonomischen Gründen einige Funktionen nicht erstellt werden. Es handelt sich dabei um folgende Funktionalitäten:

- I Simulation des Trägheitsmomentes: Unter Berücksichtigung des Trägheitsmomentes werden die Änderung der Drehzahl und der Energie verzögert.
- I Selbststellendes Maximum (MPP-Tracking): Bei diesem Steuerverfahren kann die Drehzahl schrittweise eingestellt werden, bis die Leistung das Maximum erreicht.
- I kWh-Zähler: Die ins Netz eingespeiste Energie und die aus dem Netz entnommene werden summiert und numerisch angezeigt, indem die Leistung über die Zeit integriert.

Für diese Funktionen wurden bei WinErs viele spezielle Grundbausteine wie z. B. I-Glied, S&H-Block, JK-Master-Slave Flipflop-Block usw. angewendet. In LabView stehen diese speziellen Bausteine allerdings nicht zur Verfügung und müssen selbst entwickelt werden, wofür leider keine Zeit mehr übrig bleibt.

Insgesamt stellt die vorliegende Arbeit eine erfolgreiche Nachbildung der Windenergieanlage dar und stellt die Neuentwicklung des Laborversuchs Windenergieanlage sicher. In Zukunft sollte sich die Fortsetzung dieses Projektes auf die fehlenden Funktionalitäten konzentrieren.

## **5.2 Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem Professor Dr.-Ing. Michael Röther und Professor Dr. Thomas Lehmann bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit betreut und unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Frank Korpel und Herrn Dipl.-Ing. Jan Huß für die praktische Unterstützung bedanken. Ohne ihre Hilfe wäre ich nicht fertig geworden.

Ganz besonders Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Haidi Qiu, Seyda Sahin und Sabine Sengelmann, die bei vielen Formulierungen und auch bei der Korrektur der Bachelorarbeit sehr hilfreich zur Seite standen.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Siegfried Heier  
Windkraftanlagen-Systemauslegung, Netzintegration und Regelung,  
5. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag
- [2] Robert Gasch, Jochen Twele  
Windkraftanlagen-Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb  
5. Auflage, Teubner Verlag
- [3] Wolfgang Georgi, Ergun Metin  
Einführung in die LabView  
3. Auflage, Fachverlag Leipzig
- [4] Rolf Fischer  
Elektrische Maschinen  
14. aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag München
- [5] Siemens Betriebsanleitung,  
SIMOVERT Master Drives Ein-/Rückspeiseeinheit Bauform C und K  
Ausgabe G, Bestell-Nr. 6SE7080-0AK85-1AA0
- [6] Siemens Kompendium  
SIMOVERT Master Drives Vector Control  
Ausgabe AG, Bestell-Nr. 6SE7080-0QX60
- [7] Siemens Betriebsanleitung  
SIMOVERT Master Drives Vector Control  
Ausgabe AC, Bestell-Nr. 6SE7087-6KD60
- [8] ADDI-DATA Technisches Referenzhandbuch  
ADDINUM PA 150  
5. Ausgabe 11/92  
[http://www.egmont.com.pl/addi-data/instrukcje/Pa150\\_e.pdf](http://www.egmont.com.pl/addi-data/instrukcje/Pa150_e.pdf)
- [9] ADDI-DATA Technisches Referenzhandbuch  
ADDIALOG PA 302  
10. Ausgabe 12/95  
[http://www.egmont.com.pl/addi-data/instrukcje/Pa302\\_e.pdf](http://www.egmont.com.pl/addi-data/instrukcje/Pa302_e.pdf)

