

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

Diplomarbeit

Sensorloser Extruderantrieb mit einer permanentenerregten Synchronmaschine

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. M. Schrödl
Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen
Gußhausstraße 27/372, A-1040 Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik

von

Wolfgang Staffler
Matr.Nr. 9925487
Kalchgruben 489, I-39016 St. Walburg/Ulten

Wien, im März 2005

Kurzfassung

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es die aktuelle Rotorlage einer permanenterregten Synchronmaschine im Stillstand sensorlos zu erfassen. Der Antrieb soll im späteren Betrieb mit einem Inkrementalgeber ausgestattet sein, weshalb zuvor die Startposition des Rotors als Referenzwert für den Geber bekannt sein muss.

Diese Untersuchungen der Rotorlage im sensorlosen Betrieb haben auf Basis von zwei unterschiedlichen Strommessvarianten zu erfolgen. Die Ergebnisse werden anschließend mit Hilfe der Statistik ausgewertet und die Abweichungen des Modellwinkels für die beiden Strommessverfahren werden betrachtet und verglichen. Eine Strommessvariante liefert eine ungefilterte Messung des Stromwertes. Dem zweiten Strommessverfahren ist ein Butterworthfilter dritter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 15kHz nachgeschaltet.

Die sensorlose Lageerfassung im Stillstand erfolgt mit der am Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen entwickelten INFORM-Methode, die die magnetischen Eigenschaften der Maschine in Abhängigkeit der Rotorlage auswertet. Der Fehler des Modellwinkels beschreibt in Abhängigkeit der Rotorposition eine Funktion mit periodischem Charakter, die mit Hilfe einer zuvor ermittelten Korrekturfunktion angenähert werden kann. Dadurch kann der Modellwinkel korrigiert und die Abweichung klein gehalten werden. Grundsätzlich müssen für vier verschiedene Betriebsfälle eine neue Korrekturfunktion ermittelt werden.

Um die Abweichung des Modellwinkels gegenüber der Absolutangabe des Lagegebers zusätzlich zu verkleinern und möglichst gering zu halten, werden verschiedene Ansätze für die Auslegung der optimalen Schussesequenz für die INFORM-Methode verfolgt. Die Ermittlung von systematischen Abweichungen, sowie der dazugehörigen Korrekturfunktion erfolgt in allen Betriebsfällen unter gleichen Bedingungen, sodass die verschiedenen Ergebnisse optimal miteinander verglichen werden können.

Weiterführend wird hier die sensorlose Lageerfassung bei tiefen Drehzahlen untersucht. Aufgabe dabei ist es zunächst nur festzustellen, ob die sensorlose Drehzahlregelung implementiert werden kann und ein sinnvoller Betrieb möglich ist. Auf die Optimierung der INFORM-Methode bei tiefen Drehzahlen für den vorliegenden Antrieb wird hier nicht eingegangen.

Abstract

In this diploma-thesis, a sensorless position estimation of a permanent magnet synchronous motor especially at standstill is described. The basic idea is to equip the motor with an incremental position encoder. For this purpose the rotor angular position at standstill must be well known.

The sensorless rotor position has to be detected and analyzed by two different methods of current measurements. Subsequently the results are evaluated with the help of statistics. Depending on the applied method of current measurement, certain systematic errors and deviations occur relating to the sensorless determination of the rotor position. In addition to that the deviations, but also the accuracies of the rotor position estimation are compared with each other, by using the two different methods of current measurements. One method of current measurement is combined with a third order Butterworth filter.

Sensorless position estimation at standstill can be realized by utilizing the INFORM-method. The INFORM-method evaluates the different magnetic properties of the machine which depend on the rotor position. The basic idea of the INFORM-method is to measure the current response which is evoked by voltage space phasors applied in different directions. The deviation of the mathematical rotor position of the INFORM-model resembles a periodic function. This function can be approached by a curve which corrects the sensorless rotor position estimation. There are four different working conditions to detect the sensorless rotor position. In addition, several correction functions concerning the present condition are required.

To keep the deviation of the angle detected by the INFORM-model as small as possible, the INFORM-measurement sequence is optimized with many approaches. For an expressive comparison, the conditions to investigate the systematic accuracy of the rotor position, and to determine a correction function, are equal.

Furthermore this diploma-thesis investigates the sensorless position estimation at low speed. First it is necessary to clarify if the sensorless control of this PSMS at low speed is at all possible. Applying the INFORM-method at low speed, a highly dynamic sensorless drive for speed- and torque-controlled operation, as well as simple position control with limited accuracy can be obtained. The INFORM-method at low speed is in this context implemented without a optimization for the present motor.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort und Aufgabenstellung	1
2	Der Spannungszwischenkreisumrichter	3
2.1	Beschreibung des IGBT-Umrichtersystems	3
3	Allgemeine Beschreibung der PSM	5
3.1	Aufbau und Funktionsweise	5
3.2	Technische Daten und Normierung der Maschine	6
3.3	Mathematische Beschreibung der PSM	7
4	Softwarekomponenten	10
4.1	Die Programmiersprache HANSL	10
4.2	Echtzeitkommunikation	10
4.3	Kommunikation fürs RAM	10
5	Die TU-Elektronik	11
5.1	Die Signalprozessorplatine	11
5.2	Die Mess- und Ansteuerelektronik	12
5.2.1	LEM - Wandler	14
5.2.2	Die Strommessung nach TU-Standard mit Überstromabschaltung	15
5.2.3	Ansteuerschaltung für die Halbleiterventile und Totzeitgenerierung	15
5.2.4	Anbindung der TU-Elektronik an den Umrichter IRIS U33C . .	17
5.2.5	Die PDRIVE - Strommessung mit Butterworthfilter	19
5.2.6	Messung von Strang- und Zwischenkreisspannung	22
5.3	Der Absolutlagegeber	23
6	Die INFORM -Methode zur Rotorlageerfassung	27
6.1	Theoretische Grundlagen der INFORM-Methode	27
6.2	Die Realteilauswertung	31
7	Sensorlose Positionserfassung im Stillstand	33
7.1	Die Großsignal-INFORM-Sequenz	33
7.2	Umrichter im Diodenbetrieb	39
7.2.1	Ungefilterte Strommessung im Diodenbetrieb	42

7.2.2	Strommessung mit Butterworthfilter im Diodenbetrieb	46
7.3	Umrichter im Hochsetzbetrieb	50
7.3.1	Ungefilterte Strommessung im Hochsetzbetrieb	50
7.3.2	Strommessung mit Butterworthfilter im Hochsetzbetrieb	54
8	Anfangswinkelbestimmung – Zusammenfassung	58
9	Sensorlose Lagerfassung bei tiefen Drehzahlen	63
9.1	Drehzahlbeobachter	63
9.2	Die INFORM-Sequenz	64
9.3	Umrichter im Diodenbetrieb	65
9.3.1	Ungefilterte Strommessung	65
9.3.2	Strommessung mit Butterworthfilter	71
9.4	Umrichter im Hochsetzbetrieb	76
9.4.1	Ungefilterte Strommessung	77
9.4.2	Strommessung mit Butterworthfilter	82
10	Resümee und Ausblick	88
11	Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen	90
A	Gehäuse und Fernbedienung des Umrichters	93
B	Programmlistings	95
B.1	Das HANSL-Programm	95
B.2	Das MATLAB Programm für die Statistik	116
B.2.1	Das m-File hex2hansl.m	116
C	Datenblatt des Umrichters	122
D	Die Software DADA	123

1 Vorwort und Aufgabenstellung

Diese Diplomarbeit wird im Zusammenhang mit einem Projekt des Instituts für Elektrische Antriebe und Maschinen durchgeführt. Das Ziel dabei ist der Aufbau und die Realisierung eines sensorlosen PDRIVE Extruderantriebes mittels einer permanentmagneterregten Synchronmaschine. Aufgrund der hohen Kosten eines Absolutlagegebers soll dieser Antrieb später nur mit einem Inkrementalgeber ausgestattet sein, der jedoch zur Bestimmung der Anfangsposition der Maschine ungeeignet ist. Um nun die Anfangslage des Antriebs dennoch erfassen zu können, wird hierzu das bewährte INFORM - Verfahren angewendet, das im Verlauf dieser Arbeit optimal dem gegebenen Antrieb angepasst wird. Das INFORM - Modell eignet sich besonders zur Lageerfassung bei tiefen Drehzahlen, sowie im Stillstand der Maschine. Um die Abweichungen der berechneten Rotorlage im Vergleich zur tatsächlichen Istlage des Rotors gut bewerten zu können und optimale Ergebnisse zu erhalten, wird im Zuge dieser Arbeit ein 12Bit Absolutlagegeber verwendet.

Die Untersuchungen an der PSM und die Auswertung ihrer INFORM-Eigenschaften sind auf Basis von zwei unterschiedlichen Strommessungen durchzuführen. Diese Strommessungen sind im Vorfeld auf einen Print aufzubauen und zu testen.

Die Diplomarbeit beinhaltet folgende Aufgaben:

1. **Aufbau einer Elektronik auf Basis des digitalen Signalprozessors TMS320F2407 von Texas Instruments**

Es muss ein Platinenlayout, im folgenden TU-Elektronik genannt, entwickelt und realisiert werden, das zum einen die Stromerfassung nach TU-Standard beinhaltet und zum Anderen die Stromerfassung nach Vorlage der PDRIVE Schaltung erfüllt. Diese beiden Strommessungen werden in ihren Eigenschaften später in dieser Arbeit verglichen. Zusätzlich soll auf dem Print eine Spannungserfassung sowie eine Ankoppelschaltung an den DSP ausgeführt werden.

2. **Ansteuerung des maschinenseitigen Umrichters**

Die Ansteuerung des maschinenseitigen Umrichters erfolgt mit der auf der TU-Elektronik implementierten optischen Einheit und der TU-HANSL-Elektronik. Zu diesem Zweck muss in der TU-Elektronik eine Totzeitgenerierung von typisch $2.5\mu\text{s}$ realisiert werden.

3. Festlegen einer geeigneten PSM-Maschine mit ausreichenden INFORM-Eigenschaften

4. Programmieren von INFORM-Testsignalen

Zur Ermittlung der Rotorposition sollen Testsignale ausprogrammiert werden, die falls notwendig durch unüblich lange Messzeiten, sowie Mittelung über mehrere Messungen als auch über mehrere INFORM-Sequenzen optimiert werden. Die Auswertung der INFORM-Rohdaten hat sowohl mit der TU-Strommessung, als auch mit der PDRIVE-Strommessung zu erfolgen. Ist eine optimale problemspezifische Auswertung der Rotorlage gefunden worden, wird in mehreren Messreihen die Anfangslage bestimmt und mit der Absolutlage des Absolutlagegeber verglichen und diskutiert. Die auftretenden statistischen Abweichungen der berechneten Rotorlage in verschiedenen Winkelpositionen des Rotors sollen durch eine geeignete Funktion korrigiert werden.

Zusätzlich zur Anfangsposition, soll die Rotorlage online mit Hilfe der INFORM-Methode bestimmt, sowie die Qualität des Online-Verfahrens in Abhängigkeit mehrerer Parameter untersucht werden.

2 Der Spannungszwischenkreisumrichter

2.1 Beschreibung des IGBT-Umrichtersystems

Bei dem im Zuge dieser Arbeit verwendeten Umrichter-System handelt es sich um einen Vierquadranten-Spannungszwischenkreis-Umrichter des Typs IRIS U33C des Herstellers VA TECH ELIN EBG Elektronik GmbH & Co. Der Umrichter unterteilt sich grob gesprochen in einen Netzstromrichter und einen Maschinenstromrichter. In beiden Fällen handelt es sich um Pulsstromrichter (Hochsetzsteller) bestehend aus sechs Leistungshalbleiterschaltern in IGBT-Technik und dazugehörigen Freilaufdioden (Abb.2.1). Die Freilaufdiode übernimmt den von der lastseitigen Induktivität getriebenen Strom, wenn ein Leistungshalbleiter zu sperren beginnt. Diese Art von Umrichter ermöglicht nicht nur einen energieeffizienten Betrieb, sondern erfüllt hochdynamisch, in Verbindung mit leistungsfähigen Prozessoren, eine Vielzahl von Anforderungen.

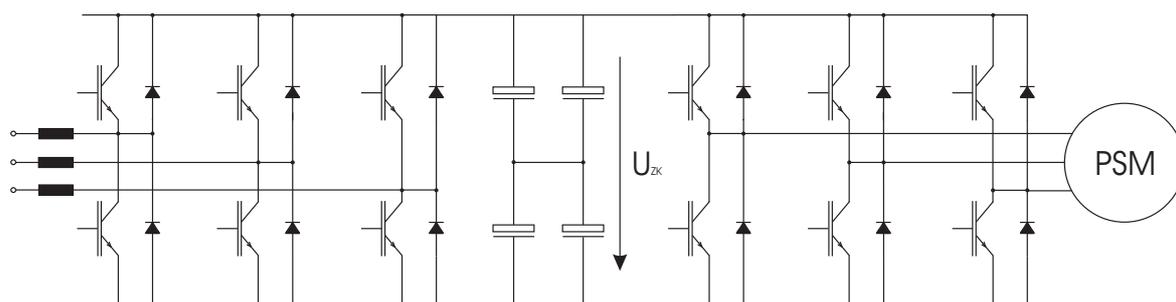


Abbildung 2.1: Prinzipschaltbild eines rückspeisefähigen Spannungszwischenkreisumrichters

Der netzseitige Umrichter wird zunächst, obwohl er als Hochsetzsteller ausgeführt ist, nur als konventioneller Diodengleichrichter betrieben. Der Umrichter besitzt nun die Eigenschaft, dass durch die konstant gehaltene Zwischenkreisspannung und

die durch den ungesteuerten Netzgleichrichter vorgegebene Stromrichtung nur eine Energieflussrichtung und daher kein Rückspeisen ins Versorgungsnetz möglich ist. Die so auftretende konstante Zwischenkreisspannung einer dreiphasigen Dioden-Brückenschaltung beträgt bei einer Außenleiterspannung von 400V:

$$400V \cdot \sqrt{2} = 565V \quad (2.1)$$

Im Gleichspannungszwischenkreis befindet sich der Zwischenkreiskondensator, durch den der maschinenseitige Wechselrichter vollkommen von der Eingangsseite, dem speisenden Netz, entkoppelt ist [12]. Die Schwankungen der Gleichspannung sollen gering gehalten werden, damit an der Ausgangsseite möglichst ideale Bedingungen anliegen. Mit der ungesteuerten Brückenschaltung am Netz besitzt die Zwischenkreisspannung im stationären Zustand eine Welligkeit, mit der sechsfachen Netzfrequenz, welche aus den Lade- und Entladevorgängen des Kondensators resultiert.

Der Maschinenstromrichter arbeitet mit einer mittleren Pulsfrequenz von ca. 5kHz. Diese Frequenz wird über die PWM - Funktion vom digitalen Signalprozessor (DSP) generiert und steuert die Halbleiterventile des maschinenseitigen Umrichters. In Abhängigkeit des Ausgangsstromes wird durch pulswertenmoduliertes Schalten der Ausgangsspannung das erforderliche Drehfeld erzeugt. Aus dem Wechselrichter durch die PWM geht eine Spannung hervor, die im Mittelwert wieder eine Sinusschwingung darstellt.

Für den Vierquadrantenbetrieb (4Q-Betrieb) im Dreiphasennetz müssen sowohl der netzseitige Pulsrichter, als auch der maschinenseitige Wechselrichter gesteuert betrieben werden. Die Zwischenkreisspannung wird im 4Q-Betrieb auf einen Wert hoch gesetzt, der oberhalb des durch den Diodengleichrichter bestimmten Gleichrichterwerts liegt. Übersteigt die Spannung diesen Wert, dann wird die überschüssige Energie ins Netz zurückgespeist [1]. Dieser Vierquadranten-Spannungszwischenkreisumrichter verfügt im hochgesetzten Betrieb über eine eingestellte Zwischenkreisspannung von 770V.

Die Vorteile der Netzzurückspeisung sind:

- Die Bremsenergie des Antriebs wird nicht in Wärme umgesetzt, sondern ins Netz zurückgespeist
- die Netzzurückspeisung ist grundsätzlich auch im Dauerbetrieb möglich
- abhängig von der Steuerung wird ein sinusförmiger Netzstrom erreicht

3 Allgemeine Beschreibung der PSM

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine gewinnt zunehmend große Bedeutung gegenüber der bisher in geregelten Antrieben dominierenden Gleichstrommaschinen und besitzt zudem gegenüber der Asynchronmaschine den Vorteil der einfachen Regelbarkeit im hochdynamischen Betrieb [6]. Durch weitere Eigenschaften, wie

- ein hoher Wirkungsgrad im Vergleich zur ASM durch permanentmagnetischer Erregung
- die kompakte Baugröße und der Wegfall des mechanischen Kommutators, die die Maschine robust und wartungsarm machen
- sowie ein geringeres Trägheitsmoment und die höhere Belastungsfähigkeit der Maschine

nehmen die Anwendungsmöglichkeiten der PSM stark zu.

Ebenso werden Grenzen durch thermische Belastbarkeit und die Korrosionsanfälligkeit der Dauermagnete durch Weiterentwicklungen in der Werkstofftechnologie und besseren Materialeigenschaften überwunden.

3.1 Aufbau und Funktionsweise

Der Prinzipielle Aufbau einer PSM mit genutetem Stator ist in Abbildung 3.1 wiedergegeben. Der Stator der PSM ist geblecht ausgeführt und weist meist Nuten auf. Um Reluktanzmomente zu verhindern wird dieser meist geschrägt ausgeführt. Die Permanentmagnete sind entlang des Rotorumfangs aufgeklebt. Die relative Permeabilität μ_r der Dauermagnete ist in etwa gleich der von Luft, wodurch diese für ein vom Statorstrom hervor gerufenes Feld wie ein zusätzlicher Luftspalt wirken. Die Statorreaktanzen von permanenterregten Synchronmaschinen sind daher besonders gering (vgl. [6]).

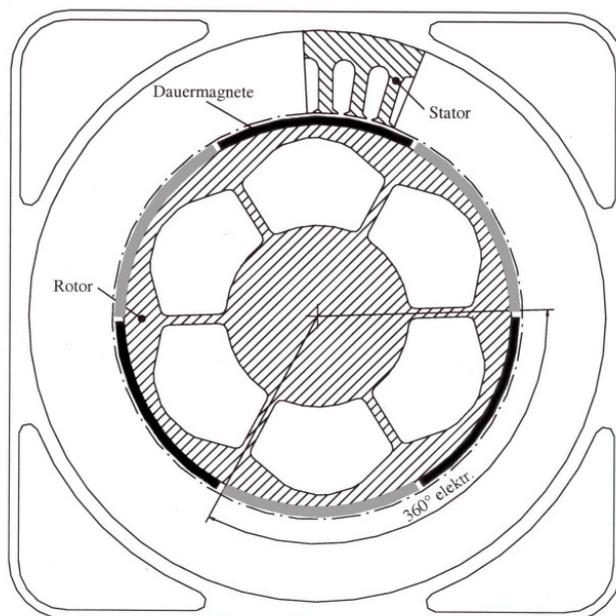


Abbildung 3.1: Querschnitt durch eine permanentmagneterregte Synchronmaschine [6]

3.2 Technische Daten und Normierung der Maschine

Die Maschine lässt sich anschaulich und konkret beschreiben, wenn ihre physikalischen Größen auf eine Referenzgröße gleicher Dimension, auf sogenannten normierten Größen, bezogen werden. Von der vorliegenden PSM sind folgende Daten bekannt:

Nennspannung	$U_N = 52,7 \frac{V}{1000U_{min}^{-1}} \triangleq 527V$
Nennstrom	$I_N = 405A$
Nenndrehzahl	$n_N = 10000min^{-1}$
Polzahl	$p = 2$
Leistung	$P_N = 200kW$
Frequenz	$f_N = 333Hz$

Mit diesen bekannten Maschinendaten kann nun folgende Normierung vorgenommen werden:

Der Bezugsstrom:

$$I_{bez} = \sqrt{2} \cdot I_{Nenn,Strang} = \sqrt{2} \cdot 405A = 573A^1 \quad (3.1)$$

Die Maschine hat eine Nenndrehzahl von 10000 min^{-1} . Die Normierung der Bezugswinkelgeschwindigkeit wird jedoch auf eine Drehzahl von 5000 min^{-1} vorgenommen, da eine Drehzahl oberhalb der Genannten im Bezug auf die vorliegende Arbeit weder erforderlich, noch notwendig ist.

¹Die Angaben von Strangspannung und Strangströmen sind als Effektivwerte anzusehen

$$\Omega_{bez} = 2 \cdot \pi \cdot f_N = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{n_N}{60} = 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \frac{5000}{60} = 1047.19 \frac{rad}{s} \quad (3.2)$$

Der Bezugswert für die Flussverkettung ergibt sich aus der Festlegung von Bezugsspannung und Bezugswinkelgeschwindigkeit so, dass $|\Psi_M| = 1$ ist

$$\psi_{bez} = \frac{U_{bez}}{\Omega_{bez}} \quad (3.3)$$

Die Bezugsimpedanz folgt aus

$$Z_{bez} = \frac{U_{bez}}{I_{bez}} \quad (3.4)$$

Bezugsmoment

$$M_{bez} = \frac{3 \cdot U_{Nenn,Strang} \cdot I_{Nenn,Strang} \cdot p}{\Omega_{bez}} \quad (3.5)$$

3.3 Mathematische Beschreibung der PSM

Um das Verhalten der Maschine zu verstehen wird im Folgenden nun auf die mathematische Beschreibung mit Hilfe des auf Kovács und Rác [2] zurückgehenden Raumzeigerkalküls eingegangen. Die Raumzeigerrechnung bildet räumlich sinusverteilte Größen in der komplexen Ebene ab. Der Zeiger beschreibt dadurch in seiner Richtung die maximalen Amplitude der sinusförmigen Verteilung (Abb.3.2). Voraussetzung dafür ist ein lineares Verhalten des Systems.

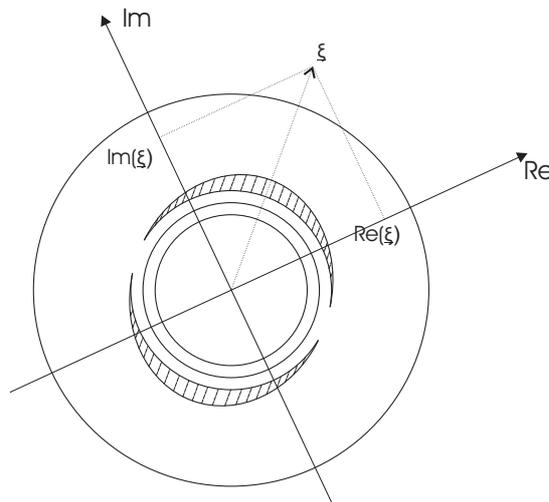


Abbildung 3.2: Definition eines Raumzeiger-Koordinatensystems [6]

Die permanenterrechte Synchronmaschine kann durch folgende Gleichungen mathematisch beschrieben werden. Für weiterführende Überlegungen wird auf die Literaturangabe [6] verwiesen.

Ausgehend davon, dass der Rotor keine Wicklung besitzt, gibt es auch keine Rotorspannungs- sowie keine Rotorflussverkettungsgleichungen.

Statorspannungsgleichung

Die Statorspannungsgleichung für ein mit der Winkelgeschwindigkeit ω_k rotierendes Koordinatensystem lautet.

$$\underline{u}_s = \underline{i}_s \cdot r_s + \frac{d\underline{\psi}}{d\tau} + j \cdot \omega_k \cdot \underline{\psi}_s \quad (3.6)$$

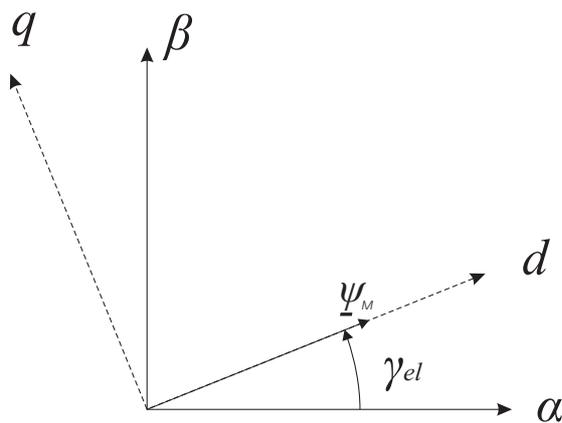
Statorflussverkettungsgleichung

In die Statorflussverkettungsgleichung geht sowohl der in der Statorinduktivität vom Strom hervorgerufene magnetische Fluss mit ein, als auch die Permanentmagneterregung im Rotor.

$$\underline{\psi}_s = l_s \cdot \underline{i}_s + \underline{\psi}_M \quad (3.7)$$

Es sei hier angeführt, dass in der Raumzeigerrechnung sowohl ein rotorfestes, als auch ein statorfestes Koordinatensystem definiert sind. Der Zusammenhang der beiden Koordinatensysteme wird in der Abbildung 3.3 aufgezeigt, wobei hier die Lage des Flussverkettungsraumzeigers mit der reellen Achse des rotorfesten (d,q)-Koordinatensystems zusammenfällt. Die Umrechnung vom einem Koordinatensystem ins andere erfolgt über den elektrischen Lagewinkel γ_{el} .

$$\underline{\psi}_M = \psi_M \cdot e^{j\gamma_{el}} \quad (3.8)$$



α, β statorfestes Koordinatensystem
 d, q rotorfestes Koordinatensystem

Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen dem rotorfesten und statorfesten Koordinatensystem

Momentengleichung

Das innere Moment wird durch die Raumzeiger der Statorflussverkettung und des Statorstroms in allgemeiner Form durch den Zusammenhang

$$m_i = -Im(\underline{i}_s^* \cdot \underline{\psi}_s) = i_{sq} \cdot |\underline{\psi}_M| \quad (3.9)$$

gebildet. Aus der Gleichung 3.9 ist ersichtlich, dass die vom Statorstrom und Rotorflussraumzeiger aufgespannte Fläche momentenbildend wirkt, woraus eine Drehmomentenänderung des Rotors resultiert. Es ist also lediglich die rotorflussnormale Komponente des Statorstroms i_{sq} zur Bildung des Drehmomentes notwendig. Die q-Komponente des Statorstroms liefert keinen Beitrag zur Drehmomentbildung.