- [10] ADDI-DATA Technische Beschreibung  
PA 350  
Ausgabe 1989
- [11] Ingenieurbüro Schoop  
Bedienanleitung „Erste Schritt“  
Ausgabe 28.10.2008
- [12] Ingenieurbüro Schoop  
Kurzanleitung für WinErs-Probierversion  
Ausgabe 20.05.2009
- [13] Wago Handbuch  
Felddbus-Koppler 750-341  
Version 1.1.1  
[http://www.wago.com/wagoweb\\_china/public/750/ger\\_manu/341/m034100d.pdf](http://www.wago.com/wagoweb_china/public/750/ger_manu/341/m034100d.pdf)
- [14] Wago Handbuch  
Digitale Eingangsklemme 750-430  
Version 1.0.5  
<http://www.bzl-lauterbach.de/ethernet/lektion/komponenten/8%20753430/handbuch430.pdf>
- [15] Wago Handbuch  
Analoge Eingangsklemme 750-457  
Version 1.0.5  
[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197095-an-01-d-e-BUSKLEMME\\_4\\_AI\\_10V\\_DC\\_S\\_E.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197095-an-01-d-e-BUSKLEMME_4_AI_10V_DC_S_E.pdf)
- [16] Wago Handbuch  
Digitale Ausgangsklemme 750-530  
Version 1.0.5  
[http://www.wago.com/wagoweb\\_china/public/750/ger\\_manu/modules/m053000d.pdf](http://www.wago.com/wagoweb_china/public/750/ger_manu/modules/m053000d.pdf)



- [17] Wago Handbuch  
Analoge Ausgangsklemme 750-559  
Version 1.0.6  
[http://www.wago.com/wagoweb\\_china/public/750/ger\\_manu/modules/m055900d.pdf](http://www.wago.com/wagoweb_china/public/750/ger_manu/modules/m055900d.pdf)
- [18] Wago Handbuch  
Bus-Endklemme 750-600  
Version 1.0.5  
[http://www.wago.com/wagoweb\\_china/public/750/ger\\_manu/modules/m060000d.pdf](http://www.wago.com/wagoweb_china/public/750/ger_manu/modules/m060000d.pdf)
- [19] Sven Lopau, Birger Benecke  
Labornachbildung einer Netzeinspeisung einer Windkraftanlage  
Diplomarbeit, Fachhochschule Hamburg, Juli 1997
- [20] Jan Huß  
Aktualisierung auf den technischen neuesten Stand einer Labornachbildung mit Frequenzumrichter, Aysnchron-, Gleichstromantrieb und einer Prozessvisualisierung  
Studienarbeit, Fachhochschule Hamburg, September 1998
- [21] Jan Huß  
Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter und Ein-/Rückspeiseeinheit zur Netzanbindung von Windkraftanlage  
Diplomarbeit, Fachhochschule Hamburg März, 1999
- [22] Wikipedia  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine>, Zugriff: 15.03.2011  
<http://de.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>, Zugriff: 07.04.2011
- [23] WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG  
<http://www.wago.com/cps/rde/xchg/wago/style.xsl/deu-index.html>,  
Zugriff: 21.06.2010
- [24] Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop  
<http://www.schoop.de/>, Zugriff: 25.02.2011
- [25] Wikipedia  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Geradengleichung>, Zugriff: 26.04.2011

---

## A Anhang

Anhang A.1 : Verzeichnis der Formelzeichen

Anhang A.2 : Messdaten und Kennlinien

Anhang A.3 : LabView-Projekt und Ergänzende Dokumente

Der Anhang A.3 ist in elektronischer Form auf einer CD abgelegt und beim Prüfer Prof. Dr. Ing. Micheal Röther einzusehen.

### A.1 Verzeichnis der Formelzeichen

$\ddot{u}$	Getriebeübersetzung
$\lambda$	Schnelllaufzahl
$c_p$	Beiwert
$d$	Rotordurchmesser
$R$	Außenradius des Rotors
$n$	Drehzahl
$\rho$	Luftdichte
$P$	Leistung
$c_m$	Maschinenkonstant
$\Phi$	magnetischer Fluss
$\Omega$	mechanische Winkelgeschwindigkeit
$v$	Windgeschwindigkeit
$u$	Umfangsgeschwindigkeit
$I_A$	Ankerstrom
$M$	Drehmoment

## A.2 Messdaten und Kennlinien

### Verwendete Messgeräte

- [1] BBC Multimeter M2036  
Inventur-Nr. 1026/B9/4N
- [2] HIOKI 3165 Multimessgerät  
Inventur-Nr. 1218/AT
- [3] FLUKE Stromzange  
Inventur-Nr. 1276/AT

**Tabelle A-1 Messdaten für Drehzahl-Spannungs-Kennlinie  $n(U)$**

<b>U[V]</b>	<b>0.8190</b>	<b>0.9332</b>	<b>1.0396</b>	<b>1.1633</b>	<b>1.2673</b>	<b>1.3814</b>	<b>1.4951</b>	<b>1.6093</b>
<b>n[Min<sup>-1</sup>]</b>	<b>350</b>	<b>400</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>600</b>	<b>650</b>	<b>700</b>
<b>U[V]</b>	<b>1.7228</b>	<b>1.8301</b>	<b>1.9501</b>	<b>2.0537</b>	<b>2.1792</b>	<b>2.2931</b>	<b>2.4011</b>	<b>2.5095</b>
<b>n[Min<sup>-1</sup>]</b>	<b>750</b>	<b>800</b>	<b>850</b>	<b>900</b>	<b>950</b>	<b>1000</b>	<b>1050</b>	<b>1100</b>

Tabelle A-2 Messdaten für  $M(n)$  für unterschiedliche  $v_{\text{wind}}$  in WinErs

$V_{\text{wind}}[\text{m/s}]$ $n[\text{Min}^{-1}]$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
400	1.7	5.7	10.3	14.7	19.4	22.8	24.0	23.7	24.4
500	0.2	4.2	9.5	15.0	20.6	25.9	31.0	32.6	32.7
600	-0.4	2.8	7.8	14.1	20.4	27.2	32.6	32.6	32.6
700	-0.5	0.4	6.0	12.1	19.5	26.6	32.5	32.5	32.4
800	-0.7	-0.3	3.7	10.1	17.4	25.6	32.3	32.3	32.3
900	-0.7	-0.4	0.4	7.5	14.7	23.5	32.1	32.2	32.2
1000	-0.7	-0.4	-0.1	4.3	12.1	20.5	29.9	32.1	32.1
1100	-0.7	-0.5	-0.1	0.7	9.0	17.6	26.6	32.0	32.0

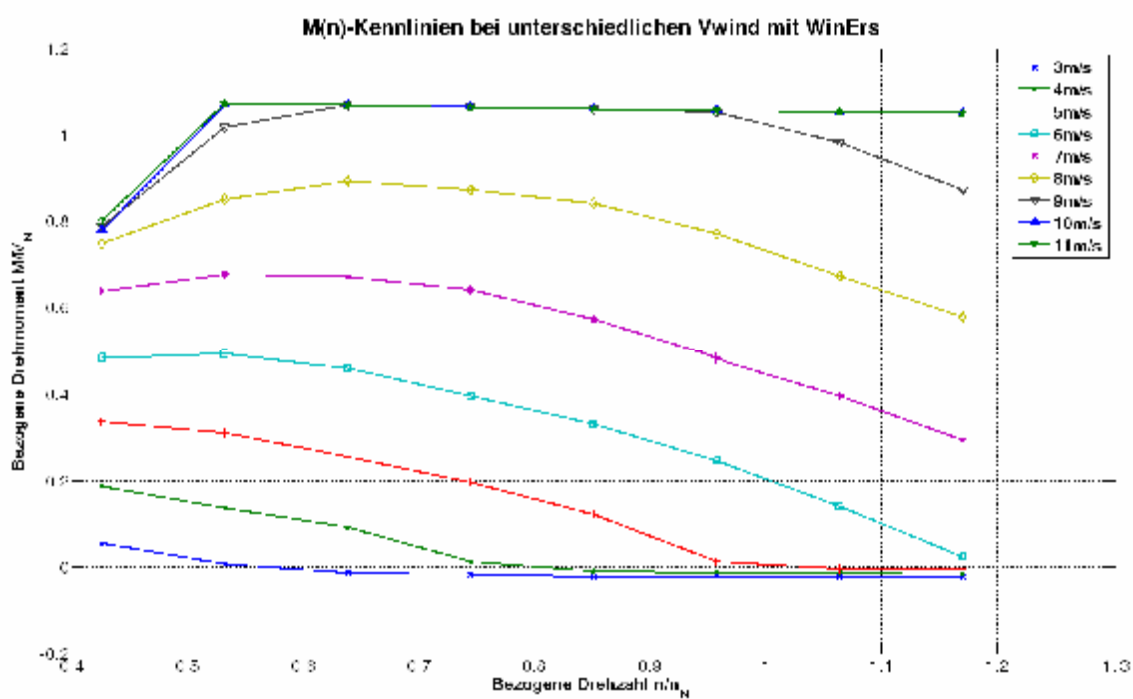
Abbildung A-1 M(n)-Kennlinien bei unterschiedlichen  $v_{\text{wind}}$  in WinErs