Mechanische Gleichung

Die Bewegungsgleichung sei hier nur allgemein angeführt.

$$\tau_m \cdot \frac{d\omega_m}{d\tau} = m_i - m_L = -Im(\underline{i}_s^* \cdot \underline{\psi}_s) - m_L \quad (3.10)$$

4 Softwarekomponenten

4.1 Die Programmiersprache HANSL

Der digitale Signalprozessor TMS320F2407 kann mit der am Institut für elektrische Maschinen und Antriebe entwickelten Hochsprache HANSL komfortabel und einfach programmiert werden. Die von der Hochsprache unterstützten Befehle sind in der Befehlsreferenz [5] genauestens dokumentiert.

4.2 Echtzeitkommunikation

Die Echtzeitkommunikation ermöglicht das Verändern von Variablen während des Betriebs vom PC aus. Zu diesem Zweck können die zu verändernden Variablen in einer dafür vorgesehenen Benutzeroberfläche ausgewählt und verändert werden. Ihr aktueller Wert wird sowohl im Dezimal- als auch im Hexadezimalformat dargestellt und kann auch dementsprechend geändert werden. Die physikalische Verbindung besteht dabei über die serielle Schnittstelle der Signalprozessorplatine.

4.3 Kommunikation fürs RAM

Die unterschiedlichen Messreihen und Ausführungen der Messungen werden mittels der Statistik ausgewertet und beurteilt. Dabei kommt hauptsächlich das Programm MATLAB zum Einsatz. Damit die Messdaten später bequem ausgewertet werden können, ist es notwendig die Daten in das auf der Signalprozessorplatine befindende RAM zu schreiben und anschließend auf den PC zu übertragen. Auf dem PC steht daraufhin eine txt-Datei in Form von 32768 Werten im Bereich [0,65535] zur Verfügung. Für die Umrechnung auf das HANSL-Zahlenformat, bietet sich folgende Vorschrift an:

$$\begin{aligned} \text{Wert[HANSL]} &= \frac{1}{4096} \cdot \text{Wert[DEC]} && \text{für} && 0 < \text{Wert[DEC]} < 32767 \\ \text{Wert[HANSL]} &= \frac{1}{4096} \cdot \text{Wert[DEC]} - 16 && \text{für} && 32768 < \text{Wert[DEC]} < 65535 \end{aligned}$$

Nach dieser Umrechnung stehen die Daten für eine Weiterverarbeitung in MATLAB zur Verfügung.

5 Die TU-Elektronik

Der mechanische Aufbau und die Zusammensetzung der TU-Elektronik gliedern sich in drei Hauptkomponenten: der Signalprozessorplatine, einem Adapterboard und der im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelten Messplatine.

5.1 Die Signalprozessorplatine

Das Standalone - Modul mit dem TMS320F2407 digitalen Signalprozessor von Texas Instruments bildet das Herzstück der Elektronik. Dieser digitale Signalprozessor (kurz DSP genannt) verfügt über eine 16 Bit Festkommaarithmetik. In Verbindung mit der TU-Elektronik wird mit dem DSP ein PWM-Muster erzeugt, das gekoppelt mit einer hardwaremäßig ausgeführten Totzeitgenerierung, die Halbleiterschalter im Umrichter ansteuert. Weiters ist dem DSP ein 10 Bit breiter Analog-Digital-Converter integriert. Zwischen dem DSP-Print und der eigentlichen Messplatine, ist noch ein sogenanntes I/O-Modul vorhanden. Dieses Modul sorgt für die richtige Pegelanpassung zwischen DSP-Board und Messprint, enthält digitale und analoge Ein- und Ausgänge, sowie notwendige Treiberbausteine und Schutzschaltungen. Es verfügt über einen Digital-Analog-Converter, mit dem vier interne Signale vom DSP analog ausgegeben werden können. Ebenso ist eine Schnittstelle zum DSP für ein Absolutgebersystem auf der Platine ausgeführt, auf das später noch genauer eingegangen wird.

Die Eingangssignale des ADC, der dem DSP integriert ist, werden auf einem Spannungsbereich von 0V bis 5V abgebildet. Die für die Programmierung des Systems entwickelte Hochsprache HANSL rechnet die prozessorinterne Darstellung des Eingangsspannungsbereiches wie folgt um:

Eingangsspannungswert	HANSL-Einheit
0V	-8HE
2,5V	0HE
5V	7.9998 (=8-1LSB)HE

Die Winkeldarstellung im digitalen Signalprozessor erfolgt ähnlich dem obigen Zusammenhang nach folgender Konvention:

Winkel	HANSL-Einheit
-180°	-8HE
0°	0HE
22.5°	1HE
180°	7.9998 (=8-1LSB)HE

5.2 Die Mess- und Ansteuerelektronik

Die Platine ist in ihrem Aufbau in mehrere Bereiche geteilt, die in der Abbildung 5.1 anschaulich dargestellt sind. Folgende Teilschaltungen sind auf dem Print ausgeführt:

- die Strommessung nach TU-Standard, wobei dafür die im Umrichter eingebauten Stromsensoren Verwendung finden
- die Stromerfassung nach Vorlage der PDRIVE Schaltung mit Butterworthfilter
- Hardware-Überstrom-Abschaltung für jeden einzelnen Strang
- Totzeitbaustein, der in Verbindung mit einem Schwingquarz eine Totzeit von $2.5\mu_s$ generiert
- eine optische Einheit, die im Zusammenhang mit dem Totzeitbaustein die Halbleiterventile im Umrichter schaltet
- eine optische Pulsmusterfreigabe zur Steuerung des Umrichters
- eine Zwischenkreisspannungsmessung
- die Spannungsmessung der einzelnen Phasen
- Referenzspannungsquellen und notwendige Versorgungsspannungen für die Stromsensoren und den Absolutlagegeber

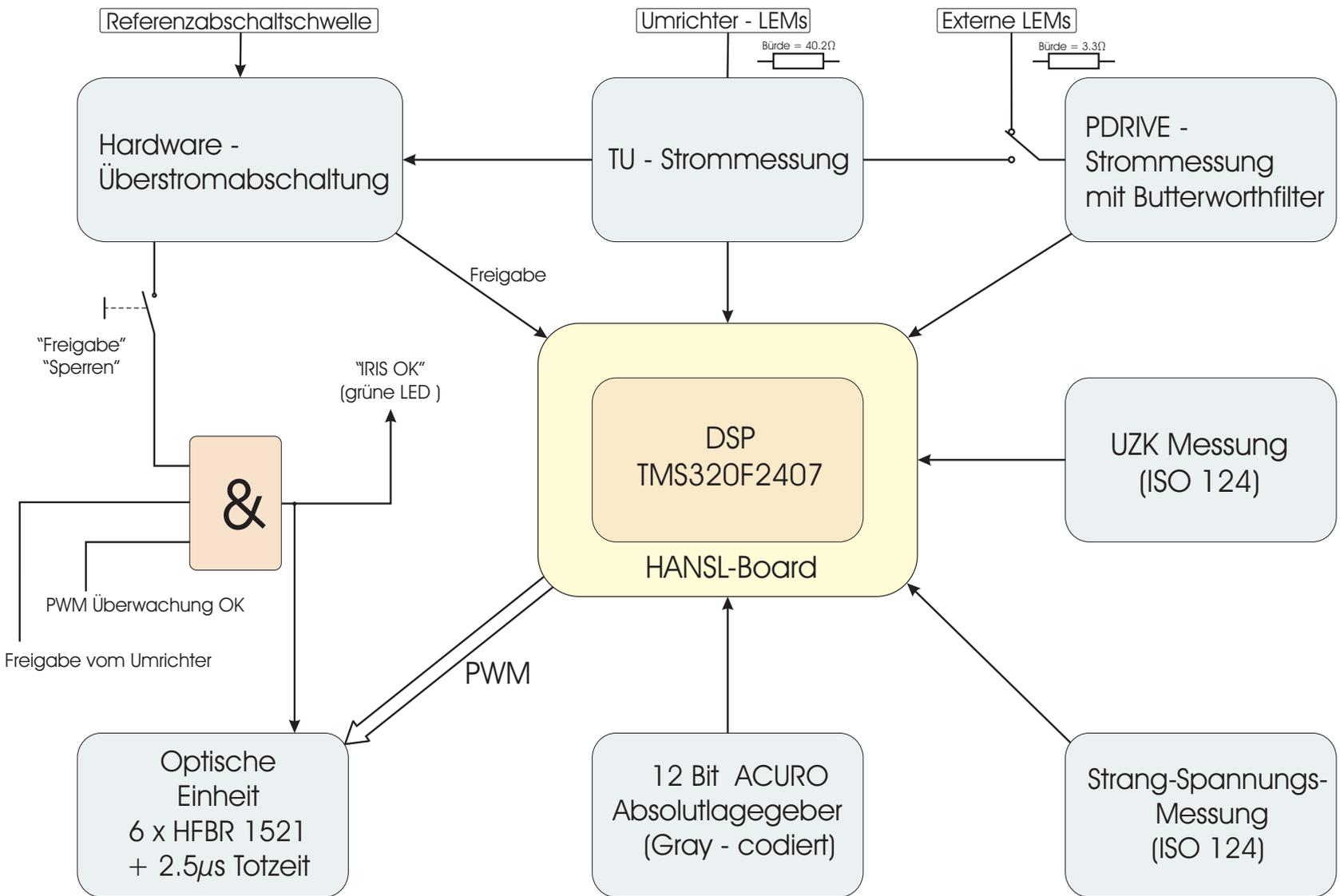


Abbildung 5.1: Blockschaltbild des Mess- und Ansteuerboards mit den beiden Strommesssystemen

Im Folgenden werden nun die genannten Teilsysteme der Messplatine, sowie deren Aufbau und Funktionen, genauer beschrieben.

Beide Strommessungen, sowohl die TU-Strommessung, als auch die PDRIVE-Messung, basieren auf dem selben Prinzip. Die Messung der Ströme erfolgt in den Strängen der Maschine. Die Strommessung nach TU-Standard verwendet die im Umrichter vorhandenen Stromsensoren, während für die PDRIVE-Strommessung eigene Sensoren in den Zuleitungen der Maschine vorgesehen und verwendet werden. Da für jeden einzelnen Strang ein eigener Sensor zur Verfügung steht, werden zur Stromraumzeigerbildung alle drei Strangströme einzeln erfasst. Ein eventueller Offset des jeweiligen Stromsensors wird einmal bei Programmstart ausgewertet und im anschließenden Betrieb kompensiert.

```
----- Ist-Strangstroeme einlesen -----  
  
inorm=konst(-0.2033159)      ;HANSL - Normierungsfaktor  
i1=in(a1)                   ;Strom von Strang u einlesen  
i1=sum(i1,i1offs)          ;Offset dazu addieren  
i1=mult(i1,inorm)          ;Normierung der Stroeme  
i2=in(a2)  
i2=sum(i2,i2offs)  
i2=mult(i2,inorm)  
i3=in(a3)  
i3=sum(i3,i3offs)  
i3=mult(i3,inorm)
```

5.2.1 LEM - Wandler

Die in folgenden Kapiteln beschriebenen zwei Varianten der Strommessung erfassen ihre Messgröße mit so genannten LEM-Sensoren. Das Prinzip der LEM - Stromwandler beruht auf der Messung der Induktion mittels Hallelemente. Der zu messende Strom ruft im Eisen des LEM - Wandlers einen magnetischen Fluss hervor, der durch einen Strom in der Sekundärwicklung kompensiert werden muss. Da alle Abmessungen, insbesondere die Luftspatlänge, genau bekannt sind, ist die Lage des Leiters innerhalb des Kernes beliebig. Das Magnetfeld wird im Luftspalt des Kernes gemessen. Um eine hohe Empfindlichkeit für die Messgröße und Unempfindlichkeit gegenüber Störfeldern zu erreichen, ist ein kleiner Luftspalt wünschenswert. Hierbei können durch die Art der Induktionsmessung sowohl Gleich- als auch Wechselströme gemessen werden.

5.2.2 Die Strommessung nach TU-Standard mit Überstromabschaltung

Die TU-Strommessung verwendet die im IRIS U33C Umrichter implementierten Stromwandler (LEMfs), welche im Verhältnis 1:5000 bei einer Versorgungsspannung von $\pm 15V$ arbeiten und einen Nominalstrom von $I_{nominal}=2000A$ aufweisen. Der am Ausgang des LEM-Sensors gemessene Strom muss auf den Eingang des 10 Bit breiten ADC des DSP abgebildet werden. Die Bürdewiderstände dieser Strommessung sind deshalb auf einem Wert von $3 \cdot 40.2\Omega$ dimensioniert worden. Der dem Differentialvertärker (INA105U) nachgeschalteten Summierverstärker verschiebt das an seinem Eingang anliegende Spannungssignal von $\pm 2.5V$ auf einen Ausgangsspannungsbereich von 0-5V. Es entsprechen für die weitere Signalverarbeitung -2.5V am Eingang einem Wert von 5V am Ausgang und umgekehrt entspricht der Spannungswert 2.5V am Eingang einem Ausgangswert von 0V.

Die TU-Strommessung ist zusätzlich mit einer Überstromabschaltung gekoppelt. Der Strom jeder Phase wird überwacht, wodurch in jeder Phase ein Überstrom detektiert werden kann, der den regulären Betrieb unterbricht. Die Überstromabschaltung ist mit dem Komparator LM2903 realisiert. Der Referenzspannungswert, mit dem der aktuell gemessene Stromwert des einzelnen Stranges verglichen wird, kann mit einem Potentiometer zwischen 0 und $\pm 2.5V$ verändert werden, wodurch eine einstellbare Stromgrenze in positiver, als auch negativer Stromrichtung gegeben ist. In Verbindung mit den zuvor ausgelegten Bürdewiderständen kann damit bei einer maximalen Vergleichsspannung von $\pm 2.5V$ und einem Übersetzungsverhältnis 1:5000 vom LEM, ein maximaler Strom von

$$3 \cdot \frac{1}{40.2\Omega} \cdot 2.5V \cdot 5000 = 932.8A \quad (5.1)$$

gemessen werden.

Im Verbindung mit der Überstromabschaltung der TU-Strommessung ist eine Sicherheitsschaltung eng gekoppelt, die im Falle einer Störung bzw. eines Überstromes, den Totzeitbaustein zurücksetzt und den Leistungsteil im Umrichter sperrt, wodurch jegliches Pulsen der PWM unterbunden wird.

5.2.3 Ansteuerschaltung für die Halbleiterventile und Totzeitgenerierung

Um den Vorgang der Leistungsteilabschaltung besser verstehen zu können, ist es zunächst notwendig die Anbindung der Messplatine an den Umrichter näher zu erläutern. Die Kommunikation zwischen der TU-Elektronik und den Interface-Baugruppen des Umrichters erfolgt über die optische Einheit. Die Ventile des

maschinenseitigen Stromrichters erhalten ihre Schaltzustände von der PWM mittels Lichtwellenleiter mitgeteilt. Dabei ist die optische Ansteuerung auf der Messplatine (Abbildung 5.2) so ausgeführt, dass der Schalter der oberen Brückenhälfte und der komplementäre Schalter der unteren Brückenhälfte niemals den selben Schaltzustand aufweisen können. Aus diesem Grund kann sich im Umrichter der Schaltzustand "PWMOFF" (Abbildung 5.3) nie einstellen. Allerdings lassen sich im dreiphasigen Wechselrichter die sechs möglichen, jeweils um 60° versetzten Spannungsraumzeiger einprägen, sowie ein Kurzschlussraumzeiger "PWMKURZ" realisieren. Der vorgegebene beliebige Raumzeiger muss dann durch benachbarte Umrichter-Raumzeiger gebildet werden. Zu beachten ist, dass bei einem Raumzeiger mit einem Winkel von $30^\circ + k \cdot 60^\circ$ der maximal mögliche Betrag um den Faktor $\frac{\sqrt{3}}{2}$ kleiner ist, als der Raumzeiger in den Winkeln $k \cdot 60^\circ$ [6].

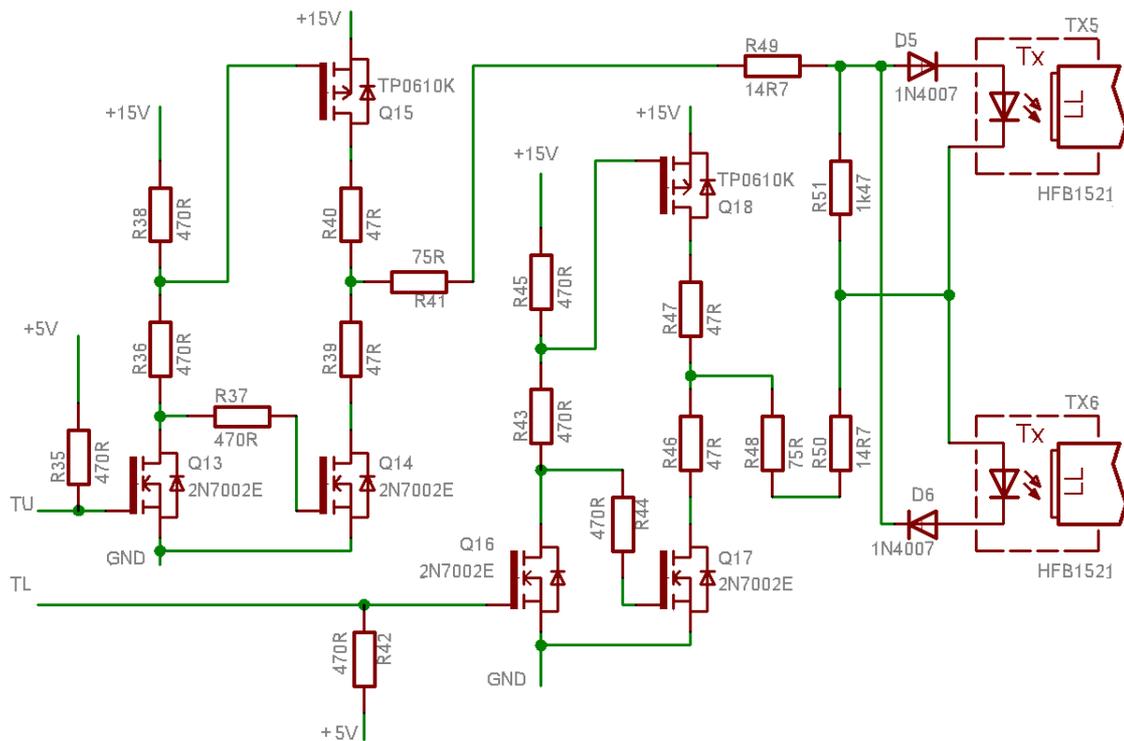


Abbildung 5.2: Die Ansteuerungsschaltung für zwei Ventile einer Halbbrücke mit den LWL-Baustein HFB1521

Die Ansteuersignale für jeden der sechs Halbleiterschalter im maschinenseitigen Umrichter werden im Zusammenhang mit dem Totzeitbaustein IXDP631 generiert. Dieser Baustein erzeugt mit einem Schwingquarz, der eine Grundfrequenz von $f_{clk}=3,276\text{Mhz}$ hat, einen externen Clock, durch den die Totzeit genau bestimmbar ist. Die Totzeit setzt sich abhängig vom Baustein aus acht Taktperioden zusammen, wodurch sich aus der Rechnung

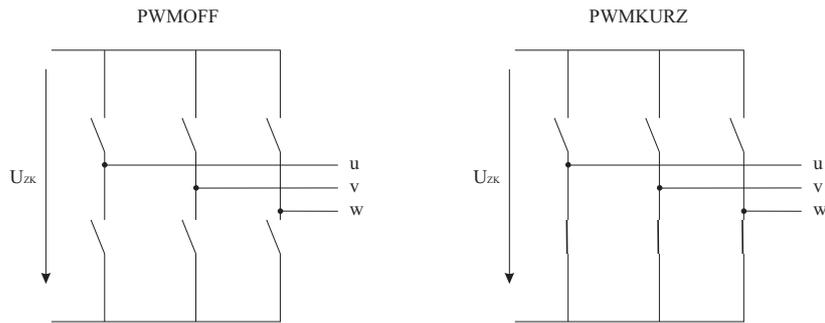


Abbildung 5.3: Vergleich der Zustände PWMOFF und PWMKURZ einer B6 Brücke. Der Zustand PWMOFF ist mit der Schaltung aus Abb. 5.2 nicht realisierbar

$$T_t = \frac{8}{f_{clk}} = \frac{8}{3,276 \cdot 10^6} = 2,442 \cdot 10^{-6}s \quad (5.2)$$

eine Totzeit $T_t=2,442\mu s$ ergibt. Der Halbleiter steuert mit dieser Zeit die vom Baustein aus dem Spannungsraumzeiger der PWM erzeugten Logiksignale, die dafür notwendig sind, um den oberen und unteren Schalter einer Halbbrücke separat anzusprechen. Die Totzeit verhindert, dass die beiden Halbleiterschalter im Betrieb einen Kurzschluss über den Zwischenkreis bilden, indem beide Schalter gleichzeitig leitend sind.

Die drei Platinen sind in Sandwichbauweise miteinander verbunden. Die gesamte Elektronik ist einem Metallgehäuse untergebracht, das am Umrichter befestigt ist. Die Ausführung des Gehäuses ist im Anhang A angeführt.

5.2.4 Anbindung der TU-Elektronik an den Umrichter IRIS U33C

Geht man davon aus, dass das System zum ersten Mal hoch gefahren werden soll, muss zunächst der Trennschalter geschlossen, und nachfolgend sind der Hauptschalter des Umrichterschrankes und der Netzschalter am Elektronik-Gehäuse zu betätigen. Die rote LED am Gehäuse (Abbildung A.1im Anhang) leuchtet und symbolisiert, dass das interne RS-FLipFlop zurückgesetzt ist und dem Umrichter keine Freigabe erteilt ist. Dieser Zustand sollte immer dann vorherrschen, wenn der Umrichter nicht in Betrieb ist, oder ein neues Programm in den DSP geladen wird. Zusätzlich zu den sechs Lichtwellenleitern die der Steuerung des maschinenseitigen Wechselrichters dienen, verfügt die TU-Elektronik über drei weitere Lichtsignale, die den störungsfreien Betrieb des Systems garantieren und im Fehlerfall eine sofortige Abschaltung des Umrichters veranlassen (Abbildung 5.4). Die TU-Elektronik kann nun durch das Betätigen des “Freigabe“-Schalters am Gehäuse der TU-Elektronik in den Betriebsmodus gebracht werden, wodurch das RS-FlipFlop gesetzt wird und die rote LED erlischt. Da der

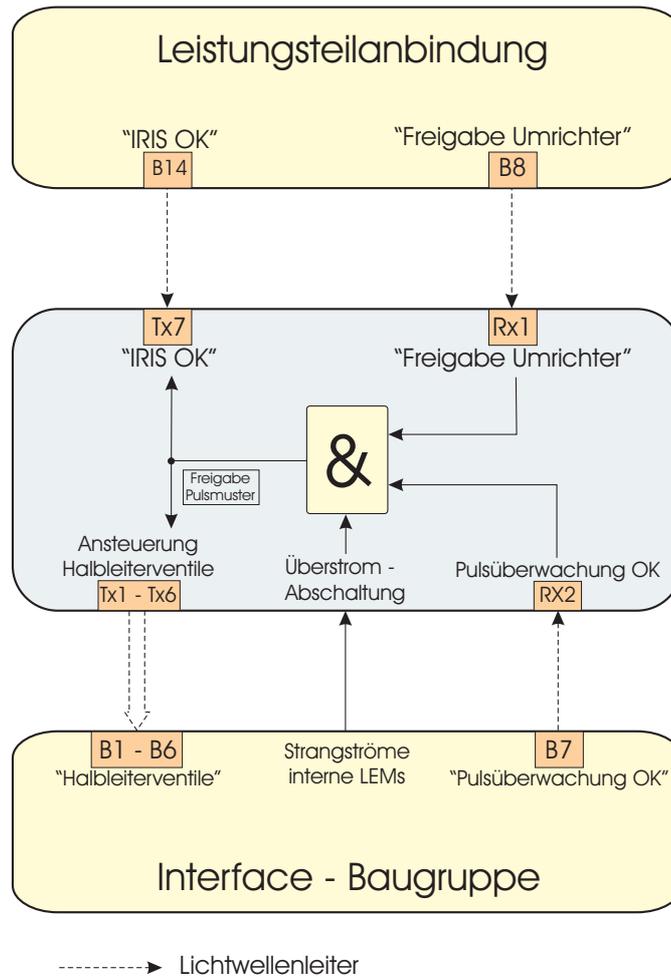


Abbildung 5.4: Anbindung der TU-Elektronik an die IRIS U33C. Die Abbildung gibt auch die Anschlussbelegung zu der einzelnen Baugruppen wieder.

Pulsumrichter noch nicht eingeschaltet wurde, sich die Messelektronik allerdings schon in Bereitschaft bzw. im Wartezustand befindet, leuchtet weder die rote noch die grüne LED. Die Anlage kann jetzt durch Drücken des grünen Tasters auf der Fernbedienung (Abbildung A.2 im Anhang) freigegeben werden. Liegt dem Umrichter keine bekannte Störung vor und ist dieser betriebsbereit, dann wird der TU-Elektronik über zwei der drei Lichtwellenleiter ein "Freigabe"-Signal und ein "Pulsüberwachung OK"-Signal zurückgeben. Die grüne LED am Gehäuse beginnt zu leuchten und teilt den gültigen Betriebszustand mit. Gleichzeitig wird dem Umrichter über die dritte Glasfaser mit dem Signal "IRIS OK" der ordnungsgemäße Betrieb signalisiert. Daraufhin lädt sich der Zwischenkreis auf und der maschinenseitige Wechselrichter beginnt mit der PWM-Frequenz zu arbeiten. Im Falle eines Überstromes, wird das RS-Flip-Flop als auch der Totzeitbaustein zurückgesetzt, das Signal "IRIS OK" unterbricht gleichzeitig, die Freigabesignale werden unterbunden, der Umrichter schaltet sofort ab und die rote LED leuchtet wieder. Ebenso kann das System über den roten Taster auf der Fernbedienung ordnungsgemäß abgeschaltet werden, wobei die TU-Elektronik nachträglich gesperrt

werden sollte, da diese sonst in Bereitschaft und betriebsbereit bleibt. Es empfiehlt sich daher den Umrichter über den “Freigabe-Schalter“ am Elektronik-Gehäuse zu sperren und dadurch einen Überstrom zu simulieren. Das Signal “IRIS OK“, wird zusätzlich über den 25poligen SUB-D Stecker des Absolutlagegebers mit in den DSP eingeschliffen und steht dort im 16Bit breiten Register des DSP an letzter Stelle als LSB zur Verfügung. Damit ist es aus Sicherheitsgründen auch programmtechnisch möglich einen Fehlerstrom zu detektieren und entsprechend damit zu verfahren.

5.2.5 Die PDRIVE - Strommessung mit Butterworthfilter

Die PDRIVE Strommessung verwendet eigene Stromwandler vom Typ LEM LF505, die in den Motorphasen selbst, untergebracht sind und daher ihre örtlich Lage nach belieben geändert werden kann. Diese Sensoren haben ein Übersetzungsverhältnis von 1:4000 bei einer Versorgungsspannung von $\pm 24V$. Sie haben einen Nominalstrom von $I_{nominal}=2000A$ und weisen einen Messbereich von $\pm 1700A$ auf. Bei der PDRIVE-Strommessung muss nicht der am Ausgang des LEM-Sensors gemessene Strom auf den Eingang des 10 Bit breiten ADC des DSP abgebildet werden, sondern der Ausgang des Butterworthfilters, das der Strommessung nachgeschaltet ist. Die Bürdewiderstände sind in diesem Fall auf einen Wert von 3.3Ω dimensioniert, sodass beim Abschaltpegel die Spannung von 1V gemessen wird. Die Abbildung 5.5 zeigt den Prinzipiellen Aufbau dieser Strommessvariante. Wahlweise besteht die Möglichkeit die PDRIVE-Messung

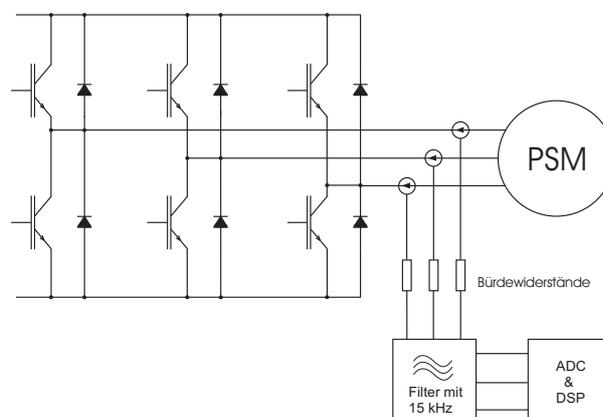


Abbildung 5.5: Prinzipieller Aufbau der PDRIVE Strommessung mit Butterworthfilter

mit den Stromsensoren der TU-Strommessung zu betreiben, sprich mit den internen Umrichter-LEMs. Dafür sind eigene Jumper (JP1, JP2, JP3) für jede Phase auf der Platine vorgesehen. Damit die PDrive-Strommessung auch an den Stromsensoren der TU-Messung betrieben werden kann, ist es notwendig den Pegel von $\pm 2.5V$ am Ausgang der TU-Messung durch einen Spannungsteiler mit nachgeschalteten Puffer bzw. Spannungsfolger auf das notwendige Potential von 1V für die PDRIVE-Messung herabzusetzen. Hierzu muss also am Eingang des Butterworthfilters eine Pegelanpassung

vorgenommen werden, am Ausgang ist dem Filter ähnlich der TU-Strommessung eine Pegelverschiebung für den DAC bereits implementiert.

Die Filtercharakteristik eines Butterworthfilters zeichnet sich dadurch aus, dass der Frequenzgang unterhalb der Grenzfrequenz f_g möglichst lang horizontal verläuft, weshalb das Butterworthfilter auch als Filter mit maximal flachem Durchlassbereich bezeichnet wird. Der Amplitudengang verläuft flach bis zur Grenzfrequenz und fällt dann maximal steil ab. Dieses Filter weist weder im Durchlassbereich, noch im Sperrbereich eine Welligkeit auf. Gerade deshalb ist es das Standardfilter, wenn keine Welligkeit erwünscht ist. Im Zeitbereich zeigt das Butterworthfilter leichtes Überschwingen, das mit steigender Ordnung zunimmt [11].

Das für die PDRIVE-Messung herangezogene Butterworthfilter ist so dimensioniert, dass seine Grenzfrequenz f_g bei 15kHz liegt. Mit denen im Schaltplan angegebenen Bauteilwerten liegt die -3dB - Frequenz bei 14,49kHz (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7). Das Ziel für die Verwendung dieses Filtertyps ist es Störungen der Stromerfassung sowie den Einfluss des Stromrippels zu unterdrücken und Quantisierungseffekte zu vermindern [9].

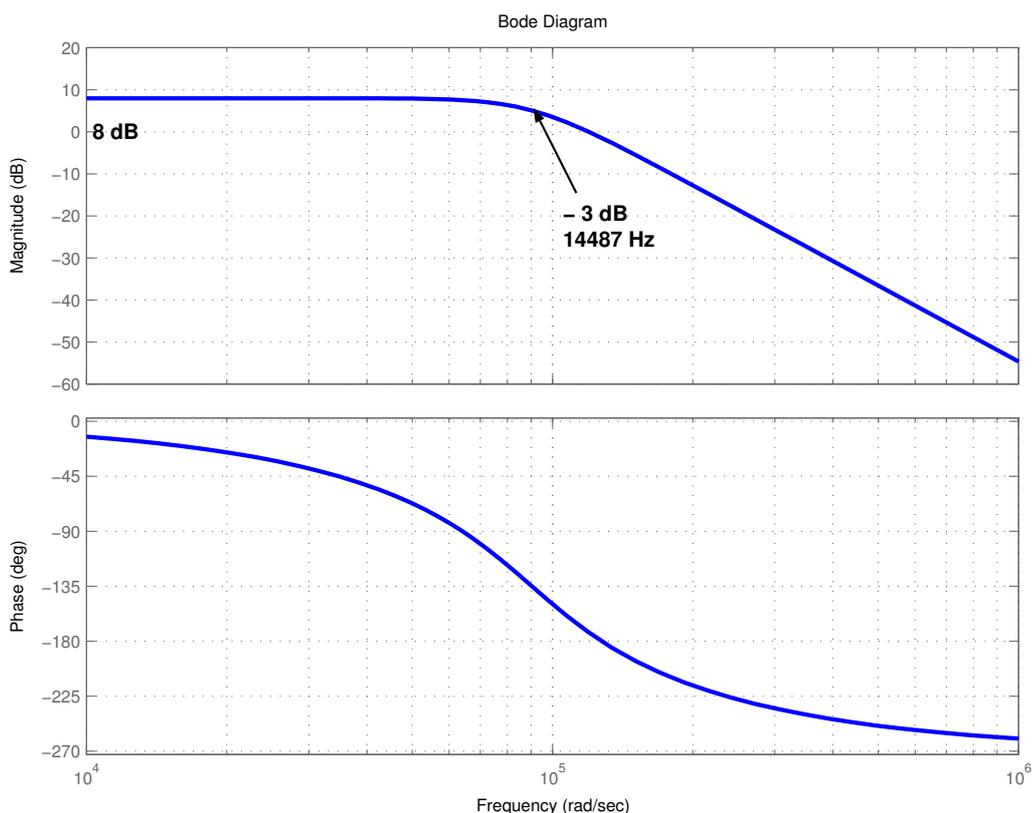


Abbildung 5.6: Bodediagramm des Butterworthfilter mit Frequenz- und Phasengang

Die Übertragungsfunktion des Butterworthfilters lautet:

$$H(s) = \frac{V}{a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (5.3)$$

mit den Koeffizienten

$$\begin{aligned} a_3 &= 1.350228 \cdot 10^{-15} \\ a_2 &= 2.435628 \cdot 10^{-10} \\ a_1 &= 2.195403 \cdot 10^{-5} \\ a_0 &= 1 \end{aligned}$$

folgt daraus

$$H(s) = \frac{2.5}{1.350228 \cdot 10^{-15} \cdot s^3 + 2.435628 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 + 2.195403 \cdot 10^{-5} \cdot s + 1} \quad (5.4)$$

mit der Lage der Polstellen in der linken Halbebene

$$\begin{aligned} s_1 &= -91.146 \cdot 10^{-3} \\ s_{2,3} &= -44.620 \cdot 10^{-3} \pm j 78.324 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

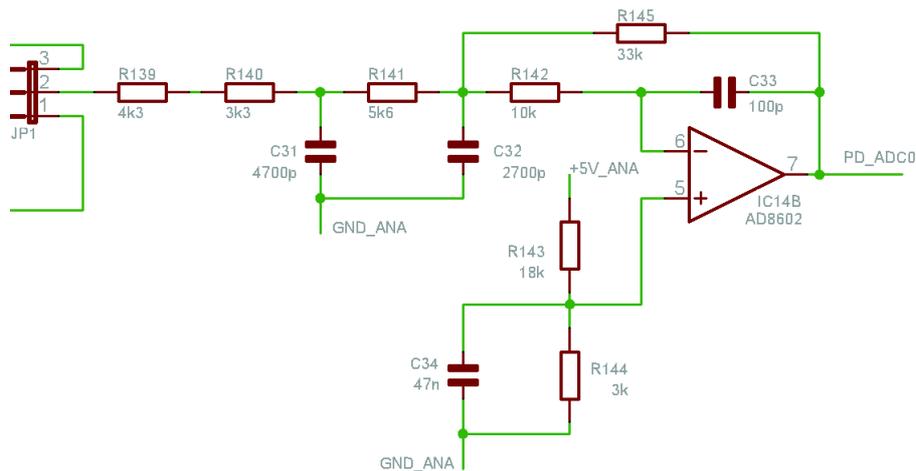


Abbildung 5.7: Butterworthfilter 3.Ordnung, Schaltung mit Bauteilwerten

Später sollen in verschiedenen Messreihen die TU-Strommessung und die PDRIVE-Messung mit Butterworthfilter hinsichtlich ihrer Messergebnisse gegenübergestellt und verglichen, sowie der Einsatz in der sensorlose Rotorlageerfassung mittels der INFORM-Methode untersucht werden.

5.2.6 Messung von Strang- und Zwischenkreisspannung

Die Messplatine verfügt für weiterführende Zwecke (beispielsweise zur Realisierung von Modellen, die auf dem EMK-Prinzip basierenden) über eine Spannungsmessung. Mit dieser Spannungserfassung kann sowohl die Zwischenkreisspannung, als auch die einzelnen Strangspannungen der Maschine ermittelt werden. Bei der Realisierung der Spannungsmessung (Abbildung 5.8) auf der Messplatine wird generell auf einen invertierenden Verstärker mit dem Baustein OPA 4132 zurückgegriffen. Mit diesem Aufbau kann eine maximale Spannung von $\pm 1010V$ erfasst werden. Genau diese Spannung wird mittels der invertierenden Verstärkerschaltung, und den Bauteilwerten

$$R_1 = 4.040 \cdot 10^6 \Omega = 4.04 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 40k\Omega$$

auf die Ausgangsspannung

$$\frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5.5)$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e = -\frac{40 \cdot 10^3}{4.04 \cdot 10^6} \cdot (\pm 1010V) = \mp 10V \quad (5.6)$$

abgebildet.

Diese Spannung von $\mp 10V$, die nun am Ausgang anliegt, werden dem Isolationsverstärker ISO124 zugeführt, der die Eingangsseite galvanisch vom Ausgang trennt. Um die galvanische Trennung zwischen Ein- und Ausgang auch zu garantieren, muss dieser Baustein mit einer eigenen Spannung versorgt werden. Für die Spannungsversorgung des ISO124 ist auf dem Print der Baustein DCP0115P von Texas Instruments untergebracht. Da die Strangspannungsmessung und die Zwischenkreisspannungsmessung getrennt ausgeführt sind, muss für beide Messschaltungen jeweils eine eigene Spannungsversorgung mit jeweils einen DCP0115P Baustein zur Verfügung gestellt werden. Der Ausgang des Isolationsverstärkers stellt wiederum das am Eingang anliegende Spannungssignal von $\mp 10V$ zur Verfügung. Allerdings ist es für die spätere Verarbeitung des Signals mit der Hochsprache HANSL erforderlich das Signal auf einen Spannungsbereich von 0V bis 3V darzustellen. Diese Verschiebung erfolgt durch eine nachgeschaltete Spannungsanhebung und einer gleichzeitigen Bereichsverkleinerung infolge eines Subtrahierverstärkers. Zur Signalverschiebung wird die auf der Platine ohnehin schon vorhandene Referenzspannung von 2.5V herangezogen, die mit einem Spannungsteiler auf einen Wert von

$$U_v = 2.5V \cdot \frac{36k\Omega}{36k\Omega + 33k\Omega} = 1.3043V \quad (5.7)$$

herunter geteilt wird. Mit dem Teilverhältnis $-\frac{15k\Omega}{100k\Omega}$ wird erreicht, dass die Messspannung von $\pm 1010V$ auf einen Ausgangsspannungsbereich von $0-3V$ abgebildet werden. Durch die zweimalige Invertierung des Signals zwischen Eingang und Ausgang ist wiederum sichergestellt, dass ein positiver Eingangswert auch am ADC positiv erfasst wird, und negative Messspannungen vom ADC negativ erfasst werden. Die Strangspannungsmessung besitzt einen virtuellen Sternpunkt, der zunächst kein Bezugspotential besitzt. Spätere Messungen mit dieser Variante haben gezeigt, dass dadurch sehr viel Rauschen und Störungen in die Messung mit eingehen und dadurch die Ergebnisse verfälscht werden. Aus diesem Grund wird nachträglich das Potential dieses Sternpunktes auf Zwischenkreisminusspannung festgelegt.

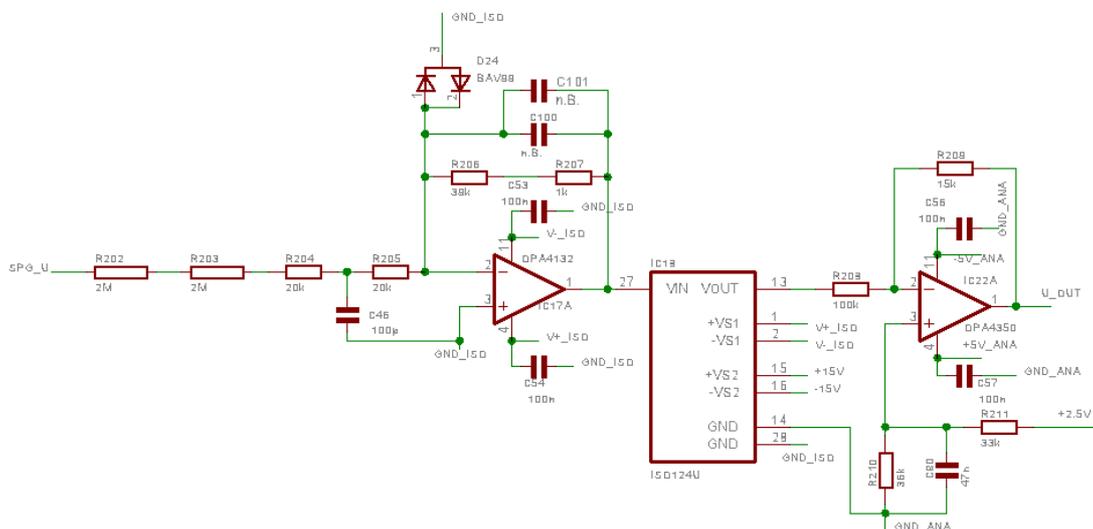


Abbildung 5.8: Die Schaltung der Spannungsmessung für eine einzelne Phase

5.3 Der Absolutlagegeber

Für die Positionserfassung des Rotors wird ein 12 Bit, gray-codierter Absolutlagegeber verwendet. Bei diesem Absolutdrehgeber ist jede Winkelposition einem eindeutig codierten Positionswert zugeordnet. Der absolute Positionswert steht unmittelbar nach dem Einschalten des Systems zur Verfügung. Eine Referenzfahrt beim Systemstart entfällt dadurch. Der elektrische Ausgang eines Absolutdrehgebers liefert jederzeit ein digitales Signal, das die Winkelposition der Welle eindeutig beschreibt. Die Abtastung der mechanischen Winkelposition erfolgt berührungslos und verschleissfrei über optische Elemente. Das Licht einer Infrarotdiode durchleuchtet eine drehbare Codescheibe aus Glas und eine fest stehende Blende. Das so entstehende Hell-/Dunkelmuster, wird in elektrische Signale umgewandelt.

Im folgenden ist nun die Programmsequenz zum einlesen des 12Bit Drehgebers angegeben. Der Graycode wird anschließend sofort in den Binärcode umgewandelt. Zusätzlich wird das Freigabesignal von der Ansteuerschaltung bzw. der Überstromabschaltung als erstes Bit im 16Bit Register ausgewertet. ausgewertet.

```

-- einlesen vom absoluten Lagegeber und des Freigabesignals --

lageoffs=konst(0c4c0h)      ;konstanter Lageoffset
hilf1=def                   ;Variabelndefinition
hilf2=def
hilf3=def
hilf4=def
lage=def
freigabe=konst(0)          ;Freigabe festlegen

-- auswerten des Freigabesignals --

hilf2=inp(1)                ;Port ins Register einlesen
$ lacc [hilf2]              ;hilf2 in den Akkumulator laden
$ and #0001h                ;Bits ausmaskieren und Bit0 auswerten
$ sac1 [hilf1]              ;den Akkumulator in hilf1 speichern
freigabe=sumw(null)
if hilf1=ink then           ;wenn hilf1=1h wird freigabe=1
    freigabe=sumw(eins)
endif

```

Der Graycode wird nach folgendem Prinzip in den Binärcode umgewandelt:

$$B[n]=G[n]$$

```

    for i=n-1 down to i=0
    {
        B[i]=B[i+1] XOR G[i]
    }

```

```

-- Von Graycode in Binaercode umwandeln--

$ lacc [hilf2]
$ and #0fff0h
$ sac1 [hilf1]
$ dint
$ clrc sxm
$ lack #15
$ sac1 [hilf2]
$gray1: nop
$ lacc [hilf1],15
$ sach [hilf3]
$ lacc [hilf3]

```

```
$ xor [hilf1]
$ sac1 [hilf1]
$ lacc[hilf2]
$ sub [ink]
$ sac1 [hilf2]
$ bgz gray1
$ lacc [hilf1]
$ sac1 [lage]
$ sxxm
```

6 Die INFORM -Methode zur Rotorlageerfassung

6.1 Theoretische Grundlagen der INFORM-Methode

Die sensorlose Positionsbestimmung bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Bereich tiefer Drehzahlen und im Stillstand kann dadurch realisiert werden, indem dabei die magnetischen Eigenschaften der Maschine, vor allem die Induktivität der Statorwicklungen und deren Abhängigkeit von der Rotorlage ausgenutzt werden. Die INFORM-Methode (INdirect FLux detection by ONline Reactance Measurement“) bedient sich dabei vor allem der Abhängigkeit der magnetischen Leitfähigkeit von der Winkelstellung des Rotors. Diese auftretenden Schwankungen sind auf die Sättigung der Zähne und des Jochs durch hohe lokale magnetische Flussdichten, als auch auf Reluktanzeffekte bedingt durch die geometrische Achsigkeit der Maschine zurückzuführen. Sind diese Sättigungserscheinungen in der Maschine ausreichend stark gegeben, dann spricht man von INFORM-Tauglichkeit, wodurch die Rotorlage sensorlos bestimmt werden kann. Die Idee dahinter ist, die Änderung des Stromraumzeigers in Abhängigkeit der Rotorposition relativ zu einem Spannungsraumzeiger zu messen [8]. Die Abbildung 6.1 zeigt die Flussverteilung einer zweipoligen Maschine. Der Fluss der Maschine wird vor allem durch die am Rotor aufgeklebten Permanentmagnete hervorgerufen. In diesem Bereich der Dauermagnete verursacht dieser Fluss eine starke Magnetisierung der Statorzähne, während in q-Richtung das Feld verschwindet und daher keine Magnetisierung der Statorzähne erfolgt.

Das größte Problem der INFORM-Methode stellt die 180° Unsicherheit infolge der unbekanntenen Polarität der Permanentmagnete dar. Diese Unsicherheit ist später im normalen Betrieb für die sensorlose Positionsbestimmung nicht mehr relevant, wenn zuvor die exakte Rotorposition initialisiert wird. Eine Möglichkeit die Rotorlage im Stillstand ohne Unsicherheit sensorlos zu bestimmen, bietet die modifizierte INFORM-Methode. Die Idee dahinter ist es zunächst im Stillstand sensorlos mit Hilfe der modifizierten INFORM-Methode den genauen Rotorwinkel zu bestimmen und anschließend sensorlos mittels der INFORM-Methode die Maschine drehzahl geregelt zu betreiben.

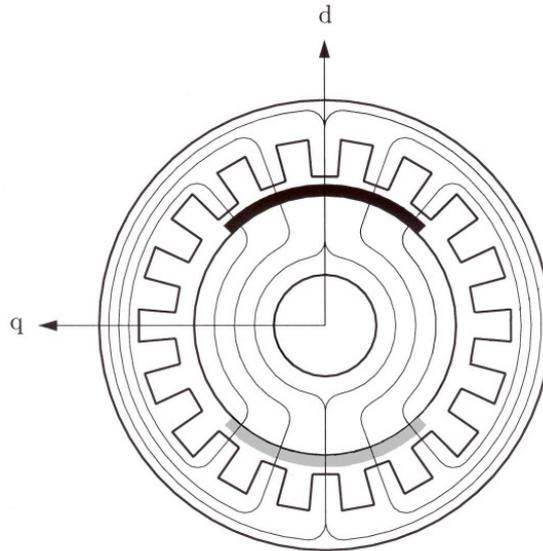


Abbildung 6.1: Schnitt durch eine zweipolige PSM mit dem dazugehörigen Fluss, der durch die Permanentmagnete hervorgerufen wird.

Für die praktische Realisierung der modifizierten INFORM-Methode lässt sich im Stillstand der Maschine das Verhältnis der hervorgerufenen Stromraumzeigeränderung über einen angelegten Spannungsraumzeiger auswerten. Diese Größe wird als die komplexe Informreaktanz bezeichnet.

$$l_{INFORM} = \frac{u_s}{\frac{di_s}{d\tau}} \quad (6.1)$$

Diese komplexe Größe kann nun zur Berechnung der Rotorlage herangezogen werden, dabei werden Spannungsraumzeiger mit bekannten Betrag und Winkel in jede Phase eingepreßt und durch Messung der Ströme ein Stromänderungsraumzeiger gebildet. Die Spannungsraumzeiger, die an jede Phase der Maschine angelegt werden, sind hinsichtlich ihrer Schusszeit¹ so ausgelegt, dass der entsprechenden Phase ein zusätzlicher konstanter Offsetstrom i_{off+} auferlegt wird.

Die Abbildung 6.2 zeigt die Magnetisierungskurve einer PSM, wobei die d-Achse mit der α -Achse zusammenfällt. Der Arbeitspunkt auf der d-Achse ist durch die Permanentmagnete definiert (in der Abbildung durch $i_{fict,M}$ repräsentiert). Die differentielle Permeabilität in d-Richtung ist im Vergleich zur q-Richtung kleiner, weshalb sich auch die differentiellen Induktivitäten $l_{d,diff} < l_{q,diff}$ unterschiedlich verhalten. In der Abbildung 6.3 ist die komplexe Ebene des Magnetisierungsstromraumzeigers (Ebene $\underline{\mu}$) der komplexen Ebene des Stromänderungsraumzeigers (Ebene $\underline{\nu}$) gegenübergestellt. Der Übergang zwischen den beiden statorfest orientierten Ebenen ist durch eine komplexe Transformation

¹Auf die Testspannungsraumzeiger und dazugehörigen Schusszeiten und Messzeiten wird später noch genauer eingegangen

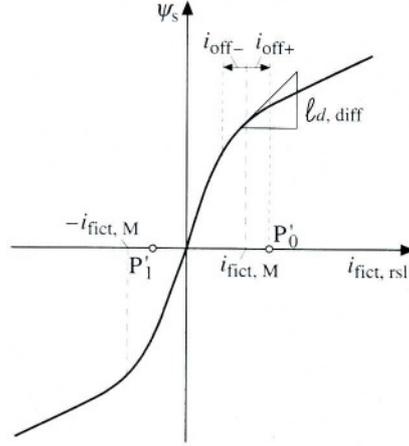


Abbildung 6.2: Magnetisierungskennlinie und Zusammenhang zwischen dem Magnetisierungsstrom und der Statorflusverkettung. Die differentielle Induktivität $l_{d, \text{diff}}$ ist auch eingezeichnet [7]

$\underline{\mu} \rightarrow \underline{\nu}$ festgelegt. In beiden Fällen ist die Rotorposition γ der Parameter der komplexen Kurven. Der Kreis $\underline{C}'(\gamma)$ in der Ebene μ repräsentiert eine Messung der Stromänderung bei einem Spannungsraumzeiger, zufolge dem keine zusätzlicher Offsetstrom auftritt. Dieser Kreis bildet in der ν -Ebene den Kreis $\underline{C}(2\gamma)$, der während einer vollen elektrischen Umdrehung des Rotors zweimal durchlaufen wird. Eine permanentmagneterregte Maschine mit zusätzlichen Offsetstrom ($i_{\text{off+}}$) beschreibt den Kreis $\underline{C}_+(2\gamma) \triangleq \underline{C}'_+$ in der μ -Ebene. Der Stromänderungsraumzeiger einer Maschine, die einen durch den Offsetstrom $i_{\text{off+}}$ modifizierten Arbeitspunkt aufweist (Kreis $\underline{C}'_{\text{off+}}$ in der μ -Ebene), ergibt in der ν -Ebene die Kurve $\underline{C}_{\text{off+}}(\gamma)$. Wenn nun weitere Messungen in gleicher Weise in Verbindung mit einem negativen Offsetstrom $i_{\text{off-}}$ durchgeführt werden, ergibt sich aus der modifizierten INFORM-Methode der Modellwinkel γ_{inf} als die aktuelle Rotorlage.