Tabelle A-3 M(n)-Kennlinien für unterschiedliche  $v_{\text{Wind}}$  in LabView

$v_{\text{Wind}}[\text{m/s}]$ $n[\text{Min}^{-1}]$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
400	2.2	6.3	10.9	15.8	18.2	21.5	23.5	20.1	22.4
500	0.8	4.9	10.2	15.3	20.4	25.8	30.0	32.5	32.4
600	-0.6	3.3	8.4	14.9	20.3	27.1	32.2	32.3	31.8
700	-0.7	0.6	6.2	12.9	20.2	27.1	32.2	32.2	32.1
800	-0.7	0.5	3.7	10.4	18.0	26.2	31.9	32.1	32.1
900	-0.7	-0.6	1.3	7.9	15.4	23.8	32.0	32.0	32.0
1000	-0.7	-0.6	0.5	4.2	12.8	21.3	30.1	31.8	31.9
1100	-0.6	-0.6	0.5	1.1	10.0	18.4	27.0	31.8	31.7

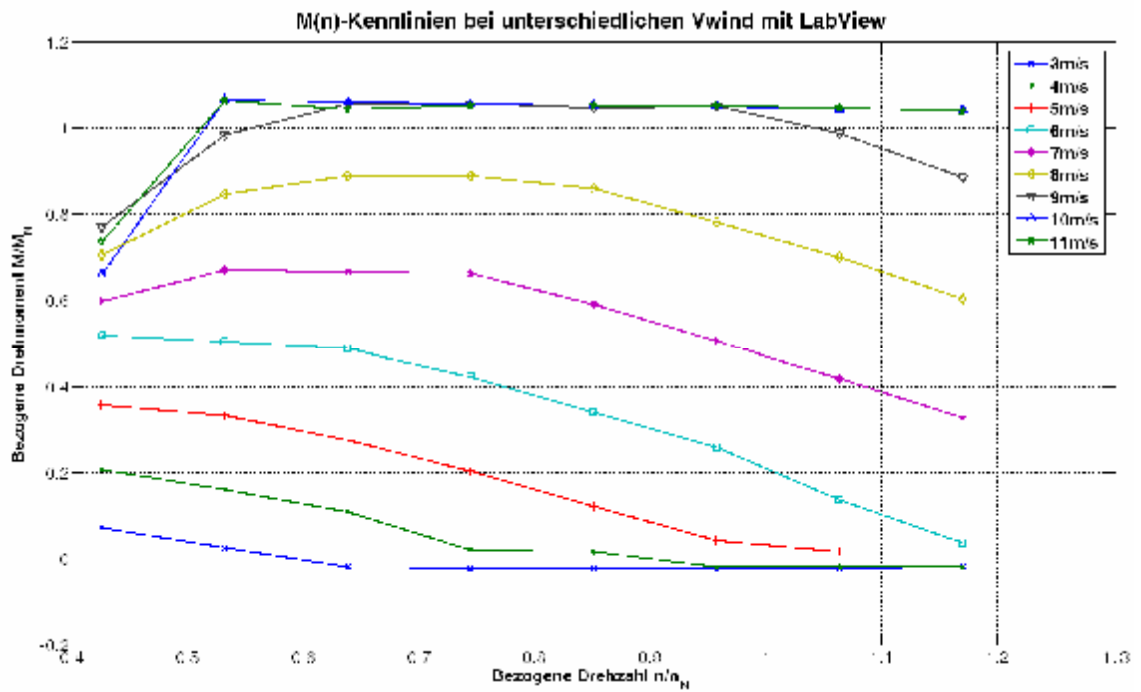
Abbildung A-2 M(n)-Kennlinien bei unterschiedlichen  $v_{\text{Wind}}$  in LabView

Tabelle A-4 P(n)-Kennlinien P(n) für unterschiedliche  $v_{\text{wind}}$  in WinErs