Für eine detaillierte Beschreibung und weiterführende Ansätze der modifizierten INFORM-Methode wird auf die Literatur [7] verwiesen.

Zur Beschreibung der INFORM-Methode, wird von der Statorspannungsgleichung ausgegangen, die unter Vernachlässigung des Statorwiderstandes angesetzt wird:

$$\underline{u}_s = l_s \cdot \frac{d}{d\tau} \underline{i}_s + \frac{d}{d\tau} \underline{\psi}_M \quad (6.2)$$

Für konstantem Flussraumzeigerbetrag gilt dann:

$$\underline{u}_s = l_s \cdot \frac{d}{d\tau} \underline{i}_s + j \cdot \omega_m \cdot \underline{\psi}_M \quad (6.3)$$

daraus ergeben sich die beim INFORM-Verfahren an die Maschine angelegten, entgegengesetzten Spannungsraumzeiger ($\underline{u}_{s,1}, \underline{u}_{s,2} = -\underline{u}_{s,1}$)

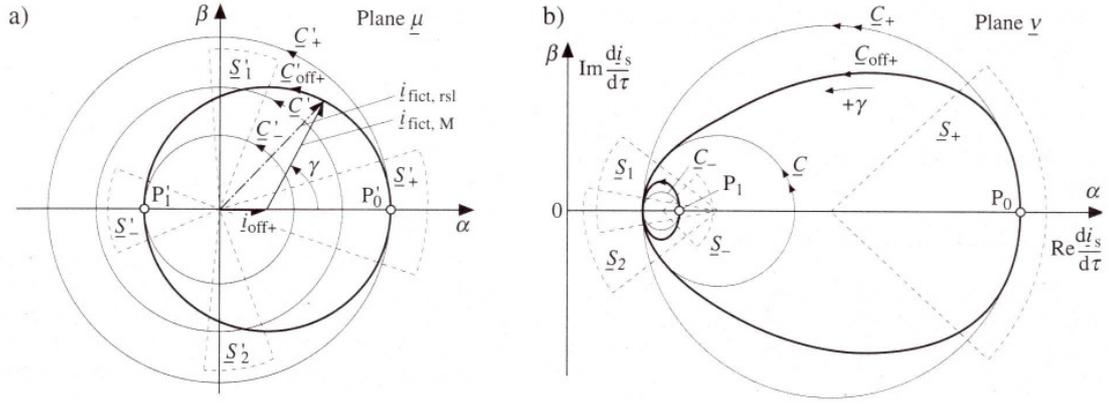


Abbildung 6.3: Die komplexe Transformation $\underline{\mu} \rightarrow \underline{\nu}$. (a) Die komplexe Ebene des Magnetisierungsstromraumzeigers (Ebene $\underline{\mu}$). (b) die komplexen Ebene des Stromänderungsraumzeigers (Ebene $\underline{\nu}$) [7]

$$\underline{u}_{s,1} = l_s \cdot \frac{d}{d\tau} i_{s,1} + j \cdot \omega_{m,1} \cdot \underline{\psi}_{-M} \quad (6.4)$$

$$\underline{u}_{s,2} = -\underline{u}_{s,1} = l_s \cdot \frac{d}{d\tau} i_{s,2} + j \cdot \omega_{m,2} \cdot \underline{\psi}_{-M} \quad (6.5)$$

Subtrahiert man Gleichung 6.5 von Gleichung 6.4 unter der Annahme, dass sich die Drehzahl während der Messung nicht ändert, dann fällt der Einfluss der EMK heraus. Es ergibt sich ein Ausdruck der Statorinduktivität in der Form

$$\underline{l}_s = \frac{2 \cdot \underline{u}_{s,1}}{\frac{d}{d\tau} i_{s,1} - \frac{d}{d\tau} i_{s,2}} \quad (6.6)$$

Die Gleichung 6.6 beschreibt als Erweiterung der Gleichung 6.1 die komplexe Reaktanz für eine PSM mit bewegtem Motor. Für die problemlose Weiterverarbeitung dieser Größe im DSP wird die Inverse der Induktivität \underline{l}_s verwendet

$$\underline{y}_{inf} = \frac{1}{\underline{l}_s} = \frac{\frac{d}{d\tau} i_{s,1} - \frac{d}{d\tau} i_{s,2}}{2 \cdot \underline{u}_{s,1}} \quad (6.7)$$

Der Verlauf von \underline{y}_{inf} als Funktion des Winkels vom angelegten Spannungsraumzeiger wird beschrieben durch

$$\underline{y}_{inf} = y_0 - \Delta y \cdot e^{j \cdot 2 \cdot (\gamma_{inf} - \arg(\underline{u}))} \quad (6.8)$$

In Abbildung 6.4 ist der Zusammenhang von Gleichung 6.8 grafisch dargestellt. Der Arbeitspunkt von \underline{y}_{inf} bewegt sich auf dem Kreis, der y_0 als Mittelpunkt und Δy_{inf} als Radius aufweist. Die mechanische Drehung des Rotors verursacht bedingt durch die beiden Pole, dass die Statorzähne zweimal in Sättigung getrieben werden, weshalb der Kreis bei einer elektrischen Umdrehung des Rotors zweimal durchlaufen wird und dadurch ein Unsicherheitsfaktor von 180° elektrisch auftreten kann. Genau dieser Fehler wird hier mittels der modifizierten INFORM-Methode im Stillstand eliminiert und der rotierenden Maschine als Startposition übergeben.

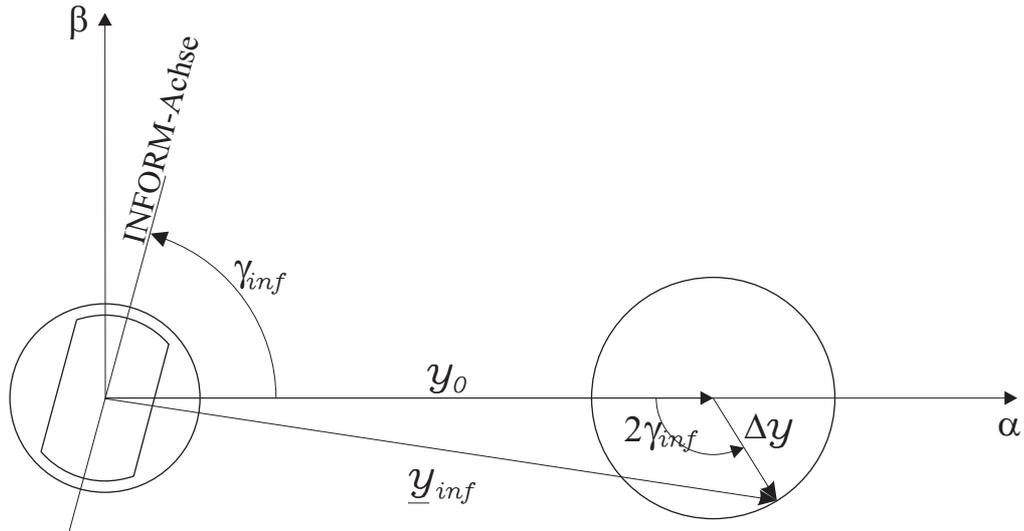


Abbildung 6.4: Grafische Darstellung der Gleichung 6.8

6.2 Die Realteilauswertung

Voraussetzung für die Auswertung der Rotorlage ist es, dass an jeden Strang der Maschine Spannungsraumzeiger angelegt werden. Das Anlegen dieser Spannungsraumzeiger bringt, wie schon erwähnt, eine Stromänderung mit sich. Ein Messschuss in Richtung u_+ hat während einer Zeit $\Delta\tau$ eine Stromänderung Δi_{u+} zur Folge, ein Messschuss u_- dementsprechend in der gleichen Zeit eine Stromänderung Δi_{u-} . Die Differenz $\overline{\Delta i_u}$ entspricht dem Stromanstieg. Für jeden Strang gilt:

$$\begin{aligned}\overline{\Delta i_u} &= \Delta i_{u+} - \Delta i_{u-} \\ \overline{\Delta i_v} &= \Delta i_{v+} - \Delta i_{v-} \\ \overline{\Delta i_w} &= \Delta i_{w+} - \Delta i_{w-}\end{aligned}\tag{6.9}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 6.9 in Gleichung 6.7 folgt

$$\underline{y}_{inf} = \frac{\overline{\Delta \underline{i}}}{2 \cdot \underline{u} \cdot \Delta\tau}\tag{6.10}$$

Wird nun für \underline{u} die Exponentialdarstellung angegeben, dann erhält man den Zusammenhang:

$$\overline{\Delta \underline{i}} \cdot e^{-j \cdot \arg(\underline{u})} = 2 \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}| \cdot (y_0 - \Delta y \cdot e^{j \cdot 2 \cdot (\gamma_{inf} - \arg(\underline{u}))})\tag{6.11}$$

Der Stromänderungsraumzeiger $\overline{\Delta \underline{i}}$ ist definiert durch

$$\overline{\Delta \underline{i}} = \frac{2}{3} (\overline{\Delta i_u} + \overline{\Delta i_v} \cdot e^{j \frac{2\pi}{3}} + \overline{\Delta i_w} \cdot e^{j \frac{4\pi}{3}})\tag{6.12}$$

Die Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit dem Realteil der rechten Seite von Gleichung 6.11 liefert:

$$\Re\{\overline{\Delta i} \cdot e^{-j0}\} = \overline{\Delta i_u} = 2 \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}| \cdot [y_0 - \Delta y \cdot \cos(2 \cdot \gamma_{inf})] \quad (6.13)$$

$$\Re\{\overline{\Delta i} \cdot e^{-j \cdot \frac{4\pi}{3}}\} = \overline{\Delta i_v} = 2 \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}| \cdot [y_0 - \Delta y \cdot \cos(2 \cdot \gamma_{inf} - \frac{4\pi}{3})] \quad (6.14)$$

$$\Re\{\overline{\Delta i} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}\} = \overline{\Delta i_w} = 2 \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}| \cdot [y_0 - \Delta y \cdot \cos(2 \cdot \gamma_{inf} - \frac{2\pi}{3})] \quad (6.15)$$

Durch Bildung der komplexen Linearkombination

$$\underline{c}_{inf} = \overline{\Delta i_u} + \overline{\Delta i_v} \cdot e^{j \cdot \frac{4\pi}{3}} + \overline{\Delta i_w} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} \quad (6.16)$$

ergibt sich das Argument, das den doppelten elektrischen Rotorwinkel liefert

$$\arg(\underline{c}_{inf}) = 2 \cdot \gamma_{inf} + \pi \quad (6.17)$$

7 Sensorlose Positionserfassung im Stillstand

Nachfolgend soll untersucht werden, mit welcher Genauigkeit die Rotorlage im Stillstand der Maschine mittels der modifizierten INFORM-Methode erfasst werden kann. Aus diesem Grund müssen zunächst eine Reihe von Messungen unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden, die anschließend mit Hilfe der Statistik ausgewertet, bewertet und verglichen werden können.

Die prinzipielle Struktur geht von einem Stromregler aus, dem ähnlich wie bei der Drehzahlregelung ein Drehmoment bildender Strom in q-Richtung vorgegeben wird. Die Vorgabe eines Drehmomentes mittels eines Stromes in q-Richtung hat eine Drehzahländerung zur Folge, wodurch der Rotor von der aktuellen Lage weggedreht wird. Auf eine notwendige Begrenzung des Stromreglerausgangs ist dabei nicht zu vergessen. Der maximale Ausgabewert des Sollspannungsraumzeigers beträgt daher dem im gesamten Aussteuerbereich von 360° erreichbaren Wert von 0.866-bezogen. Neben dem Sollspannungsraumzeiger ist es notwendig auch den Strom in q-Richtung zu begrenzen. Die obere Grenze wird im HANSL-Programm mit der Variable "Iqmax" festgelegt.

7.1 Die Großsignal-INFORM-Sequenz

Wie schon im vorigen Kapitel angedeutet, wird die Startposition der PSM sensorlos mittels der INFORM-Methode - auch Großsignal-INFORM genannt - ermittelt. Um die aktuelle Rotorlage ermitteln zu können, müssen daher Spannungsraumzeiger, sogenannte INFORM-Schüsse, an die Maschine angelegt werden. Die Großsignal-Schussesequenz besteht aus einem Vorschuss, einem Hauptschuss und einem Nachschuss, sodass die Auslenkung in beide Richtungen symmetrisch um den magnetischen Arbeitspunkt zu liegen kommt. Die Abbildung 7.1 zeigt die typische INFORM-Sequenz und die dazu gehörigen typischen Strommesspunkte während eines INFORM-Schusses.

Im Folgenden wird darauf hingearbeitet diese typische Großsignal-Schussesequenz hinsichtlich guter Messergebnisse, für die Positionsbestimmung des Rotors zu optimieren. In erster Linie ist eine geeignete Gesamtschusszeit zu finden, die in der

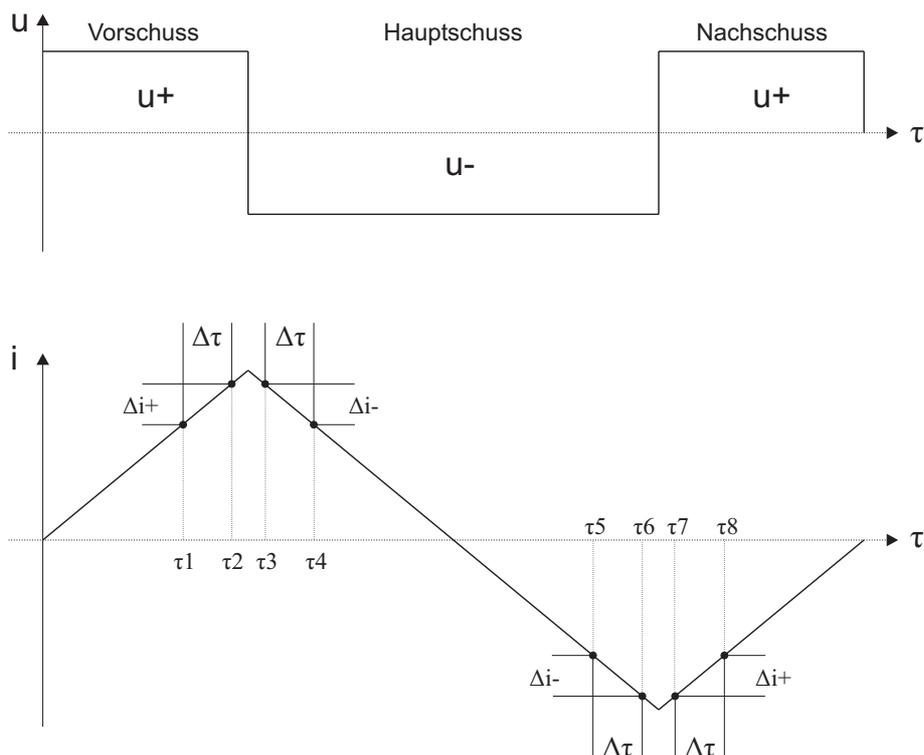


Abbildung 7.1: Prinzipielle INFORM-Sequenz für einen Strang. Diese Schussform wird zur Bestimmung der Anfangslage herangezogen.

Maschine eine Auslenkung des Stromes hervorruft und den Arbeitspunkt ausreichend in Sättigung treibt. Der Fehler zwischen der mit dem INFORM-Verfahren ermittelten Startposition und der tatsächlichen Lage vom absoluten Drehgeber, soll minimal ausfallen. Die Strommessungen in einem Stromanstieg sind daher in ihrer Messzeit $\Delta\tau$ so festzulegen, dass ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird.

Grundsätzlich liegen für die Auslegung der Schusszeit und dem damit zusammenhängenden Stromanstieg in der Maschine vier verschiedene Bedingungen vor:

Umrichter netzseitig im Diodenbetrieb ($U_{ZK}=563V$)

- mit ungefilterter Strommessung
- mit gefilterter Strommessung (Butterworthfilter)

Umrichter netzseitig im Hochsetzbetrieb ($U_{ZK}=770V$)

- mit ungefilterter Strommessung
- mit gefilterter Strommessung (Butterworthfilter)

Da die Schusszeiten für jeden einzelnen Umrichterbetrieb und je nach Strommessvariante neu eingestellt bzw. korrigiert werden müssen, wird später im jeweiligen Fall näher darauf eingegangen. Im Voraus kann jedoch allgemein gesagt werden, dass die Messzeiten $\Delta\tau$ einer Schusssequenz für jede Betriebsart des Umrichters erheblich vergrößert werden. Die Abbildung 7.1 zeigt die prinzipielle Schussform, wobei der Strom

kurz vor Änderung der Schussrichtung, in einem kleinen Messfenster, zweimal gemessen und daraus die Stromdifferenz Δi gebildet wird. Verschiedene Messungen haben ergeben, dass die INFORM-Methode einen kleineren Fehler liefert, wenn eine Messung des Stromes zu Beginn des Anstiegs und die zweite Messung desselben Anstiegs kurz vor dem Schusswechsel erfolgt. Im Hauptschuss sind somit anstatt vier Strommesswerte nur mehr zwei gemittelte Messwerte notwendig, und anstatt der üblichen 8 Strommesswerte ($i_{g1} - i_{g8}$ in Abbildung 7.2) werden nunmehr nur noch 4 Strommesswerte für die Bestimmung des Modellwinkels herangezogen. Die Messwerte i_{g3} , i_{g4} , i_{g7} und i_{g8} werden gelöscht und gehen nicht in die Berechnung ein. Der Nachschuss trägt daher zur Winkelberechnung nicht mehr bei und dient nur dazu, dass der Schuss symmetrisch um den Arbeitspunkt zu liegen kommt. Die vier gelöschten Messungen bleiben in der INFORM-Sequenz in ihrer Form bestehen, so dass es nicht zu Verschiebungen und Unsymmetrien im Schuss selbst kommt. Dieses Problem könnte auch einfach gelöst werden, indem die wegfallende Messzeit durch zusätzliche Schusszeiten kompensiert wird.

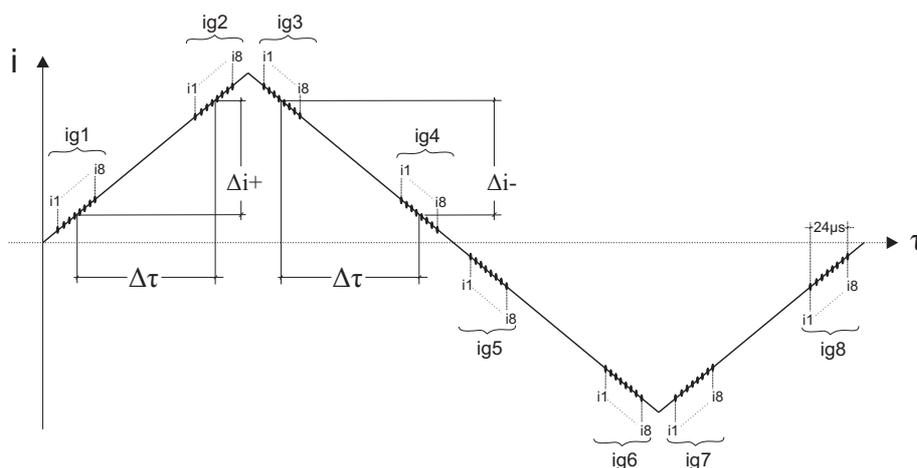


Abbildung 7.2: Die Abbildung 7.2 zeigt die geänderte Strommesszeit und das Prinzip der Mittelung mehrerer Strommessungen in einem Schuss.

Der Fehlerwinkel zwischen INFORM-Methode und des Absolutlagegebers wird mit einem Programm ermittelt, das den Rotorlagewinkel alle 1.5s neu bestimmt und anschließend den Rotor mit einem definierten Strom in q-Richtung für kurze Zeit beschleunigt. Der zu ermittelnde Winkel des Rotors ändert sich durch das kurze Beschleunigen laufend, wobei es jedoch, bedingt durch den Aufbau der Maschine, Vorzugslagen gibt. Auf diese Art und Weise werden hintereinander 500 Messungen zur Ermittlung der Startposition unter gleichen Bedingungen durchgeführt und statistisch ausgewertet. Mit Hilfe dieser Methode können systematische Abweichungen der INFORM-Auswertung über eine gesamte Umdrehung der Welle festgestellt und eine geeignete Korrekturfunktion bestimmt werden. Um den statistisch verteilten Fehlerwinkel noch weiter zu reduzieren wird versucht zusätzlich zur vergrößerten

Messzeit $\Delta\tau$, eine Mittelwertbildung $i_{g1} - i_{g8}$ über mehrere schnell aufeinander folgende Strommessungen innerhalb eines Schusses vorzunehmen. In der Abbildung 7.3 werden die Standardabweichungen bei Mittelung über eine unterschiedliche Anzahl von Strommessungen in einem Stromanstieg während einer gesamten INFORM-Sequenz dargestellt. Werden die Werte der Standardabweichung genauer betrachtet, dann fällt auf, dass der Fehler mit steigender Anzahl von Strommesspunkten deutlich abnimmt. Das Prinzip der Mittelung über mehrere Strommessungen innerhalb des selben Schusses, sowie das vergrößerte Messfenster $\Delta\tau$ sind in der Abbildung 7.2 wiedergegeben.

Es sei hier bemerkt, dass alle Messungen zunächst im Diodenbetrieb des netzseitigen Umrichters durchgeführt und optimiert worden sind. Die gewonnenen Parameter und Erkenntnisse sind später für alle anderen Betriebsvarianten erfolgreich übernommen worden.

Die optimale Anzahl von Strommessungen in einem Schuss ist durch gezieltes Löschen von Messpunkten aus der endgültigen Schussform ermittelt worden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die abgeänderten Messpunkte symmetrisch zum Mittelpunkt der endgültigen Strommessung liegen. In der Tabelle 7.1 sind die Messzeitpunkte (Abb. 7.2) über die Anzahl der Messungen angegeben.

Anzahl der Messpunkte	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	Standardabweichung
1					x				7.35
2			x			x			6.97
4	x		x		x		x		6.18
8	x	x	x	x	x	x	x	x	5.78

Tabelle 7.1: Die Messzeitpunkte der Schusssequenz nach Abb. 7.2 für die Ermittlung der Standardabweichung bei Mittelung über mehrere Strommesswerte

Die Standardabweichungen der unterschiedlichen Messungen aus Tabelle 7.1 sind in Abbildung 7.3 gegenübergestellt, wobei der Grafik zu entnehmen ist, dass die Mittelung über acht Strommesspunkte ein guter Kompromiss ist. Die Mittelung über acht Messwerte wird demzufolge in weiteren Messungen zur Bestimmung der Startposition mittels Großsignal-INFORM angewendet. Weiters ist der INFORM-Rohwinkel zusätzlich über acht gesamte INFORM-Sequenzen gemittelt worden, wobei als eine gesamte INFORM-Sequenz die Schussfolge in u-, v- und w-Richtung angesehen wird.