$v_{\text{wind}}[\text{m/s}]$ $n[\text{Min}^{-1}]$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
400	71.2	238.8	431.5	615.8	812.6	955.0	1005.3	992.7	1022.1
500	10.5	219.9	497.4	785.4	1078.6	1356.1	1623.2	1706.9	1712.2
600	-25.1	175.9	490.1	885.9	1281.8	1709.0	2048.3	2048.3	2048.3
700	-36.7	29.3	439.8	887.0	1429.4	1949.9	2382.4	2382.4	2375.0
800	-58.6	-25.1	310.0	846.1	1457.7	2144.7	2706.0	2706.0	2706.0
900	-66.0	-37.7	37.7	706.9	1385.4	2214.8	3025.4	3034.8	3034.8
1000	-73.3	-41.9	-10.5	450.3	1267.1	2146.8	3131.1	3361.5	3361.5
1100	-80.6	-57.6	-11.5	80.6	1036.7	2027.4	3064.1	3686.1	3686.1

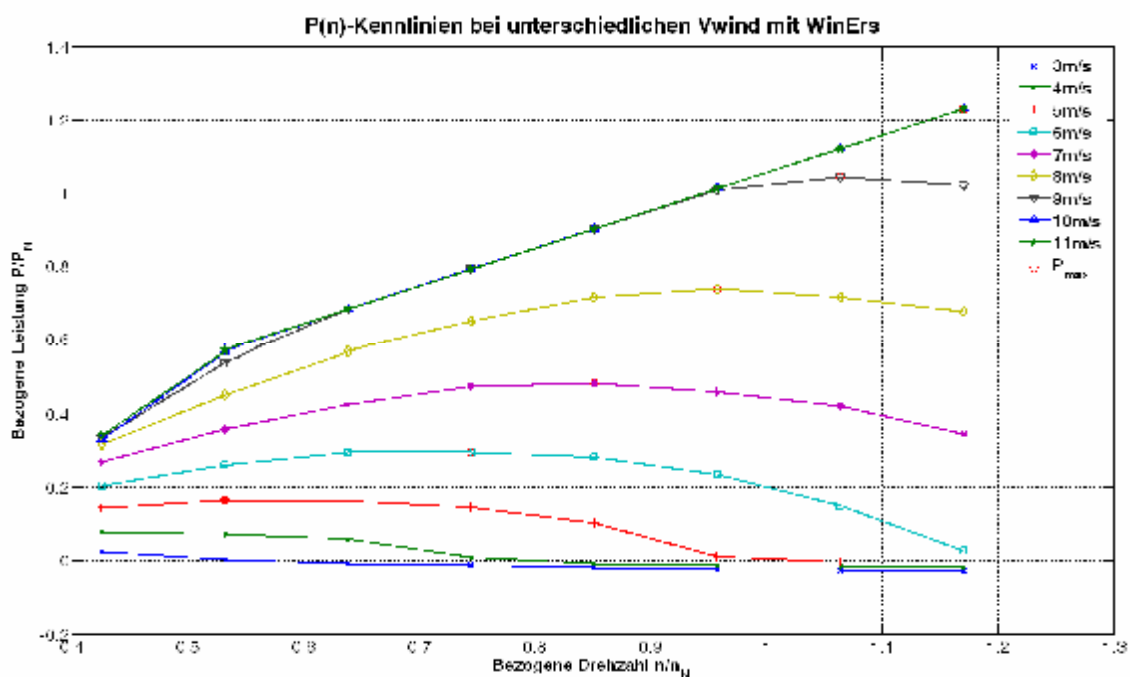
Abbildung A-3 P(n)-Kennlinien bei unterschiedlichen  $v_{\text{wind}}$  in WinErs

Tabelle A-5 P(n)-Kennlinien P(n) für unterschiedliche  $v_{wind}$  in LabView

$V_{wind}[m/s]$ $n[Min^{-1}]$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
400	92.2	263.9	456.6	661.8	762.4	900.6	984.4	841.9	938.3
500	41.9	256.6	534.1	801.1	1068.1	1350.9	1570.8	1701.7	1696.5
600	-37.7	207.3	527.8	936.2	1275.5	1702.7	2023.2	2029.5	1998.1
700	-51.3	44.0	454.5	945.6	1480.7	1986.5	2360.4	2360.4	2353.1
800	-58.6	41.9	310.0	871.3	1508.0	2194.9	2672.4	2689.2	2689.2
900	-66.0	-56.5	122.5	744.6	1451.4	2243.1	3015.9	3015.9	3015.9
1000	-73.3	-62.8	52.4	439.8	1340.4	2230.5	3152.1	3330.1	3340.6
1100	-69.1	-69.1	57.6	126.7	1151.9	2119.5	3110.2	3663.1	3651.6