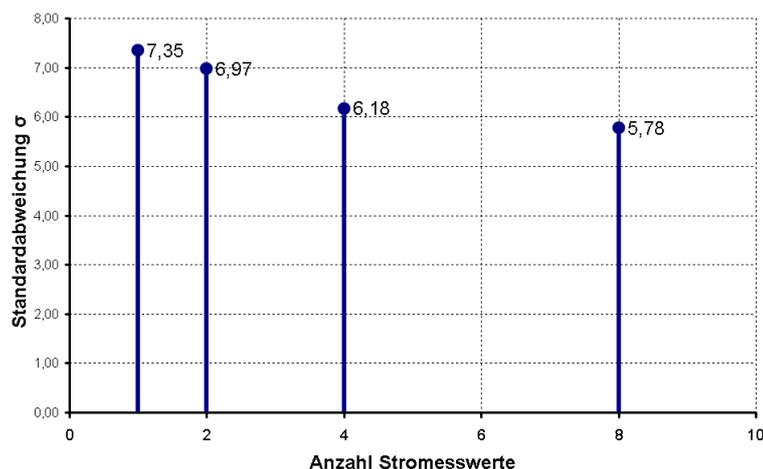


Abbildung 7.3: Die Standardabweichungen der Mittelung über eine unterschiedliche Anzahl von Strommesswerten

Zur Bestimmung der Rotorlage wurde für die nachstehenden Messungen folgender Programmcode verwendet. Für die Beschleunigung des Rotors wird der Großsignalwinkel als Startposition angegeben.

```

iqmax=konst(0.2)                ;Begrenzung von Iq
z_iqi=konst(0fdch)             ;36*1,398ms=50ms
z_schi=konst(00fcah)          ;54*1,398ms=75,492ms
if go=eins then
  z_sch=sumw(z_sch,ink)        ;inkrementieren um 1h
  schuss=sumw(eins)            ;Gro{\ss}signal-INFORM schießen
  if z_sch>=eins then
    schuss=sumw(null)
    if z_sch_e=sumw(null) then

      wi1=sumw(wia8)           ;Mittelung des Fehlerwinkels
      wi2=sumw(wia7)           ;ueber 8 gesamte Informsequenzen
      $ call wimittel           ;d.h. eine gesamte Schussesequenz
      hilf1=sumw(wimw)         ;entspricht:
                                ;           Schuss u-Richtung
      wi1=sumw(wia6)           ;           Schuss v-Richtung
      wi2=sumw(wia5)           ;           Schuss w-Richtung
      $ call wimittel
      hilf2=sumw(wimw)

      wi1=sumw(wia4)
      wi2=sumw(wia3)
      $ call wimittel

```

```
hilf3=sumw(wimw)

wi1=sumw(wia2)
wi2=sumw(wia1)
$ call wimittel
hilf4=sumw(wimw)

wi1=sumw(hilf1)
wi2=sumw(hilf2)
$ call wimittel
hilf1=sumw(wimw)

wi1=sumw(hilf3)
wi2=sumw(hilf4)
$ call wimittel
hilf2=sumw(wimw)

wi1=sumw(hilf1)
wi2=sumw(hilf2)
$ call wimittel
gagross=sumw(wimw)

gafehl=sumw(gagross,-gamma) ;Fehlerwinkel zwischen Lagegeber
z_sch_e=sumw(eins) ;und INFORM-Rohwinkel
ramdat=sumw(gagross) ;Werte ins RAM schreiben
$ call ram_wr
ramdat=sumw(gafehl)
$ call ram_wr
$ dint
cosgamma=cos(gagross) ;Rotor weiterdrehen mit Iqmax
singamma=sin(gagross)
is_q=sumw(iqmax)
$ eint
endif
z_iq=sumw(z_iq,ink) ;Rotor beschleunigen und
if z_iq>=eins then
is_q=sumw(null)
omend=sumw(omega) ;Enddrehzahl ins RAM schreiben
go=sumw(null)
ramdat=sumw(omend)
$ call ram_wr
if ram_of=eins then
auto=sumw(null)
```

```
        endif
    endif
endif
else
z_iq=sumw(z_iqi)                ;Zaehler neu initialisieren
z_sch=sumw(z_schi)
z_sch_e=sumw(null)
is_q=sumw(null)
cosgamma=sumw(null)
singamma=sumw(null)
endif

z_auti=konst(0bcfh)            ;alle 1,5s eine Messung starten
if auto=eins then
    z_aut=sumw(z_aut,ink)
    if z_aut>=eins then
        z_aut=sumw(z_auti)
        go=sumw(eins)           ;Obige Pogrammsequenz freigeben
        ramdat=sumw(gamma)
        $ call ram_wr
    endif
else
    z_aut=sumw(z_auti)
endif
endif
```

7.2 Umrichter im Diodenbetrieb

Der INFORM-Schuss der Großsignalmessung im Diodenbetrieb ist hinsichtlich der Schusszeiten so ausgelegt, dass in jede Richtung eine maximale Stromauslenkung von ungefähr 680A erreicht wird. Die Abbildung 7.4 zeigt den Stromverlauf der im Diodenbetrieb verwendeten INFORM-Sequenz mit den dazugehörigen Schuss- und Messzeiten, wobei die Totzeit von 2.5μ bei der Auslegung berücksichtigt werden muss. Der Stromverlauf einer gemessenen INFORM-Sequenz ist in Abbildung 7.5 wiedergegeben.

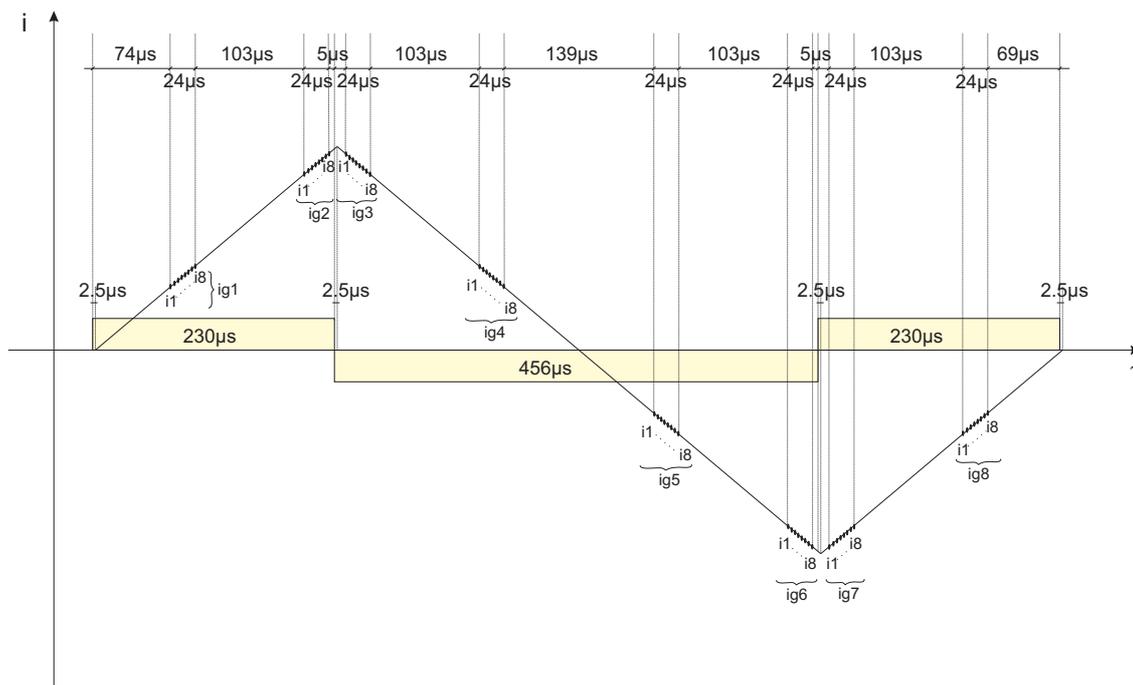


Abbildung 7.4: Die INFORM-Schusssequenz im Diodenbetrieb. Die Strommessungen i_{g3} , i_{g4} , i_{g7} und i_{g8} werden zwar durchgeführt, gehen aber nicht in die Modellwinkelberechnung mit ein. Eine andere Möglichkeit ist es die genannten Strommessungen nicht durch zu führen, und stattdessen die Schusszeit dementsprechend zu verlängern

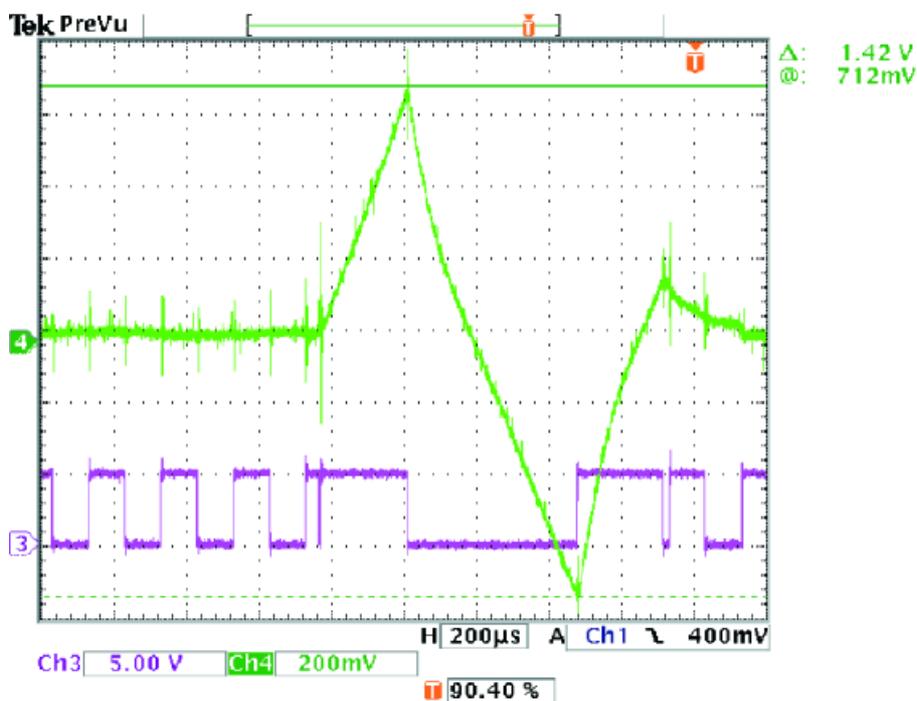


Abbildung 7.5: INFORM-Schuss im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung
 CH3 Ansteuersignal Phase U
 CH4 Strom Phase U; 186A/Div

Im Folgenden ist das Programmlisting für die modifizierte INFORM-Sequenz mit den in Abbildung 7.4 angeführten Schusszeiten und den dazugehörigen Strommesspunkten wiedergegeben. Diese Schussform muss lediglich einmal ausprogrammiert werden und wird dann auf alle drei Phasen angewendet. Das vollständige Programmlisting mit der gesamten Großsignalmessung und ihrer Auswertung ist im Anhang B.1 angeführt.

— Großsignalschuss für alle drei Phasen im Diodenbetrieb —

```
$gr_inf:nop                ;Sprungadresse
  inf(pwmoff)
  delay(4)                  ;4us warten
  inf(schusp)               ;dann in plus-Richtung schießen (Vorschuss)
  delay(74)                 ;nach 74us
  $ call gr_mwi             ;die 1. Strommessung
  ig1=sumw(igx)            ;gemittelt ueber 8 Messwerte
  delay(103)                ;103us weiter in plus-Richtung
  $ call gr_mwi             ;die 2. Strommessung
  ig2=sumw(igx)
  delay(5)                  ;noch 5us in plus-Richtung
  inf(schusm)               ;Hauptschuss in minus-Richtung
  delay(10)                 ;10us schießen, dann
  $ call gr_mwi             ;die 3. Strommessung
  ig3=sumw(igx)
  delay(103)                ;103us weiter in minus-Richtung
  $ call gr_mwi             ;die 4. Strommessung
  ig4=sumw(igx)
  delay(139)                ;139us weiter in minus-Richtung
  $ call gr_mwi             ;die 5. Strommessung
  ig5=sumw(igx)
  delay(103)                ;103us weiter in minus-Richtung
  $ call gr_mwi             ;die 6. Strommessung
  ig6=sumw(igx)
  delay(5)                  ;noch 5us in minus-Richtung
  inf(schusp)               ;Nachschuss in plus-Richtung
  delay(10)                 ;10us schießen, dann
  $ call gr_mwi             ;die 7. Strommessung
  ig7=sumw(igx)
  delay(103)                ;103us weiter in plus-Richtung
  $ call gr_mwi             ;die 8. Strommessung
  ig8=sumw(igx)
  delay(69)                 ;noch 69us in plus-Richtung
  inf(pwmoff)
  ig3=sumw(null)           ;Messungen 3,4,7 und 8 loeschen:
  ig4=sumw(null)           ;denn es werden nur noch zwei Messungen
```

```
ig7=sumw(null)           ;pro Flanke ausgewertet
ig8=sumw(null)
$ret
```

7.2.1 Ungefilterte Strommessung im Diodenbetrieb

Hier wird nun der Fehler der mittels der INFORM-Methode ermittelten Startposition des Rotors gegenüber der Referenzlage des absoluten Drehgebers bestimmt. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 7 bereits erläutert worden. Eine Messreihe erstreckt sich über 500 Messungen, die im Abstand von 1.5s erfolgen, wobei der Rotor nach jeder Messung einen anderen zufälligen Lagewinkel einnimmt und sich zum Zeitpunkt der Messung im Stillstand befindet. Eine anschließende statistische Auswertung lässt systematische Abweichungen des Fehlerwinkels erkennen, infolgedessen eine Korrekturfunktion gefunden werden kann, die den durch die INFORM-Methode errechneten Rotorlagewinkel korrigiert.

Die statistische Auswertung der unterschiedlichen Messungen erfolgt mit dem Programm MATLAB. Hierzu ist ein eigenes Programm geschrieben worden (Anhang B.2), das die Normalverteilung des Winkelfehlers darstellt, sowie Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Die Korrekturfunktion wird mit der MATLAB Curve Fitting Toolbox bestimmt.

Die Bewertung der Qualität der zugrunde liegenden Ergebnisse erfolgt mit Hilfe der Gauss- bzw. der Normalverteilung. Eine hinreichende Aussage liefert in erster Linie der Mittelwert μ des Fehlerwinkels:

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \quad (7.1)$$

Eine Messreihe wird jedoch durch ihren Mittelwert nicht ausreichend charakterisiert, da die einzelnen Messwerte bei gleichem Mittelwert verschieden stark streuen können. Ein gebräuchliches und aussagekräftiges Maß für die Kennzeichnung der Abweichung der N einzelnen Messwerte vom Mittelwert ist die Standardabweichung. Sie ist definiert als die Wurzel aus der Varianz

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2 - \mu^2} \quad (7.2)$$

Mit welcher Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) $p(x)$ die Messwerte auftreten, wird durch die Verteilungsfunktion beschrieben. Die Wahrscheinlichkeitsdichte bei der Normalverteilung ist gegeben durch

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (7.3)$$

Die Normalverteilung des Fehlers und die Abweichung des Winkels in Abhängigkeit der Startposition bzw. der aktuellen Lage des Rotors sind in Abbildung 7.6 und in Abbildung 7.7 dargestellt. Hierbei ist der Startwinkel ohne Korrekturfunktion im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung erfasst worden.

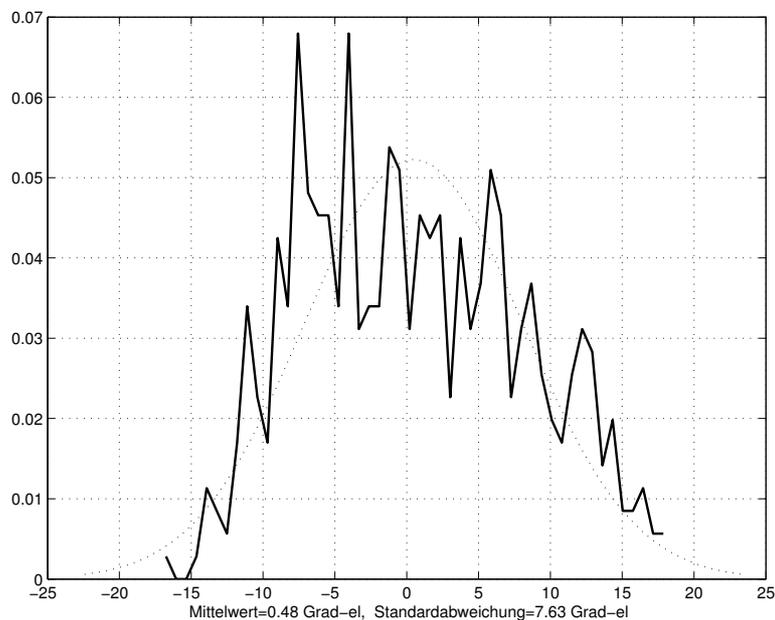


Abbildung 7.6: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung, unkorrigiert

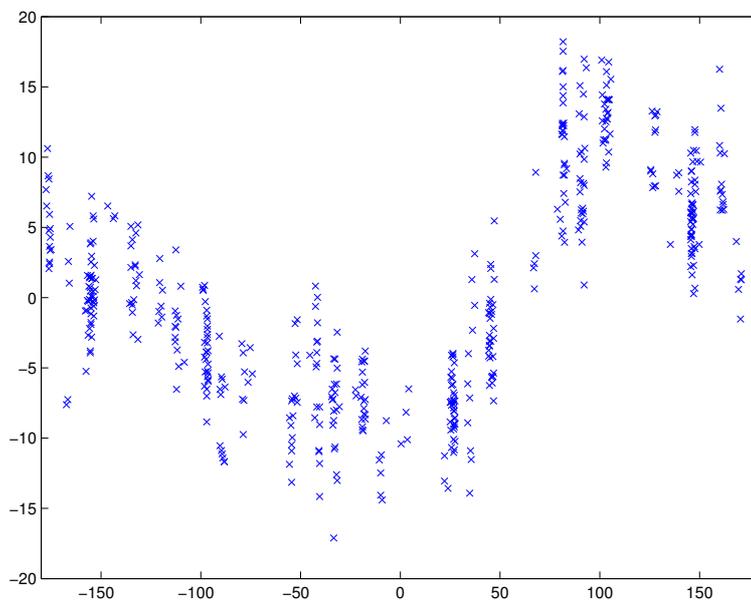


Abbildung 7.7: Fehler der ermittelten Startposition im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung, unkorrigiert
x-Achse: Startposition y-Achse: Winkelfehler

Der Winkelfehler in Abbildung 7.7 zeigt eine Abweichung von ungefähr $\pm 18^\circ$ von der jeweiligen Startposition. Eine genauere Betrachtung der Verteilung lässt den Schluss zu, dass der Fehler eine Funktion mit periodischem Charakter in Abhängigkeit der Rotorlage darstellt. Um diese Funktion approximieren zu können und eine passende Korrekturfunktion zu ermitteln ist es sinnvoll einen periodischen Ansatz zu wählen, der auf die Trigonometrischen Funktionen *sin* und *cos* aufbaut. Als Ansatz für die Approximation der Fehlerkurve wird die Fourierreihe herangezogen, die allgemein eine Funktion der Gestalt

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t)] \quad (7.4)$$

beschreibt. Wird bei der Entwicklung der Korrekturfunktion nur die Grundschiwingung der Fourierreihe 7.3 betrachtet, dann ergibt sich eine Korrekturfunktion der Form

$$\gamma_{korrigiert} = a_0 + a_1 \cdot \cos(\gamma_{INFORM}) + b_1 \cdot \sin(\gamma_{INFORM}) \quad (7.5)$$

mit den Koeffizienten a_0, a_1 und b_1 . Die im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung ermittelte Korrekturfunktion ist in Abbildung 7.8 zu sehen. Die Koeffizienten der Fourierfunktion lauten

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.2322 & 0.01032\text{HE} \\ a_1 &= 6.359 & 0.2826\text{HE} \\ a_2 &= -6.421 & 0.2854\text{HE} \end{aligned}$$

HE.....HANSLEINHEIT

Die Einbindung der Korrekturfunktion und der zugehörigen Koeffizienten in die Großsignalmessung erfolgt nach dem Prinzip

$$\gamma_{INF,korr} = \gamma_{INFORM} - \gamma_{korrigiert} \quad (7.6)$$

Die programmtechnische Ausführung ist im Programmlisting im Anhang B.1 dokumentiert.

Vergleicht man nun die zuvor gewonnenen Ergebnisse der ungefilterten Strommessung ohne Korrekturfunktion mit den Ergebnissen der korrigierten INFORM-Winkelbestimmung (Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10), dann ist ersichtlich, dass der Winkelfehler deutlich abgenommen hat und in einem Toleranzband von $\pm 11^\circ$ zu liegen kommt. Die Standardabweichung σ hat sich von 7.63° auf 3.24° verbessert (die Standardabweichungen sind als elektrische Grade zu interpretieren).

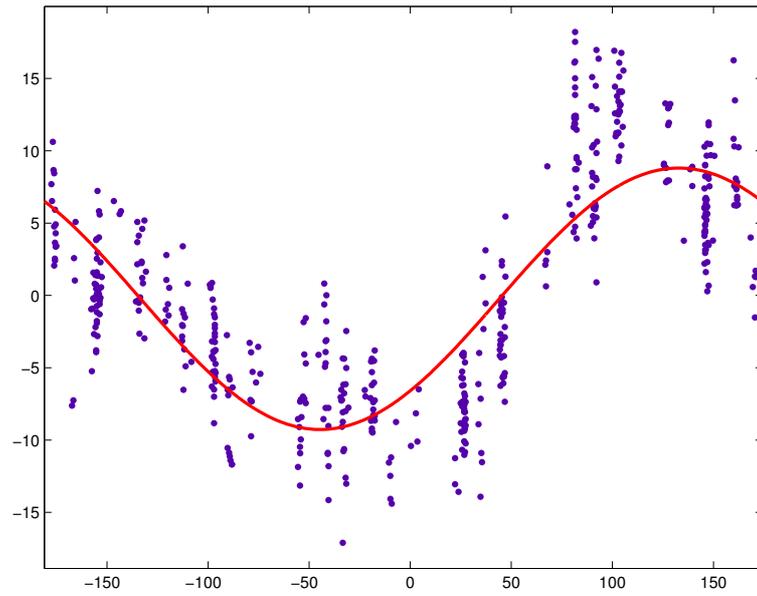


Abbildung 7.8: Korrekturfunktion der ungefilterten Strommessung im Diodenbetrieb

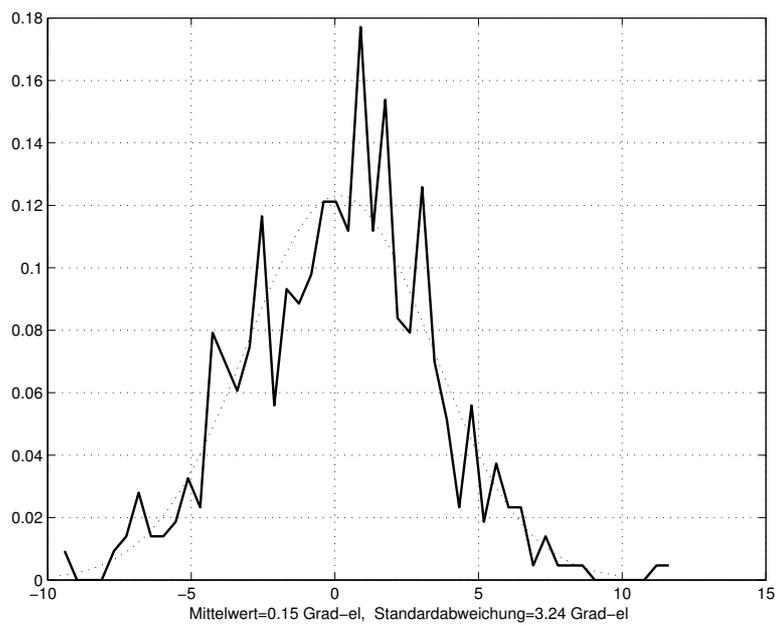


Abbildung 7.9: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung, korrigiert

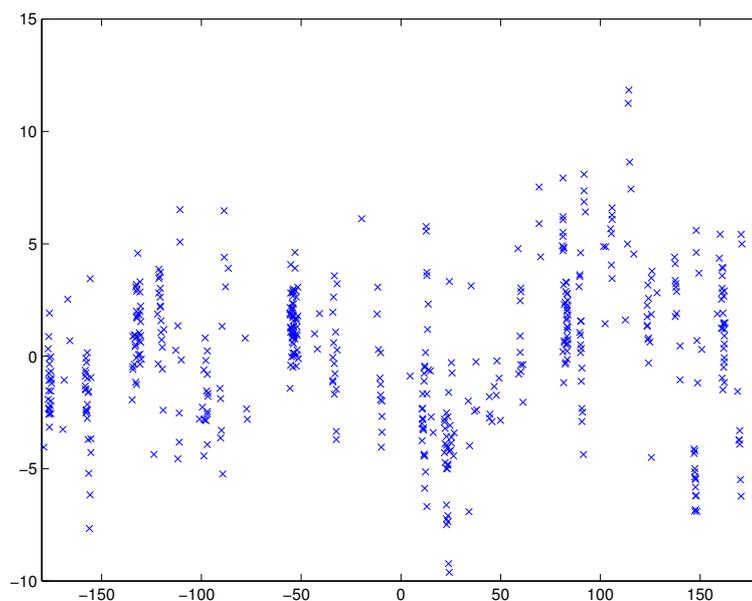


Abbildung 7.10: Fehler der ermittelten Startposition im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung, korrigiert
x-Achse: Startposition y-Achse: Winkelfehler

7.2.2 Strommessung mit Butterworthfilter im Diodenbetrieb

Die INFORM-Schusssequenz im gefilterten Diodenbetrieb hat sich gegenüber der ungefilterten Strommessung nicht geändert und entspricht daher genau der in Abbildung 7.4 dargestellten Schussform. Die Messbedingungen bleiben auch dieselben. So wird weiterhin ein Stromwert über acht aufeinanderfolgende Strommessungen, sowie der INFORM-Rohwinkel über acht gesamte Sequenzen gemittelt. Die INFORM-Schusssequenz im gefilterten Betrieb (Abbildung 7.11) weist allerdings eine zeitliche Verzögerung und einen schleifenden Übergang bei der Änderung der Schussrichtung auf.

Die Abbildung 7.12 und die Abbildung 7.13 zeigen wiederum die Normalverteilung des Winkelfehlers und die Abweichung des Winkels in Abhängigkeit der Lage des Rotors im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung.

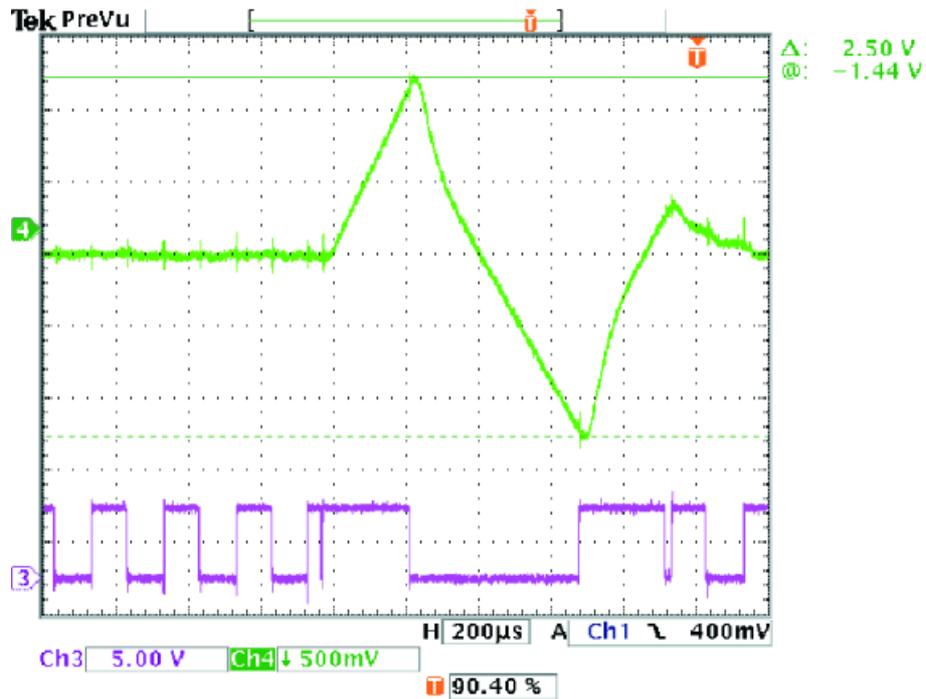


Abbildung 7.11: INFORM-Schuss im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung
 CH3 Ansteuersignal Phase U
 CH4 Strom Phase U; 241A/Div

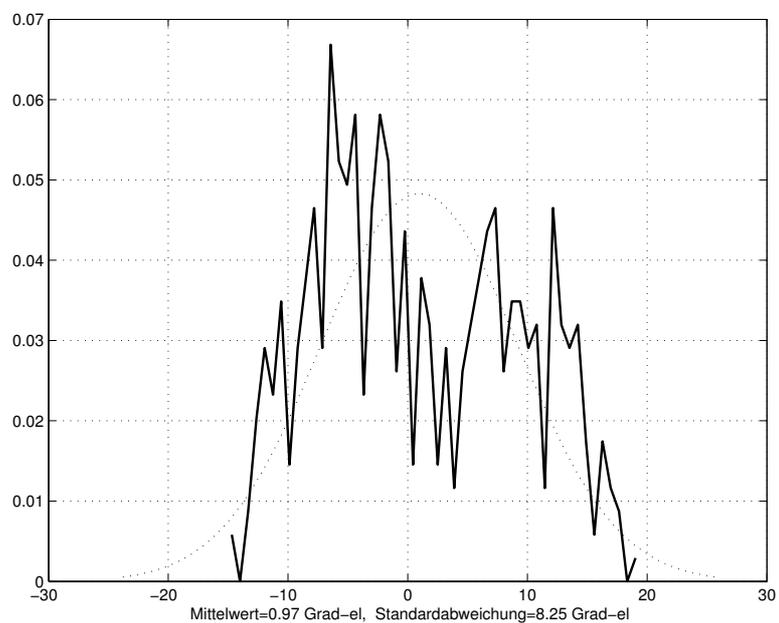


Abbildung 7.12: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung, unkorrigiert

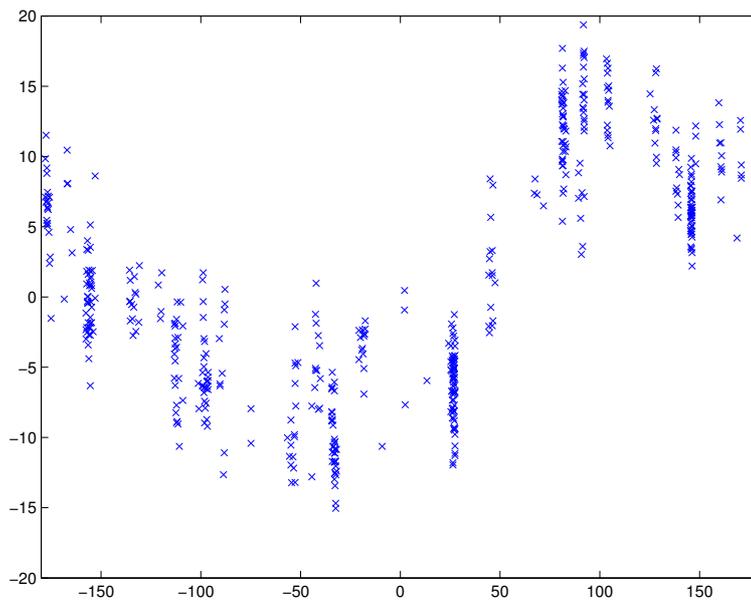


Abbildung 7.13: Fehler der ermittelten Startposition im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung, unkorrigiert
 x-Achse: Startposition y-Achse: Winkelfehler

Die Korrekturfunktion (Abbildung 7.14) für die gefilterte Strommessung im Diodenbetrieb hat nun die Koeffizienten:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= -0.1838 & -0.008168\text{HE} \\
 a_1 &= 6.069 & 0.2697\text{HE} \\
 a_2 &= -8.265 & -0.3673\text{HE}
 \end{aligned}$$

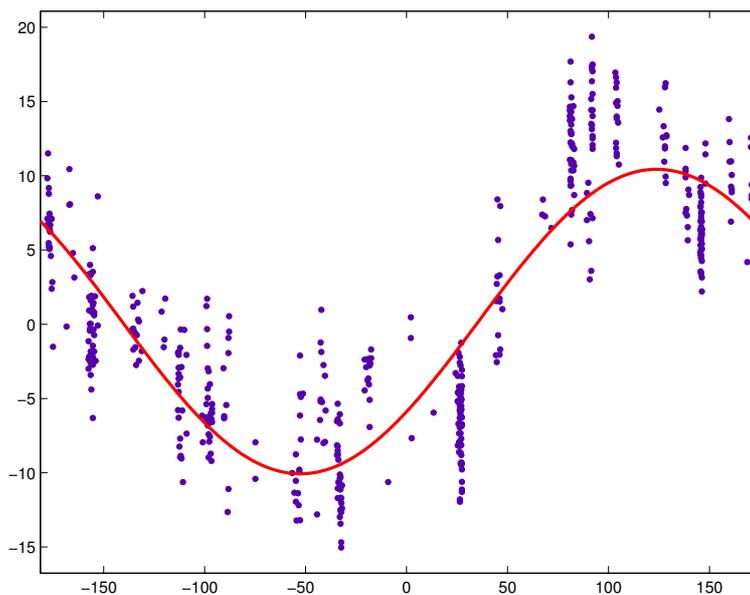


Abbildung 7.14: Korrekturfunktion der gefilterten Strommessung im Diodenbetrieb

Um wieder vergleichen zu können sind in der Abbildung 7.15 und Abbildung 7.16 die korrigierten Messwerte aufgezeigt. Auch im Fall der gefilterten Strommessung nimmt die Standardabweichung gegenüber der unkorrigierten INFORM-Messung deutlich ab, wodurch eine wesentlich höhere Wahrscheinlichkeitsdichte erreicht werden kann.

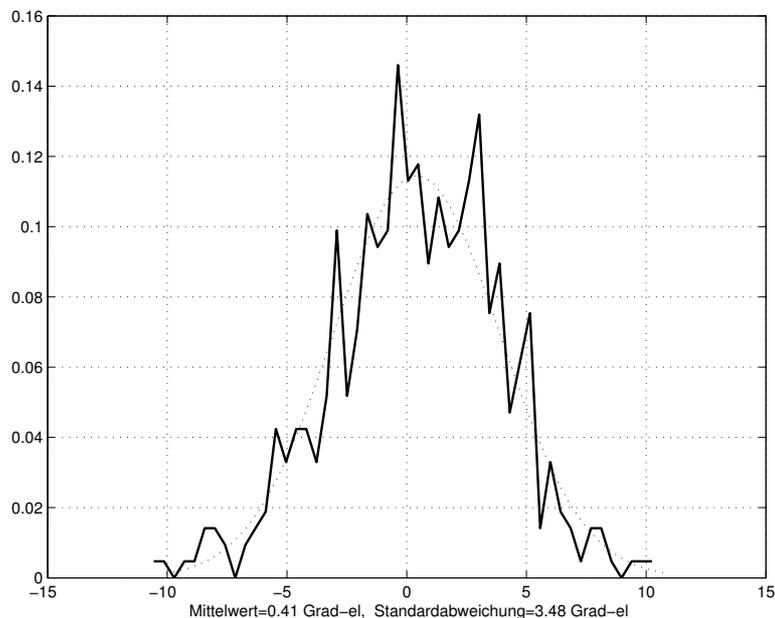


Abbildung 7.15: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung, korrigiert

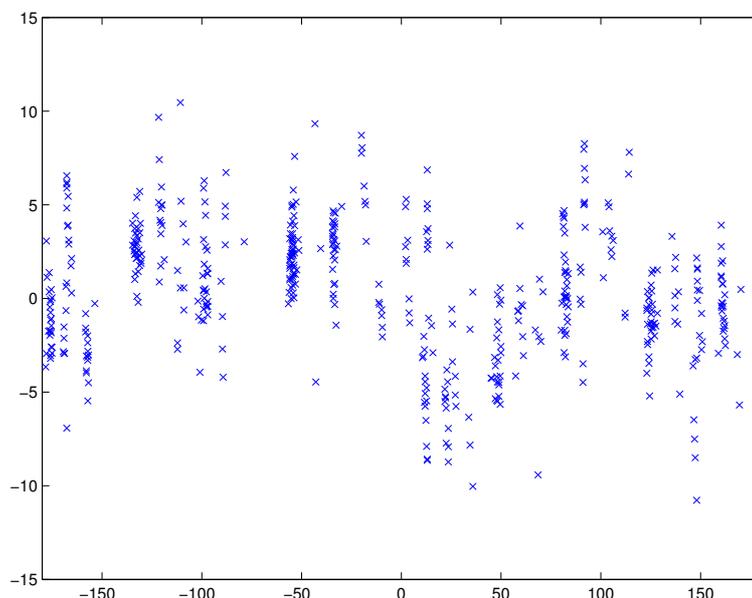


Abbildung 7.16: Fehler der ermittelten Startposition im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung, korrigiert

x-Achse: Startposition

y-Achse: Winkelfehler

7.3 Umrichter im Hochsetzbetrieb

Der netzseitige Umrichter wird als Hochsetzsteller betrieben, wodurch der Zwischenkreis auf eine höhere Spannung eingestellt wird, als im Diodenbetrieb. Die höhere Zwischenkreisspannung hat zur Folge, dass der Stromanstieg in der Maschine beim Anlegen eines INFORM-Schusses im Vergleich zum Diodenbetrieb wesentlich schneller steigt. Dementsprechend müssen die Schuss- und Messzeiten der INFORM-Sequenz im Hochsetzbetrieb soweit verkürzt werden, dass der Strom ungefähr dieselbe Auslenkung wie im Diodenbetrieb erfährt, wobei die Totzeit wiederum in die Schusszeiten mit eingeht. In der Abbildung 7.17 ist der Stromverlauf der INFORM-Sequenz vom Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung dargestellt. Den tatsächlichen Stromverlauf zeigt Abbildung 7.18. Die Auslenkung des Stromes beträgt im Hochsetzbetrieb ungefähr 700A. Das Programmlisting aus Kapitel 7.2 bleibt in seiner Struktur gleich, es werden lediglich die Auslenk- und Messzeiten geändert.

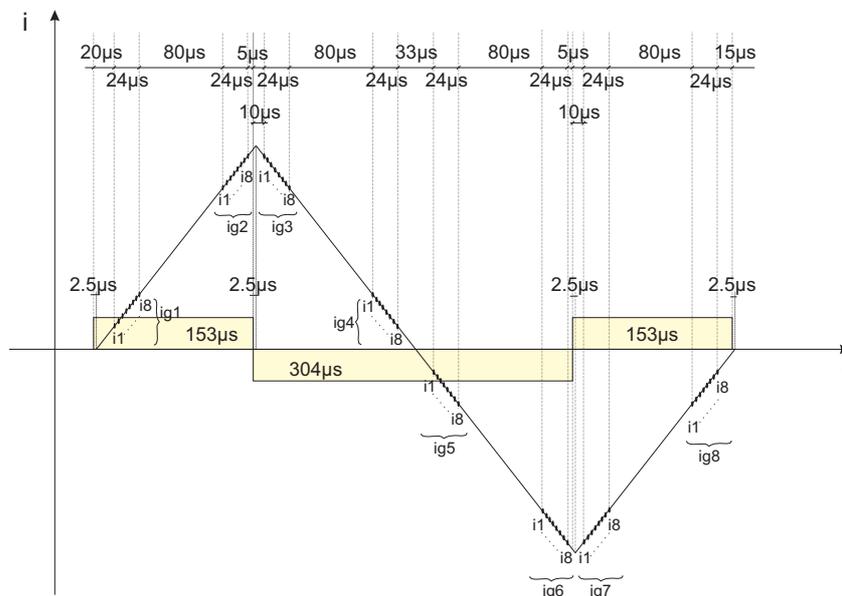


Abbildung 7.17: Die INFORM-Schussesequenz im Hochsetzbetrieb. Die Schusszeiten müssen entsprechend der höheren Zwischenkreisspannung verkürzt werden.

7.3.1 Ungefilterte Strommessung im Hochsetzbetrieb

Auch im Hochsetzbetrieb wird mit denselben Mitteln wie im Diodenbetrieb der Fehlerwinkel der Startposition bestimmt und untersucht. Hier sollen zum Vergleich die entsprechenden Bilder gezeigt werden, in denen der netzseitige Umrichter als Pulsrichter betrieben wird.

Die Normalverteilung (Abbildung 7.19) der Abweichung hat im unkorrigierten Fall eine ähnliche Standardabweichung wie die unkorrigierte, nicht gefilterte Strommessung im

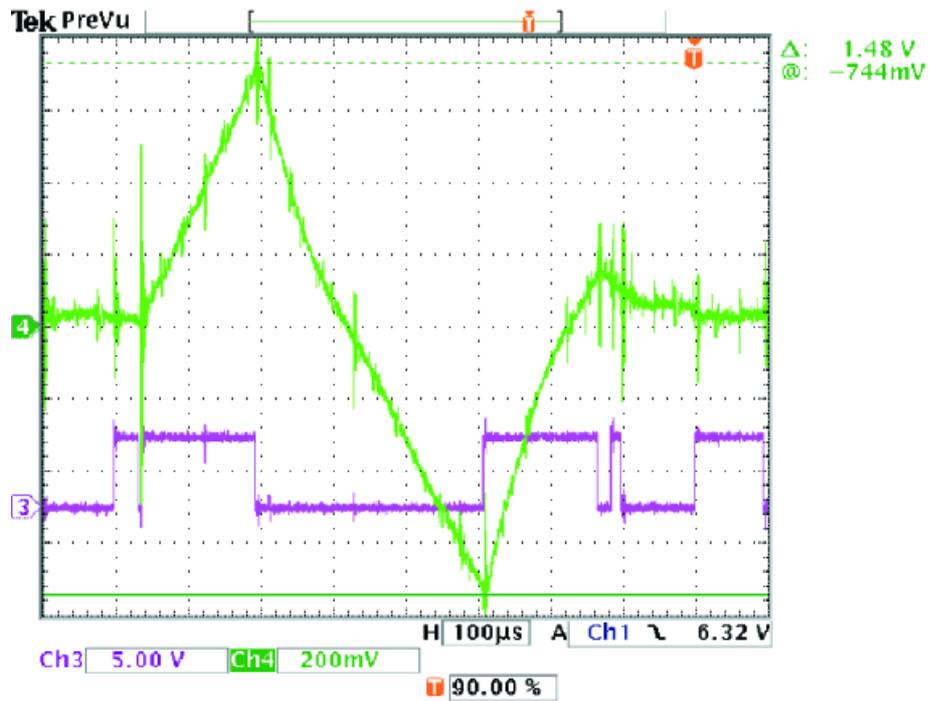


Abbildung 7.18: INFORM-Schuss im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung
 CH3 Ansteuersignal Phase U
 CH4 Strom Phase U; 186A/Div

Diodenbetrieb. Ebenso weist die Korrekturfunktion (Abbildung 7.20) erwartungsgemäß einen ähnlichen Verlauf auf. Die Koeffizienten der Korrekturfunktion bei der Strommessung ohne Butterworthfilter sind:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= -0.6112 & -0.02716HE \\
 a_1 &= 1.996 & 0.08871HE \\
 a_2 &= -7.665 & -0.34066HE
 \end{aligned}$$

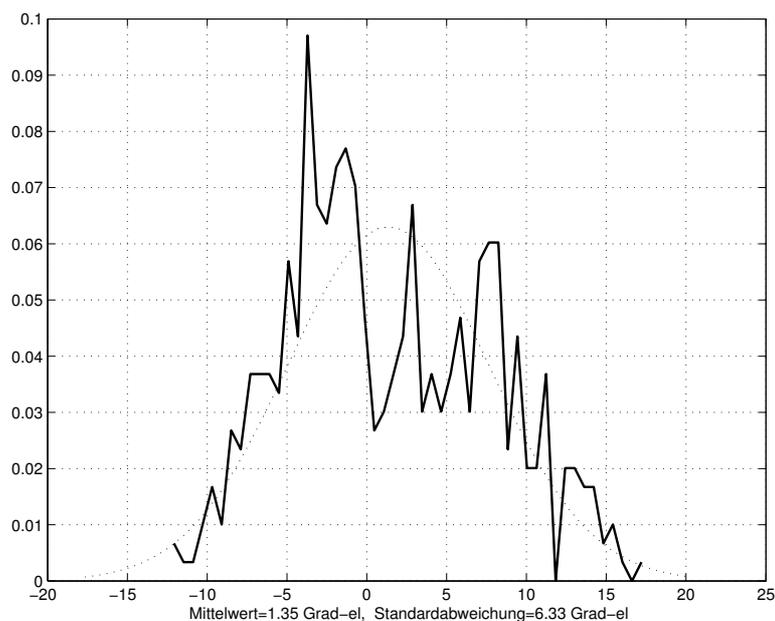


Abbildung 7.19: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung, unkorrigiert

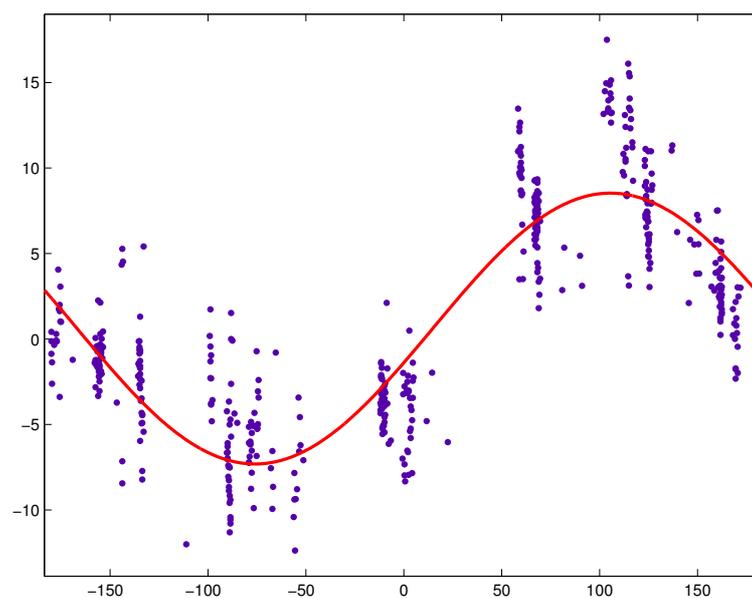


Abbildung 7.20: Korrekturfunktion der ungefilterten Strommessung im Hochsetzbetrieb

Die korrigierten Ergebnisse der ungefilterten Strommessung im Hochsetzbetrieb sind in den folgenden beiden Abbildungen wiedergegeben. Die Standardabweichung im Hochsetzbetrieb bewegt sich im selben Wertebereich, wie die Standardabweichung im Diodenbetrieb. In beiden Fällen ist das Ergebnis der Startposition mittels INFORM-Methode sehr gut. Nur in einzelnen Fällen tritt eine Abweichung des korrigierten INFORM-Winkels von maximal 12 Grad auf.

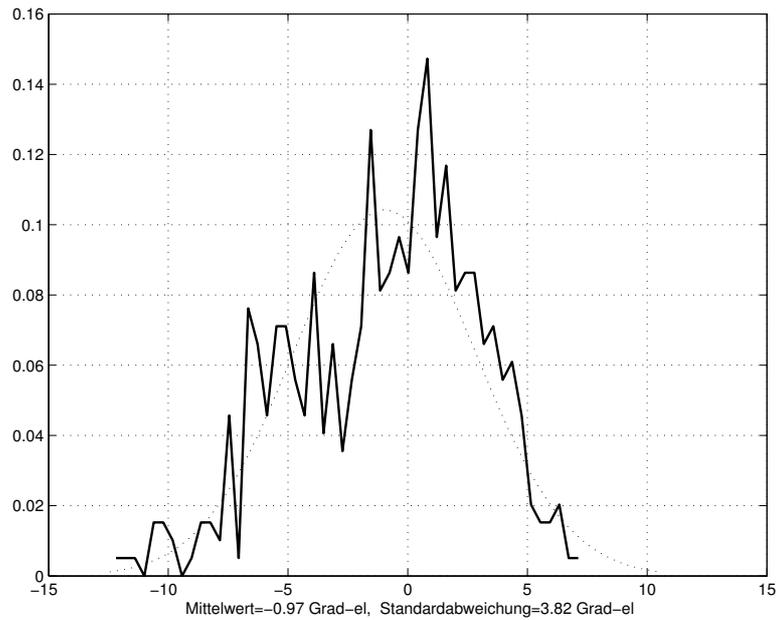


Abbildung 7.21: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung, korrigiert

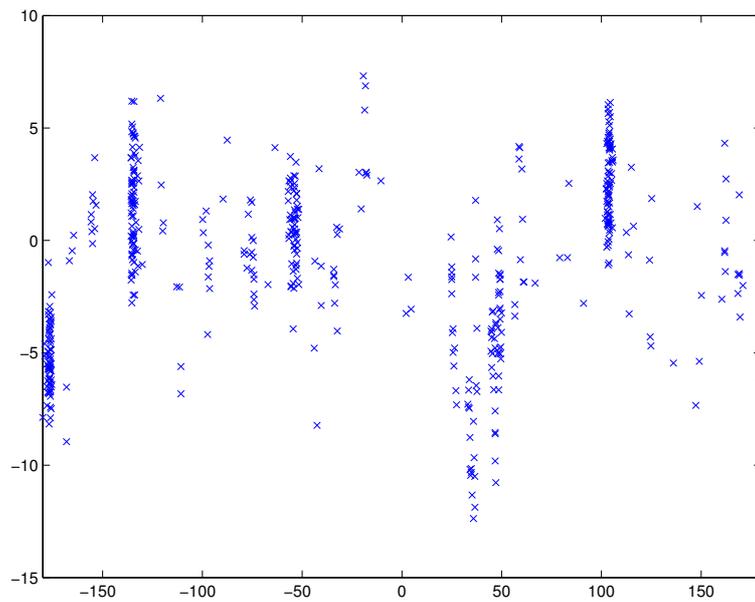


Abbildung 7.22: Fehler der ermittelten Startposition im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung, korrigiert
x-Achse: Startposition y-Achse: Winkelfehler

7.3.2 Strommessung mit Butterworthfilter im Hochsetzbetrieb

Für die Anfangspositionsbestimmung, mittels der gefilterten Strommessung wird zunächst dieselbe INFORM-Schusssequenz, wie im ungefilterten Fall (Abbildung 7.17) herangezogen. Allerdings bringt die Messung durch das Butterworthfilter eine zeitliche Verschiebung mit sich, die auch durch die Messzeitpunkte im Stromanstieg der INFORM-Sequenz berücksichtigt werden muss, weshalb die Messzeit $\Delta\tau$ um $8\mu\text{s}$ auf $72\mu\text{s}$ verkürzt wird (Abbildung 7.23). Die Abbildung 7.24 stellt die Stromverläufe der ungefilterten und gefilterten Strommessung gegenüber. Die Auflösungen sind so angepasst, dass beide Schussformen exakt vergleichbar sind. Die Zeitverzögerung der Strommessung mit Filter (CH3) ist deutlich zu sehen.