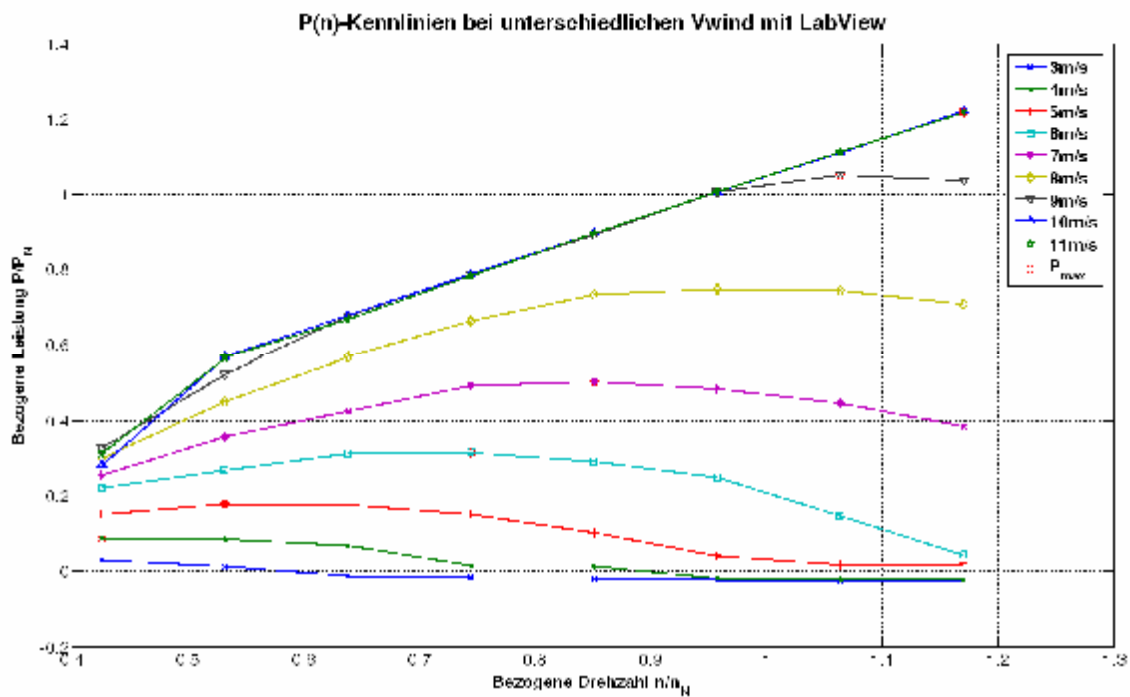


Abbildung A-4 P(n)-Kennlinien bei unterschiedlichen  $v_{wind}$  in LabView

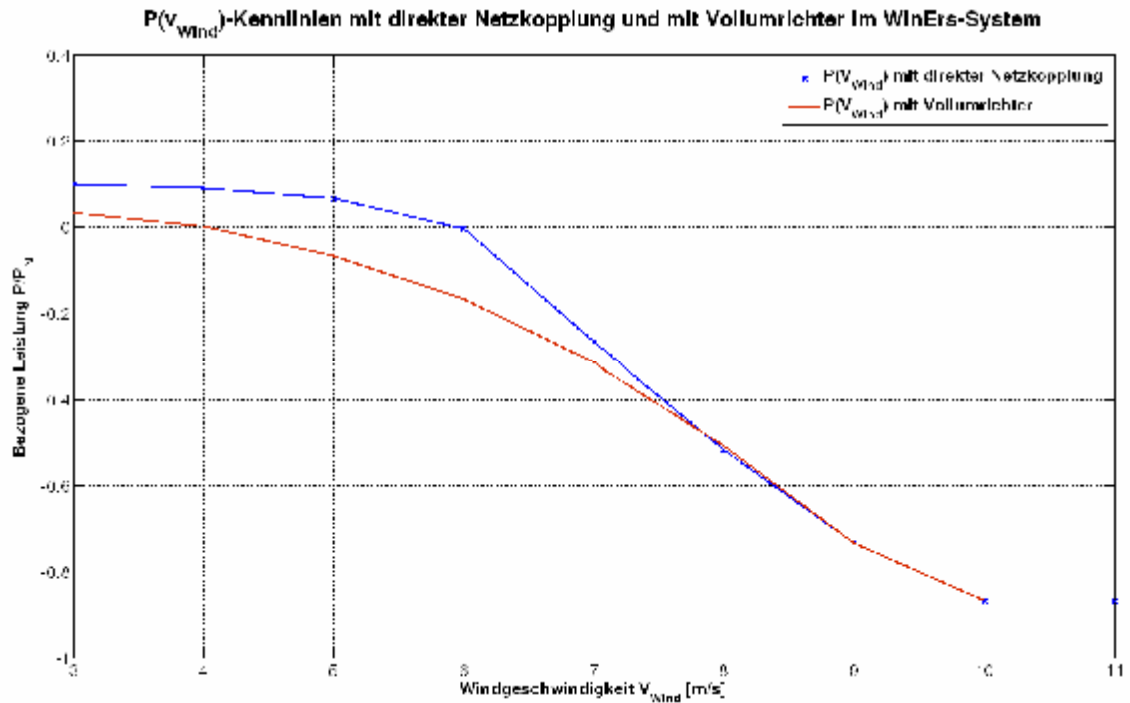
**Tabelle A-6 Messdaten für  $P(v_{Wind})$  mit direkter Netzkopplung in WinErs**