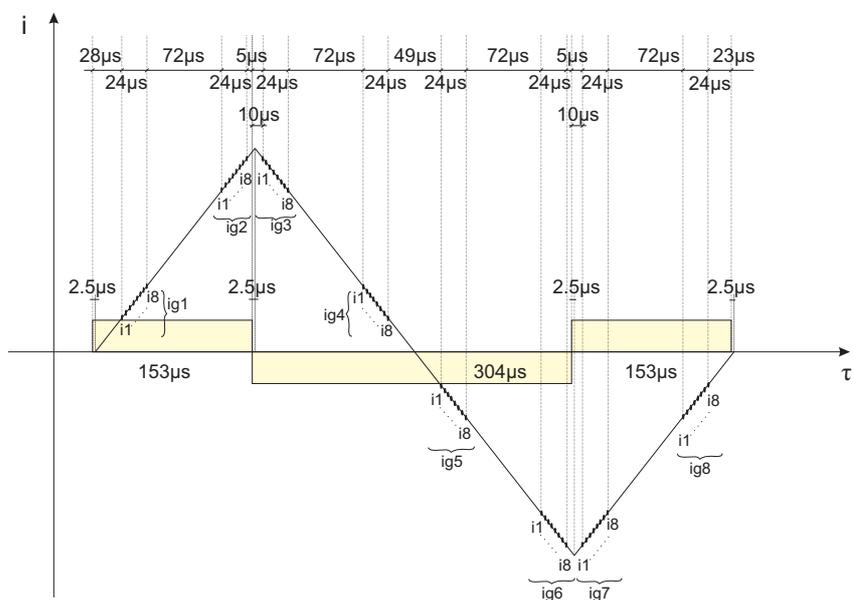


Abbildung 7.23: INFORM-Schusssequenz mit gefilterter Strommessung im Hochsetzbetrieb

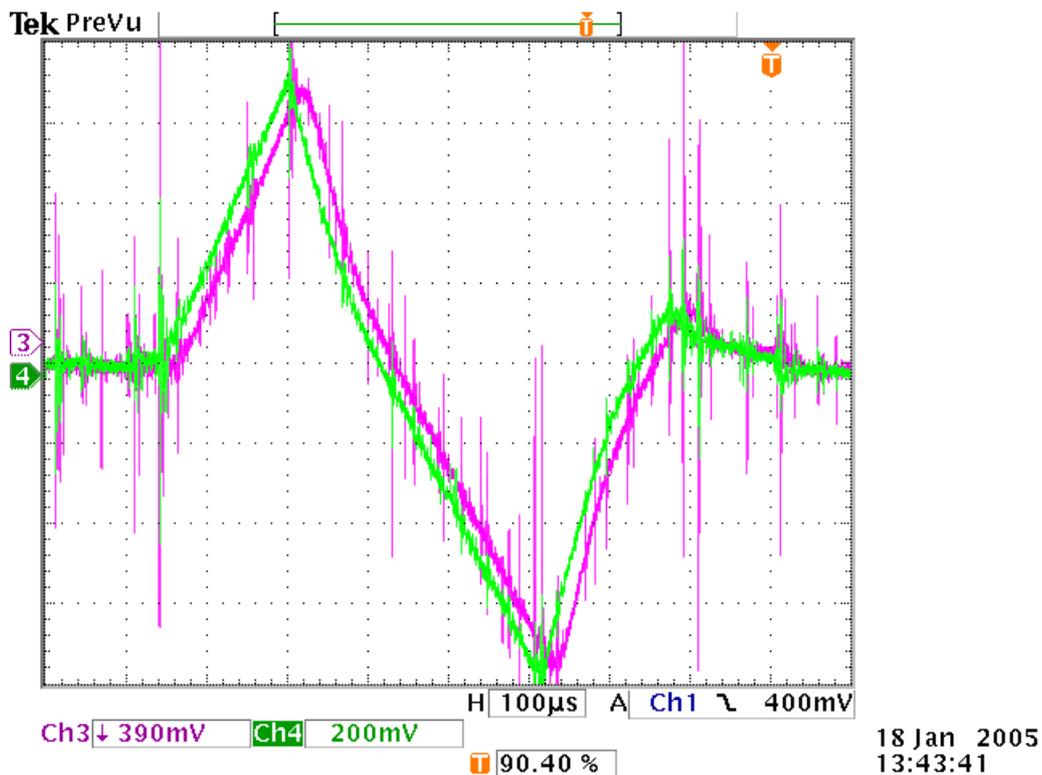


Abbildung 7.24: INFORM-Schüsse im Vergleich. Hochsetzbetrieb mit ungefilterter und gefilterter Strommessung

CH3 Stromverlauf mit gefilterter Strommessung; 186A/Div

CH4 Stromverlauf mit ungefilterter Strommessung; 186A/Div

Die unkorrigierte Anfangspositionsbestimmung hat bei der statistischen Auswertung eine Standardabweichung von 14.37 Grad. Mit Hilfe der Korrekturfunktion kann die Standardabweichung auf knapp 5 Grad gesenkt werden. In dieser Weise stellt auch die Strommessung mit Butterworthfilter ein zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich der Ermittlung der Startposition im sensorlosen Betrieb dar.

Die Koeffizienten der Korrekturfunktion bei der Strommessung mit Butterworthfilter sind:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0.8016 & 0.03562HE \\
 a_1 &= 6.627 & 0.29453HE \\
 a_2 &= 12.29 & 0.54622HE
 \end{aligned}$$

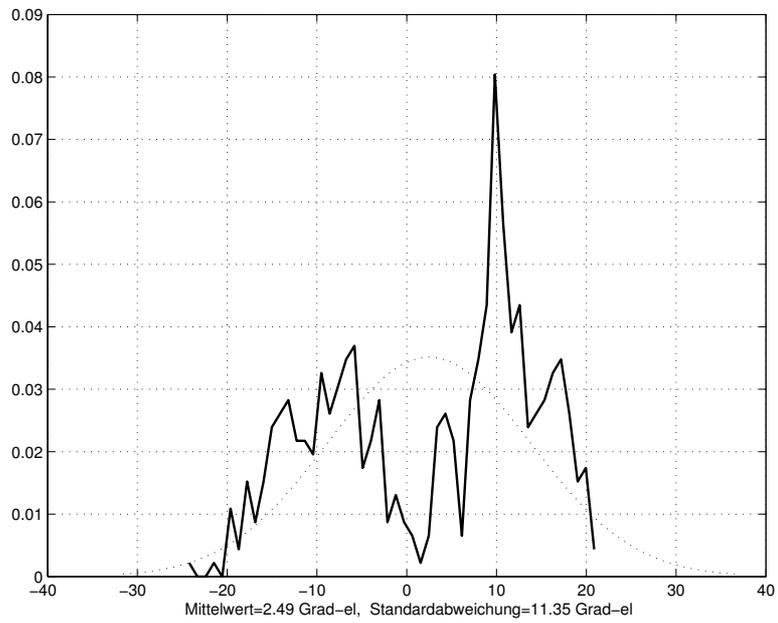


Abbildung 7.25: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung, unkorrigiert

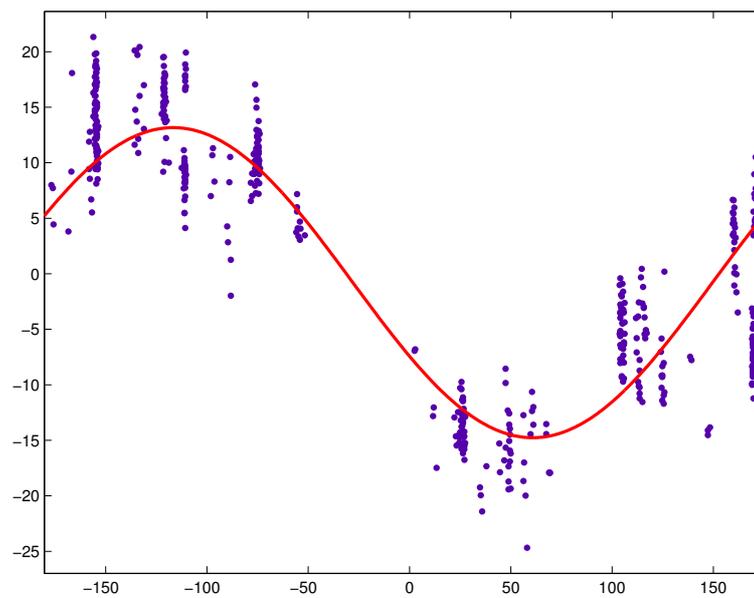


Abbildung 7.26: Korrekturfunktion der gefilterten Strommessung im Hochsetzbetrieb

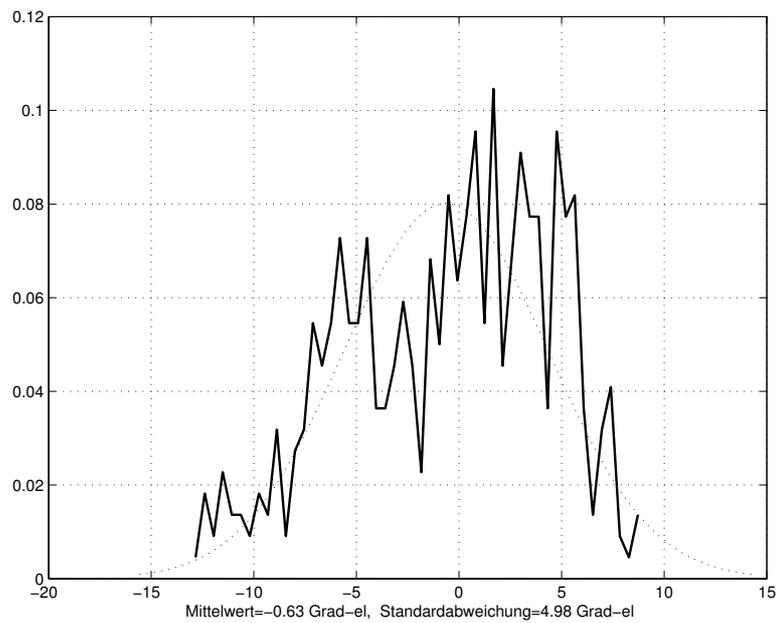


Abbildung 7.27: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung, korrigiert

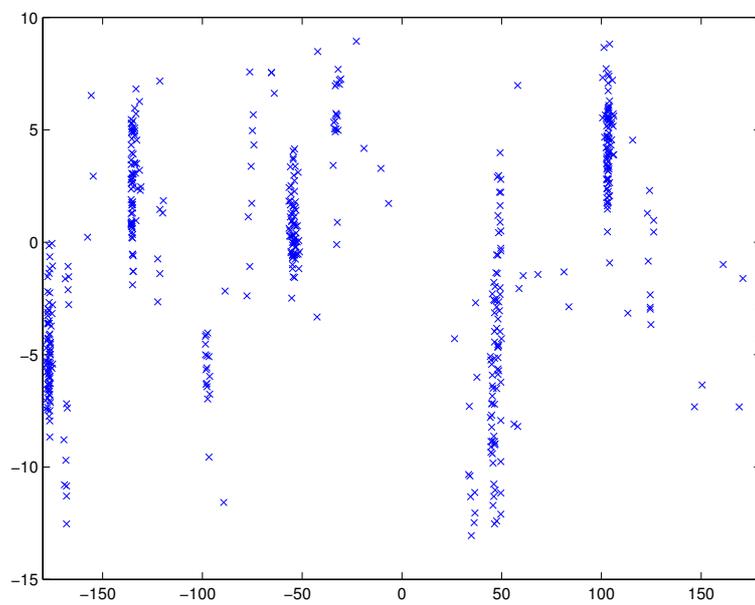


Abbildung 7.28: Fehler der ermittelten Startposition im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung, korrigiert
x-Achse: Startposition y-Achse: Winkelfehler

8 Anfangswinkelbestimmung – Zusammenfassung

In den letzten Kapiteln ist die Startposition mit Hilfe der Großsignal-INFORM-Methode bestimmt und statistisch erfasst worden. Im Folgenden sind die Ergebnisse tabellarisch nochmal zusammengefasst und veranschaulicht. Die Messreihen entstanden alle unter denselben Bedingungen. Die Stromsensoren der gefilterten Strommessung sind hinsichtlich ihrer physikalischen Lage zwischen den Messungen nicht verändert worden.

Messung	Mittelwert	Standardabweichung
Diodenbetrieb:		
ungefilterte Strommessung, ohne Korrekturfunktion	0,48	7,63
ungefilterte Strommessung, mit Korrekturfunktion	0,15	3,24
Strommessung mit Butterworthfilter, ohne Korrekturfunktion	0,97	8,25
Strommessung mit Butterworthfilter, mit Korrekturfunktion	0,41	3,48
Hochsetzbetrieb:		
ungefilterte Strommessung, ohne Korrekturfunktion	1,35	6,33
ungefilterte Strommessung, mit Korrekturfunktion	-0,97	3,82
Strommessung mit Butterworthfilter, ohne Korrekturfunktion	2,49	11,35
Strommessung mit Butterworthfilter, mit Korrekturfunktion	0,63	4,98

Tabelle 8.1: Standardabweichungen und Mittelwerte bei verschiedenen Umrichterbetriebsfällen, jeweils mit ungefilterter Strommessung und Strommessung mit Butterworthfilter

Da die Messungen denselben Bedingungen unterliegen, werden nun noch die magnetischen Eigenschaften der Maschine untersucht. Um eine eventuelle Achsigkeit der Maschine feststellen und bestimmen zu können, werden im ungefilterten Diodenbetrieb Vergleichsmessungen durchgeführt in denen die Reihenfolge der Motorphasen zyklisch getauscht wird. Aus der Abbildung 8.1 geht hervor, dass die Phasenlage der Fehlerwinkelfunktion unabhängig von der Reihenfolge der Phasen ist. Dementsprechend stellt die Phasenfolge auch keinen wesentlichen Einfluss auf die Korrekturfunktion dar. Ein äquivalentes Ergebnis ergibt sich auch bei einem Phasentausch im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung und externen LEMs.

In einem weiteren Schritt soll noch die physikalische Lage der Stromsensoren während der Messwerterfassung betrachtet werden. Da die Lage der internen

Umrichterstromsensoren fix vorgegeben ist, bleibt nur die Möglichkeit die externen Stromsensoren für die Untersuchung der örtlichen Lage der Sensoren heranzuziehen. Aus diesem Grund werden die externen Stromsensoren an die TU-Strommessung angeschlossen, um die Messungen im ungefilterten Betrieb durchführen zu können. An die TU-Strommessung sind normalerweise die internen Umrichter-LEMs angeschlossen. Bei der Auswertung der Ergebnisse stellt sich heraus, dass sich die Stromsensoren erheblich gegenseitig beeinflussen und daher ihre räumliche Lage eine wesentliche Rolle für die Bestimmung einer Korrekturfunktion darstellt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass wenn die Stromsensoren im Umrichterschrank eine feste Position einnehmen, eine Korrekturfunktion gefunden werden kann, die sich über die Zeit hinweg gleichbleibend verhält.

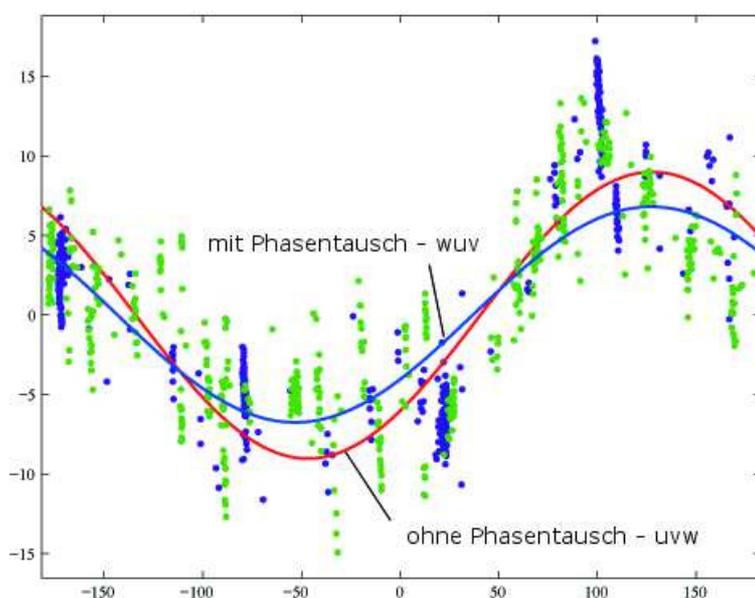


Abbildung 8.1: Vergleich der Korrekturfunktionen im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung

Ein Rezept für die Bestimmung der Anfangslage des Rotors kann hier nicht gegeben werden. Werden zur sensorlosen Ermittlung der Startposition Korrekturfunktionen herangezogen, dann kann ausgehend von den Ergebnissen in Tabelle 8.1 kein Betriebsfall bevorzugt werden. Die Rotorlage kann sowohl bei netzseitigen Diodenbetrieb, als auch bei netzseitigen Hochsetzbetrieb mit gleicher Genauigkeit bestimmt werden, wobei zwischen ungefilterter und gefilterter Strommessung wenig Unterschied besteht.

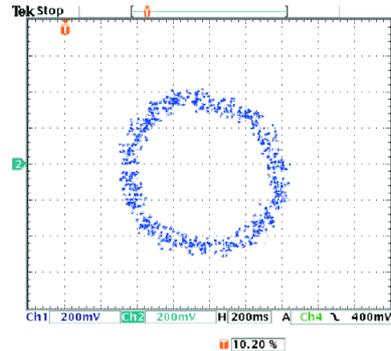
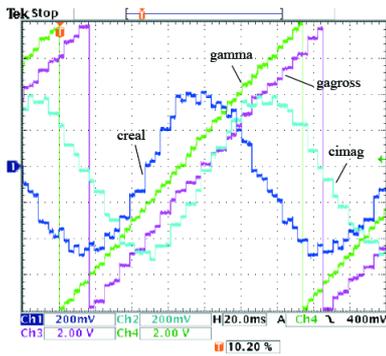
Bei der Positionsbestimmung des Rotors mittels der ungefilterten Strommessvariante ohne Korrekturfunktion besteht zwischen Diodenbetrieb und Hochsetzbetrieb des Umrichters kein großer Unterschied in der Abweichung von der tatsächlichen Anfangslage des Rotors. Steht für die Winkelbestimmung nur eine Strommessung

mit Butterworthfilter zur Verfügung, würde es sich anbieten die Startposition im Diodenbetrieb zu ermitteln und erst anschließend in den Hochsetzbetrieb zu wechseln.

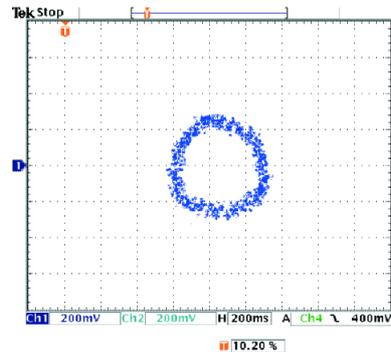
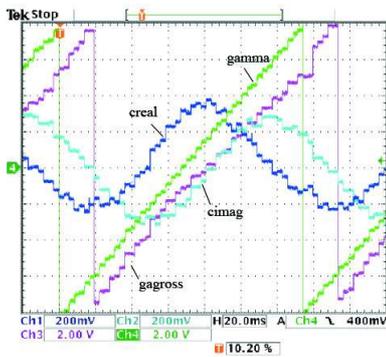
Weiterführend zur Positionsbestimmung im Stillstand und der nachfolgenden Lageerfassung mittels Kleinsignal-INFORM ist dem Stromregler ein Drehzahlregler überlagert worden, um das Verhalten der INFORM-Messung auch bei Drehzahlen betrachten und beurteilen zu können. Zu diesem Zweck ist es notwendig den Lagewinkel und die aktuelle Drehzahl zu kennen. Dazu wird ein Beobachter benötigt, dessen Struktur später noch genau erklärt wird.

Zur Veranschaulichung ist die INFORM-Auswertung im drehzahlgeregelten Betrieb für die in Kapitel 7.2 und Kapitel 7.3 behandelten Betriebsfälle in nachstehenden Abbildungen wiedergegeben. Es ist der zeitliche Verlauf der beiden INFORM-Größen $creal$ und $cimag$, sowie der INFORM-Rohwinkel $gagross$ im Vergleich zur elektrischen Lage $gamma$ dargestellt. Der Maschine wird eine konstante Drehzahl von $\omega = 0.05$ ($=250\text{min}^{-1}$) vorgegeben. Die beiden INFORM-Signale $creal$ und $cimag$ sind zueinander um 90° phasenverschoben. Bildet man das Argument aus den beiden Signalen, dann erhält man den INFORM-Winkel $gagross$. Die Ortskurve der INFORM-Auswertung bildet den sogenannten INFORM-Kreis. Die INFORM-Kurve an sich hat eine gewisse Streubreite, die wiederum ein Qualitätsmerkmal für die Winkelmessung darstellt. Wünschenswert ist eine möglichst geringe Streubreite und ein großer Radius.

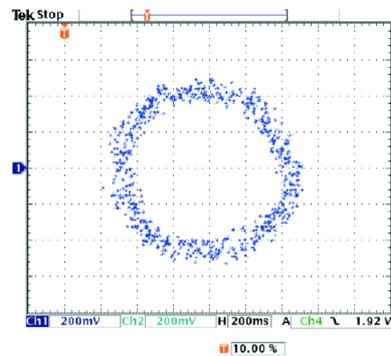
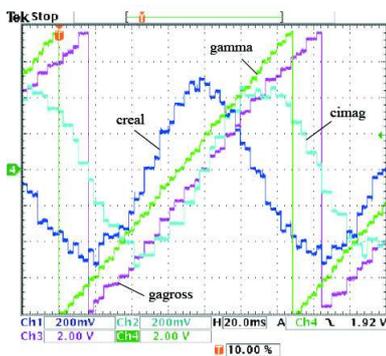
Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung



Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung, Butterworthfilter



Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung



Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung, Butterworthfilter

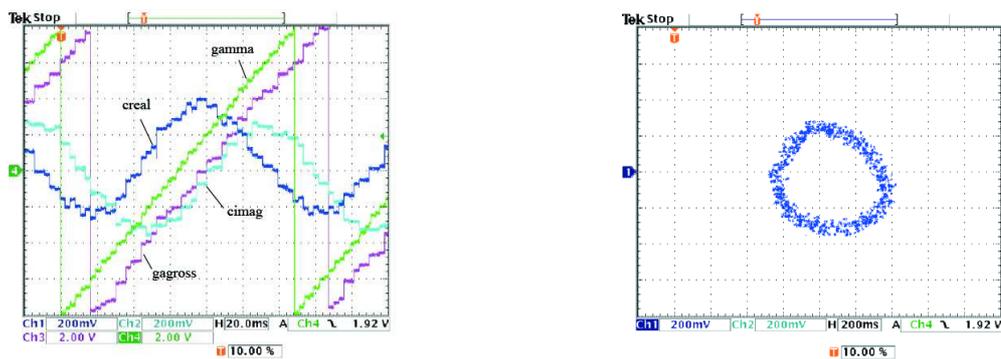


Abbildung 8.2: Auf der linken Seite der zeitliche Verlauf der INFORM-Größen creal, cimag und gagross. Im rechten Bild die INFORM - Ortskurve

Betrachtet man die INFORM-Kreise der ungefilterten Strommessungen, dann fällt auf, dass im Vergleich zur Strommessung mit Butterworthfilter der Radius der INFORM-Kreise bei gleicher Skalierung wesentlich größer ist.

9 Sensorlose Lageerfassung bei tiefen Drehzahlen

Die Aufgabe bisher war, die Rotorlage im Stillstand der Maschine zu bestimmen und zu erkennen. In weiterer Folge soll das INFORM-Modell der sensorlosen Lageerfassung auch auf den drehzahlgeregelten Antrieb, vor allem im Bereich kleiner Drehzahlen angewandt werden. Zu diesem Zweck wird dem Stromregler eine Drehzahlregelung überlagert, die es ermöglicht die Maschine mit beliebiger Drehzahl zu betreiben. Die Drehzahlregelung benötigt neben der Solldrehzahl auch die Istdrehzahl. Die Istdrehzahl wird mit Hilfe eines Beobachters ermittelt. Hierbei wird aus der Lageinformation ein für die Drehzahlregelung geeignetes Signal berechnet.

9.1 Drehzahlbeobachter

Der Drehzahlbeobachter ist in zahlreichen Werken bereits genauestens behandelt worden und soll hier nur kurz in seiner Funktion mathematisch beschrieben werden [3] [4]. Der Beobachter wird durch ein mathematisches Modell in Form der Zustandsgleichung beschrieben [10]. Die Zustandsgrößen werden mit sogenannten Kalmanfaktoren gewichtet und korrigiert. In die mathematische Beschreibung ist zusätzlich eine Schätzung des Lastmomentes miteinbezogen, das für eine Störgrößenaufschaltung verwendet werden kann. Die Lastmomentenaufschaltung wird jedoch programmtechnisch später nicht umgesetzt.

Die mathematische Struktur des Beobachters lautet:

$$\begin{bmatrix} \omega(k+1) \\ \gamma(k+1) \\ m_L(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\tau_A}{\tau_m} \\ \tau_A & 1 & \frac{\tau_A^2}{2 \cdot \tau_m} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \gamma(k) \\ m_L(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tau_A}{\tau_m} \\ \frac{\tau_A^2}{2 \cdot \tau_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot m_i(k) \quad (9.1)$$

Prädiktionsmodell mit $i_{q,ist}=m_i$, also $|\psi_M|=1$

$$\begin{bmatrix} \omega^*(k+1) \\ \gamma^*(k+1) \\ m_L^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\tau_A}{\tau_m} \\ \tau_A & 1 & \frac{\tau_A^2}{2 \cdot \tau_m} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{\gamma}(k) \\ \hat{m}_L(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tau_A}{\tau_m} \\ \frac{\tau_A^2}{2 \cdot \tau_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i_{q,ist}(k) \quad (9.2)$$

Die folgende einfache Version wird schlussendlich umgesetzt, wobei auf die Schätzung des Lastmoments, als auch auf den additiven Term zufolge des inneren Moments m_i verzichtet wird.

$$\begin{bmatrix} \omega^*(k+1) \\ \gamma^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau_A & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{\gamma}(k) \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

Das Korrekturmodell, welches für die sensorlose INFORM-Regelung verwendet wird:

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{\gamma}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega^*(k) \\ \gamma^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} kal1_{inf} \\ kal2_{inf} \end{bmatrix} \cdot \left(\gamma_{inf}(k) - \begin{bmatrix} 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega^*(k) \\ \gamma^*(k) \end{bmatrix} \right) \quad (9.4)$$

9.2 Die INFORM-Sequenz

Die angewendete Schussform im Bereich kleiner Drehzahlen unterscheidet sich von der Schussform im Stillstand in der Weise, dass die Schussesequenz aus einem Vorschuss, zwei Hauptschüssen und einem Nachschuss besteht (Abbildung 9.1). Weiters wird die Schussesequenz nach einem erfolgten Schuss in alle drei Phasen u,v,w (d.h. nach drei Abtastschritten) in ihrem Vorzeichen geändert. Die Auswertung des INFORM-Winkels erfolgt demnach erst nach sechs Abtastschritten, nachdem in allen drei Strängen zweimal mit jeweils unterschiedlicher Polarität ein INFORM-Schuss durchgeführt wurde. Die Auslenkung der Kleinsignal-INFORM-Sequenz ist wesentlich kleiner angesetzt, im Vergleich zur Großsignal-INFORM-Sequenz.