$V_{wind}[m/s]$	$P_{el}[W]$	$n[Min^{-1}]$	$M[Nm]$	$P_{mech}[W]$	$h(v_{Wind}) = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$
3	300	1055	-0.7	-77.3	-
4	270	1055	-0.4	-44.2	-
5	200	1055	0	0	-
6	-10	1055	2.2	243.1	0.04
7	-800	1055	10.6	1171.1	0.68
8	-1550	1055	19.0	2099.1	0.74
9	-2200	1055	28.0	3093.4	0.73
10	-2600	1055	32.0	3535.3	0.72
11	-2600	1055	32.0	3535.3	0.72

**Tabelle A-7 Messdaten für  $P(v_{Wind})$  mit Vollumrichter in WinErs**

$V_{wind}[m/s]$	$P_{el}[W]$	$n[Min^{-1}]$	$M[Nm]$	$P_{mech}[W]$	$h(v_{Wind}) = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$
3	100	350	2.3	84.3	-
4	5	351	6.0	220.5	0.023
5	-200	501	9.4	493.2	0.406
6	-500	625	13.7	896.7	0.558
7	-950	795	17.4	1448.6	0.656
8	-1520	1000	20.1	2104.9	0.722
9	-2200	1100	26.5	3052.6	0.721
10	-2600	1094	31.6	3620.2	0.718
11	-2600	1100	31.6	3640.1	0.714





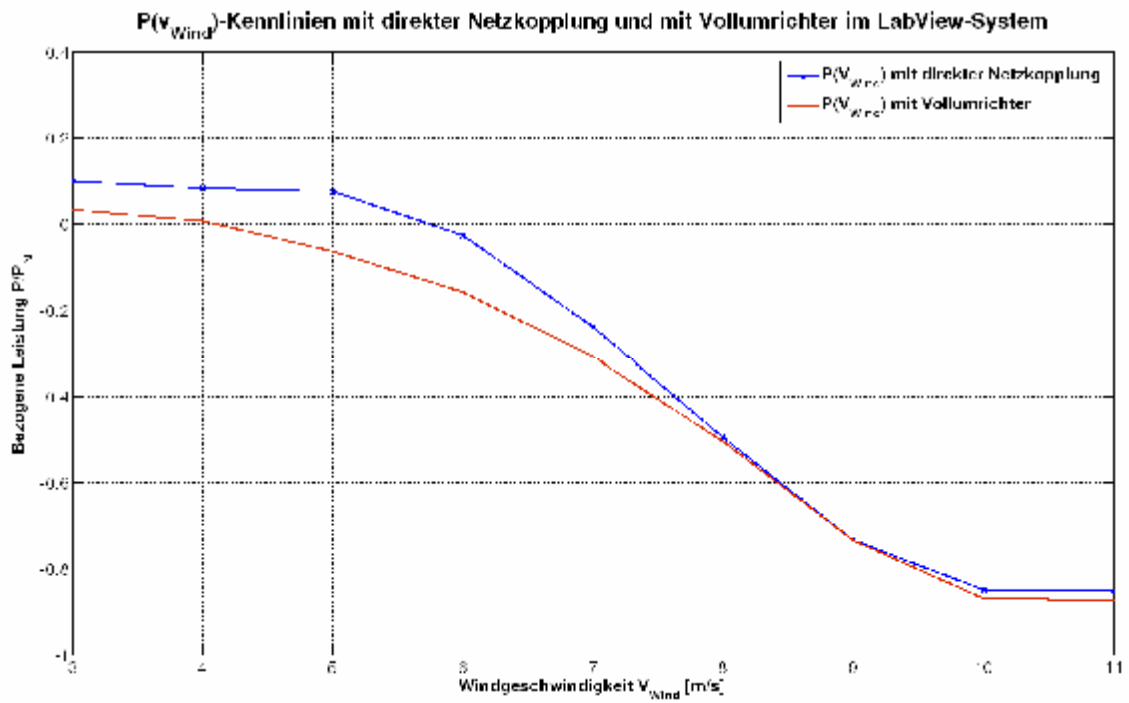
**Abbildung A-5  $P(v_{\text{Wind}})$  mit direkter Netzkopplung und Vollumrichter in WinErs**

**Tabelle A-8 Messdaten für  $P(v_{\text{Wind}})$  mit direkter Netzkopplung in LabView**

$v_{\text{Wind}}$ [m/s]	$P_{el}$ [W]	$n$ [Min <sup>-1</sup> ]	$M$ [Nm]	$P_{mech}$ [W]	$h(v_{\text{Wind}}) = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$
3	303.006	1054	0	0	-
4	248.055	1055	0	0	-
5	229.544	1055	0.1	11.0	-
6	76.8363	1055	2.3	254.1	0.30
7	-716.349	1055	10.8	1193.2	0.60
8	-1483.22	1055	19.2	2121.2	0.70
9	-2201.20	1055	28.2	3115.5	0.71
10	-2545.09	1054	32.4	3576.1	0.71
11	-2557.38	1055	32.5	3590.6	0.71

Tabelle A-9 Messdaten für  $P(v_{Wind})$  mit Vollumrichter in LabView

$v_{wind}[m/s]$	$P_{el}[W]$	$n[Min^{-1}]$	$M[Nm]$	$P_{mech}[W]$	$h(v_{Wind}) = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$
3	102.577	351	3.1	113.9	-
4	23.330	391	6.6	270.2	0.09
5	-190.114	502	10.1	531.0	0.36
6	-475.284	622	14.2	924.9	0.51
7	-925.766	804	17.6	1481.8	0.62
8	-1511.900	1005	20.6	2168.0	0.70
9	-2202.510	1105	26.4	3054.9	0.72
10	-2604.670	1106	32.2	3729.4	0.70
11	-2617.250	1105	32.5	3760.7	0.70

Abbildung A-6  $P(v_{Wind})$  mit direkter Netzkopplung und Vollumrichter in LabView

### **A.3 Projektdatei und Ergänzende Dokumente**

1. LabView Projekt „WEA\_Projekt“
2. Vergleich\_GrafischeDarstellung.pdf
3. Gliederung\_WinErs.vsd
4. Gliederung\_LabView.vsd
5. Pinbelegung.vsd
6. Gliederung\_Hardware\_WinErs.bmp
7. Gliederung\_Simulation\_WinErs.bmp
8. Gliederung\_Visualisierung\_WinErs.bmp
9. Gliederung\_Daten\_WinErs.bmp
10. Aufbau\_WEA.bmp
11. Aufbau\_WinErs.bmp
12. Gliederung\_1\_LavView.bmp
13. Gliederung\_2\_LavView.bmp
14. Aufbau\_LabView.bmp
15. Pinbelegung\_Gesamtübersicht.bmp
16. Pinbelegung\_PA150.bmp
17. Pinbelegung\_PA302.bmp
18. Pinbelegung\_PA350.bmp
19. Verkabelung\_AAWandler.bmp
20. Verkabelung\_Einzeln.bmp
21. Verkabelung\_Gesamt.bmp

# Versicherung über Selbstständigkeit

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

Hamburg, den 06.05.2011

Ort, Datum

Unterschrift