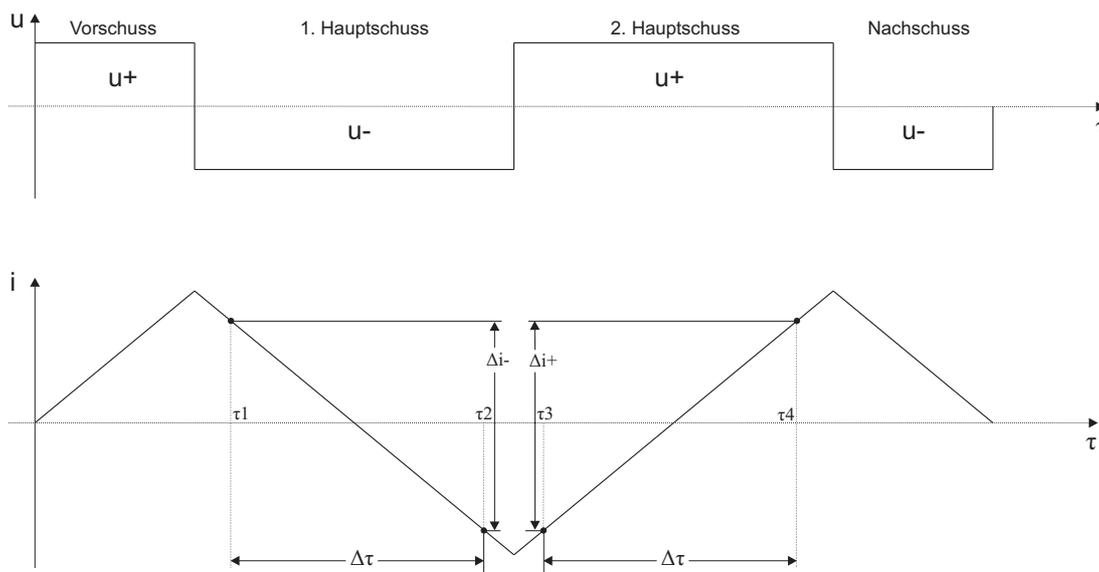


Abbildung 9.1: Prinzipielle Schussform der sensorlosen Lageerfassung bei tiefen Drehzahlen.

Generell sind auch bei der Schussform nach Abbildung 9.1 nur zwei einzelne Strommessungen in einem Anstieg notwendig. Um auch hier den Fehler einer Einzelstrommessung zu minimieren, wird die Mittelwertbildung $i_{g1} - i_{g8}$ über vier schnell aufeinander folgende Strommessungen vorgenommen. Die optimale Anzahl von vier Strommesswerten ist durch die Auswertung der Standardabweichung unterschiedlicher Anzahl von Strommesswerten hervorgegangen.

Nachfolgend werden die detaillierten INFORM-Sequenzen, sowie die Ergebnisse der Winkelbestimmung für den Diodenbetrieb, als auch für den Hochsetzbetrieb, jeweils mit beiden Strommessvarianten beschrieben.

9.3 Umrichter im Diodenbetrieb

9.3.1 Ungefilterte Strommessung

Der INFORM-Schuss im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung ist hinsichtlich seiner Schusszeiten so ausgelegt, dass der Schuss eine maximale Auslenkung von ungefähr 190A erreicht. Die im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung verwendete INFORM-Sequenz mit ihren Schuss- und Messzeiten ist in Abbildung 9.2 wiedergegeben. Der Stromverlauf der Kleinsignal-INFORM-Sequenz in einem Strang ist in Abbildung 9.3 dargestellt. Die programmtechnische Ausführung ist im Programmlisting im Anhang B.1 genau dokumentiert.

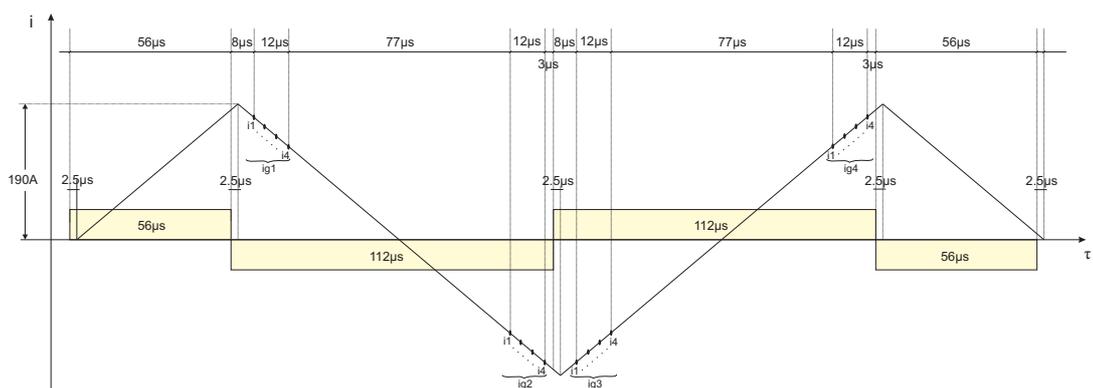


Abbildung 9.2: Die INFORM-Sequenz für den Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung. Die Abbildung zeigt auch die Mittelung über vier aufeinanderfolgende Strommesswerte.

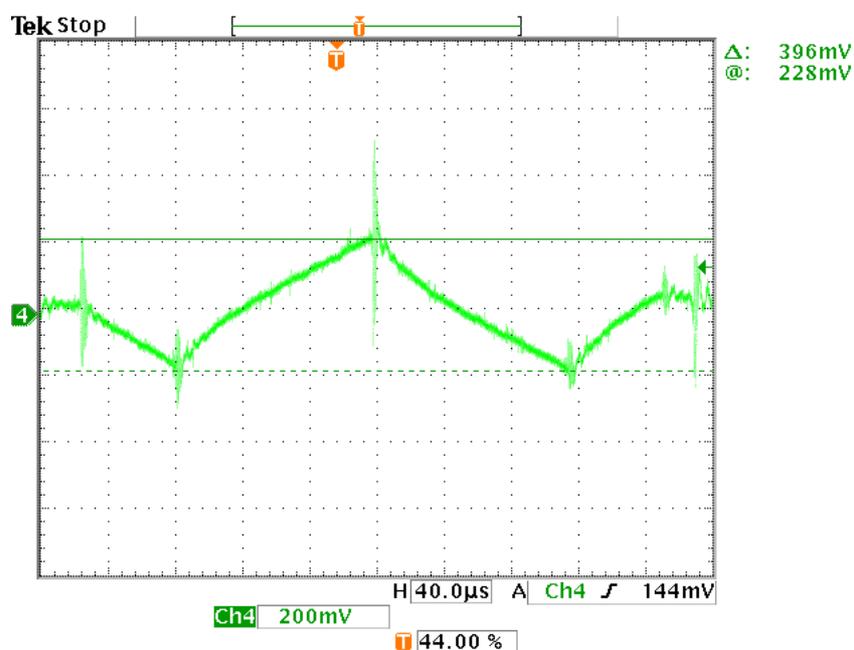


Abbildung 9.3: INFORM-Schuss im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung
 CH3 Ansteuersignal Phase U
 CH4 Strom Phase U; 186A/Div

Die Bestimmung der Rotorlage und der Abweichung des INFORM-Winkels erfolgt bei zwei unterschiedlichen Betriebsfällen des Antriebs:

- konstante Drehzahl
- Drehzahlsprünge mit konstanter Beschleunigung

9.3.1.1 Fehler des Modellwinkels bei konstanter Drehzahl

Der Antrieb wird zunächst drehzahl geregelt mit konstanter Drehzahl betrieben, wobei der Winkelfehler über 10000 Abtastschritten ($\hat{=} 10000$ Messwerten) erfasst und anschließend nach denselben statistischen Methoden wie in Kapitel 7.2.1 ausgewertet und bewertet wird. Die Abbildung 9.4 zeigt den INFORM-Rohwinkel arg und den doppelten Lagegeberwinkel $zgamma$, sowie die beiden INFORM-Größen $creal$ und $cimag$. Die PSM wird mit einer konstanten Drehzahl von $\omega = 0.05$ ($=250\text{min}^{-1}$) vorangetrieben. Die Realteilauswertung der beiden Signale $creal$ und $cimag$ nach Kapitel 6.2 liefert den INFORM-Winkel arg . Der INFORM-Kreis (Abbildung 9.5) ist in dem Bild nicht zu erkennen, bestenfalls kann die Ansammlung von Punkten als Verkettung von drei Kreisen gedeutet werden. Die Tatsache, dass der INFORM-Kreis nicht existiert, lässt darauf schließen, dass die Abweichung des Modellwinkels zum Absolutlagegeber sehr groß ist und die INFORM-Auswertung im drehzahl geregelten Betrieb keine ausreichend genaue Aussage über die aktuelle Rotorlage bereitstellen kann.

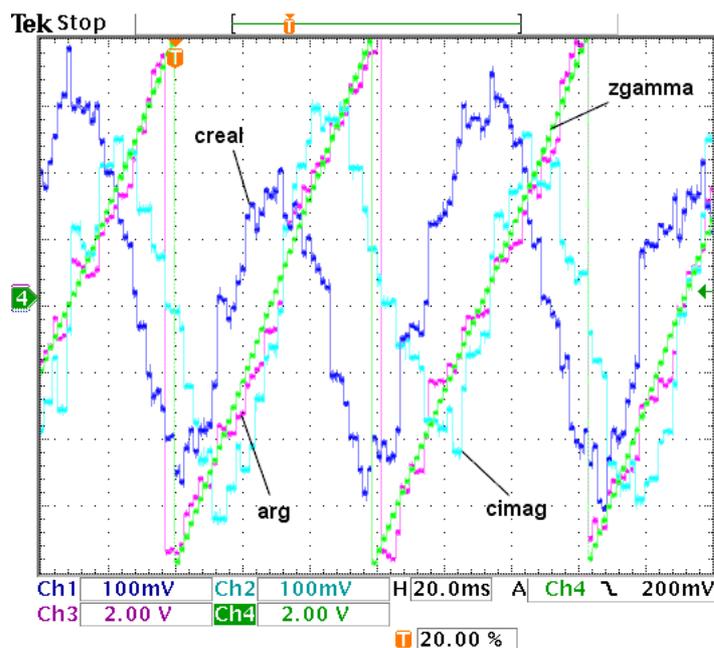


Abbildung 9.4: Maschine drehzahl geregelt bei netzseitigen Umrichter im Diodenbetrieb und ungefilterter Strommessung

CH1 $creal$

CH2 $cimag$

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

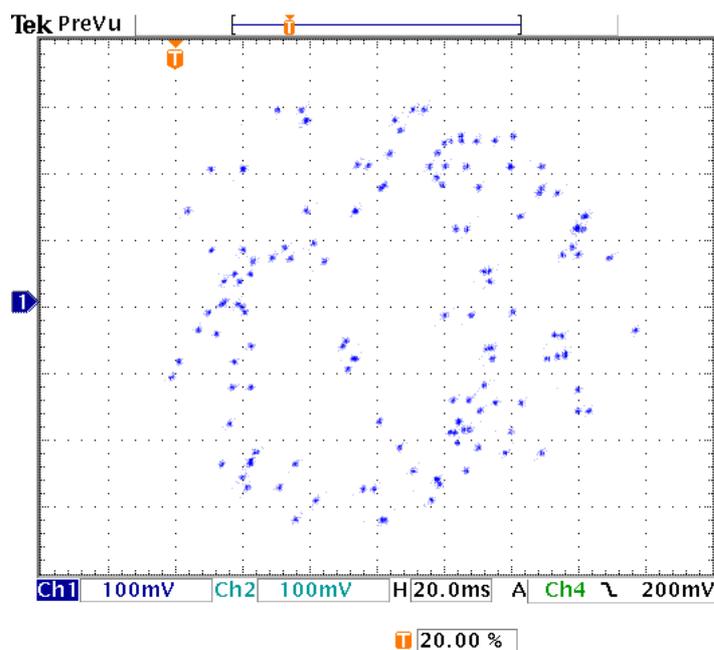


Abbildung 9.5: INFORM-Kreis im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung

Aus der statistischen Auswertung (Abbildung 9.6) der 10000 Messwerte folgt eine Standardabweichung von 6.78 Grad, wobei Winkelfehler von bis zu 24 Grad auftreten können (Abbildung 9.7).

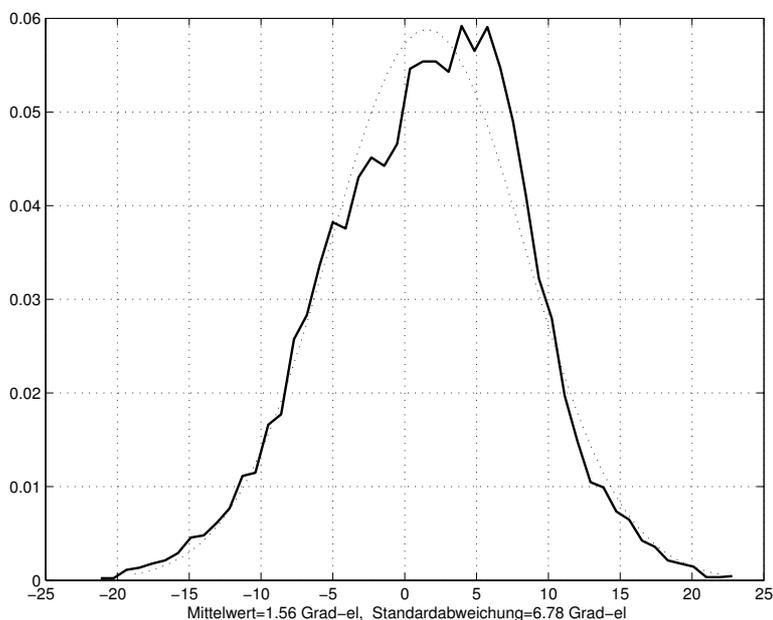


Abbildung 9.6: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl

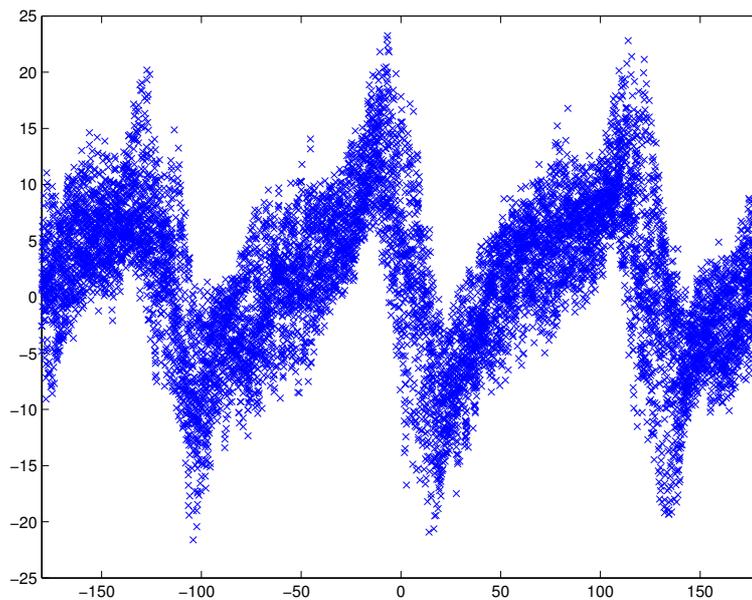


Abbildung 9.7: Fehlerwinkel im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.3.1.2 Fehler des Modellwinkels bei Drehzahlprüngen mit konstanter Beschleunigung

Der Antrieb wird mit einem konstanten Strom in q-Richtung solange beschleunigt, bis eine definierte Soll Drehzahl erreicht ist. Bei Erreichen der vorgegebenen Drehzahl wird das Vorzeichen des Betrags nach gleich bleibendem Strom in q-Richtung umgedreht, woraufhin der Antrieb in die entgegengesetzte Richtung bis zum Drehzahlendwert beschleunigt. Auf diese Weise wird die Drehrichtung immer wieder geändert und es stellt sich ein “toggelnder“ Betrieb ein. Die Abbildung 9.8 zeigt die INFORM-Größen $creal$, $cimag$, arg und den doppelten Lagegeberwinkel $zgamma$. Die statistische Auswertung bei Drehzahlprüngen mit konstanter Beschleunigung ergibt, dass die Standardabweichung (Abbildung 9.9) einen Winkel von knapp 8 Grad erreicht und vereinzelt Winkelabweichungen bis zu 28 Grad auftreten.

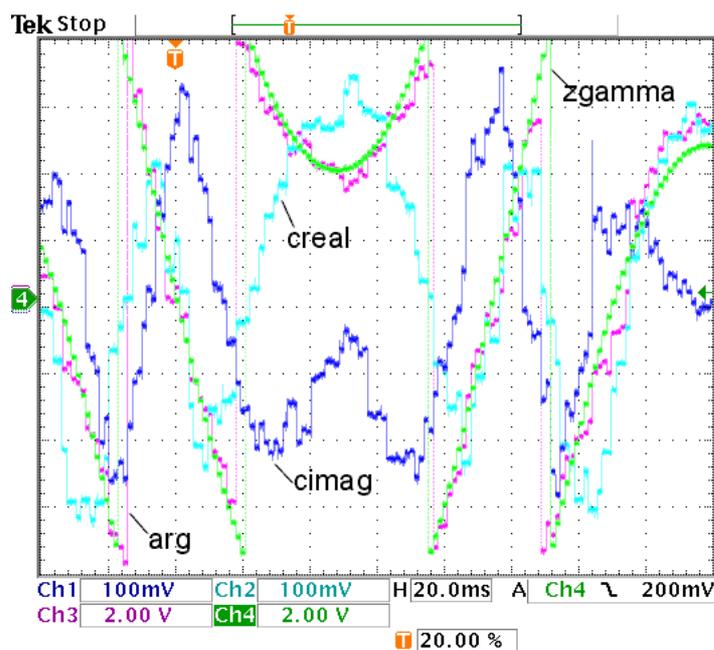


Abbildung 9.8: Zeitverlauf der INFORM-Größen mit netzseitigem Umrichter im Diodenbetrieb, ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

CH1 c_{real} CH2 c_{imag}
 CH3 INFORM-Rohwinkel arg CH4 doppelter Lagegeberwinkel

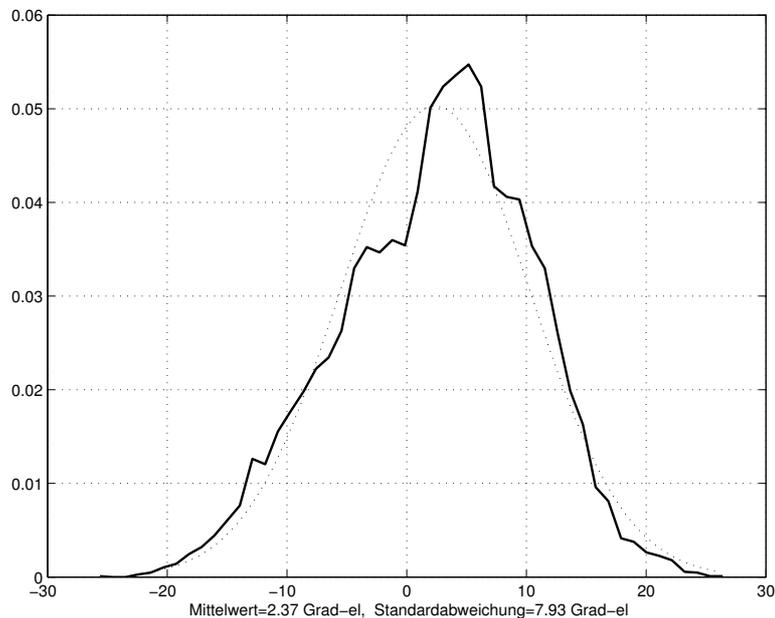


Abbildung 9.9: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

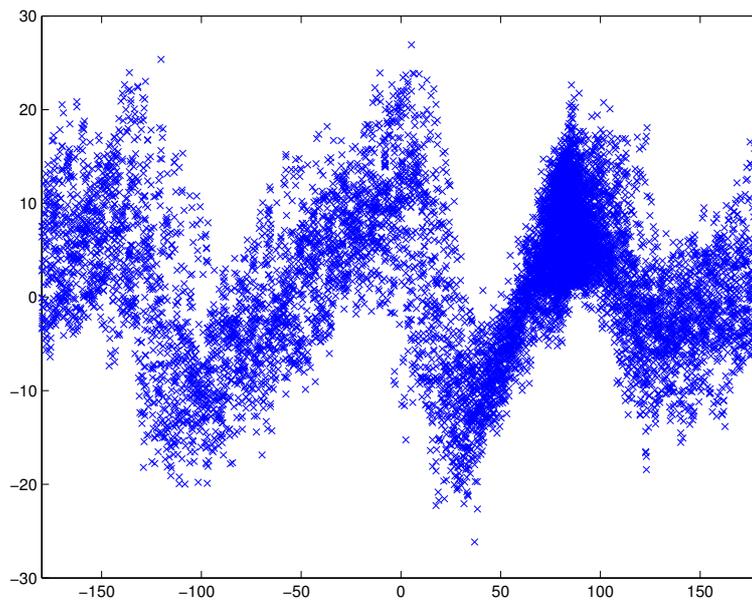


Abbildung 9.10: Fehlerwinkel im Diodenbetrieb mit ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb
 x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.3.2 Strommessung mit Butterworthfilter

Da die Messung durch das Butterworthfilter eine zeitliche Verschiebung mit sich bringt, muss die INFORM-Sequenz für die sensorlose Lagebestimmung mit gefilterter Strommessung hinsichtlich der Schuss- und Messzeiten verändert werden. Die angepasste Schusssequenz für die Strommessung mit Butterworthfilter im Diodenbetrieb des Umrichters ist in Abbildung 9.11 wiedergegeben.

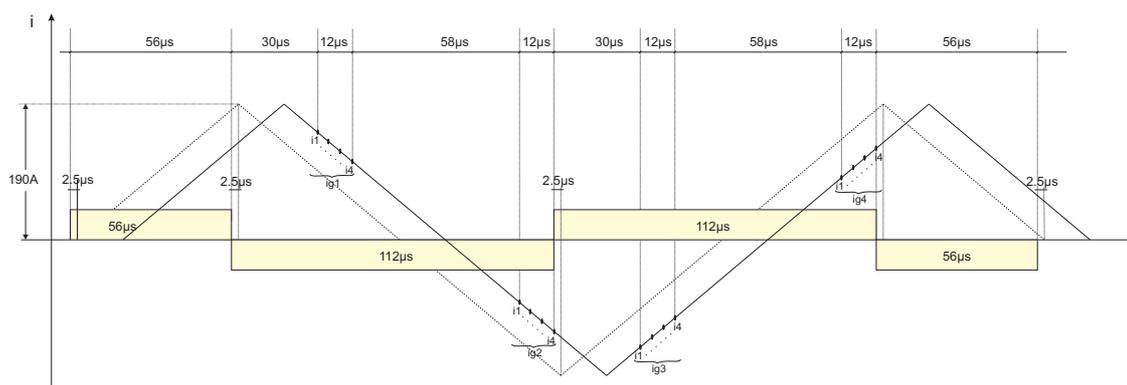


Abbildung 9.11: Die INFORM-Sequenz für den Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung

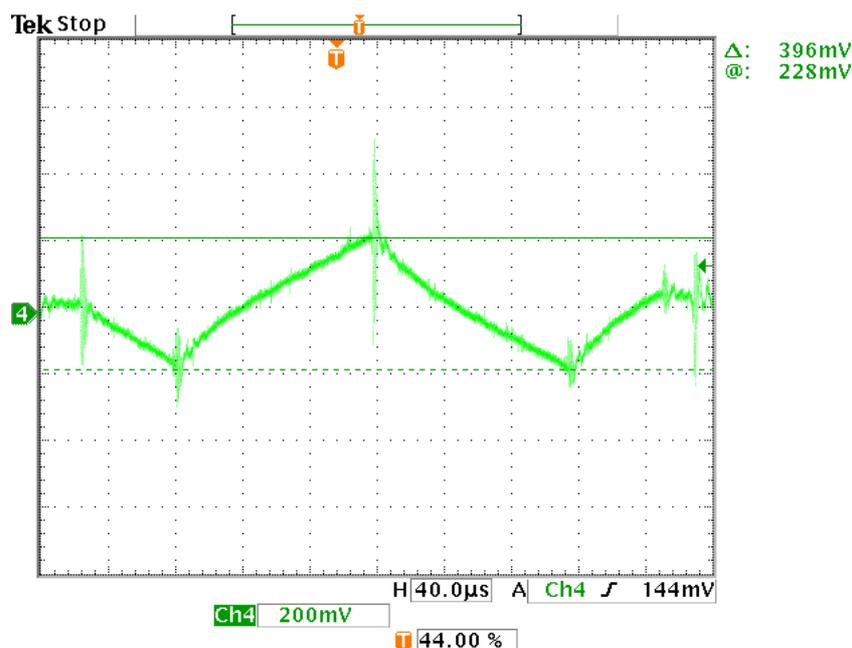


Abbildung 9.12: Stromverlauf der INFORM-Schussesequenz im Diodenbetrieb für einen Strang mit gefilterter Strommessung
CH4 Strom Phase U; 96A/Div

9.3.2.1 Fehler des Modellwinkels bei konstanter Drehzahl

Die Messreihen sind alle unter denselben Bedingungen erstellt worden, um nachher die Ergebnisse direkt vergleichen zu können. Die konstante Drehzahl von $\omega = 0.05$ ($=250\text{min}^{-1}$) ist daher gleich geblieben. Der Winkelfehler wird diesmal mit der gefilterten Strommessung erneut über 10000 Messwerte erfasst und statistisch ausgewertet. Betrachtet man das Bild mit dem zeitlichen Verlauf der Modellgrößen 9.13 und genauso den INFORM-Kreis (Abbildung 9.14), dann stellt man fest, dass der Modellwinkel arg dem Lagegeberwinkel schon im Zeitverlauf, bei der kleinen Drehzahl von $\omega = 0.05$ sehr schwer zu folgen vermag. Der INFORM-Kreis weist eine ähnliche Punktwolke auf, wie im ungefilterten Betrieb und ist zusätzlich hinsichtlich des Durchmessers kleiner geworden.

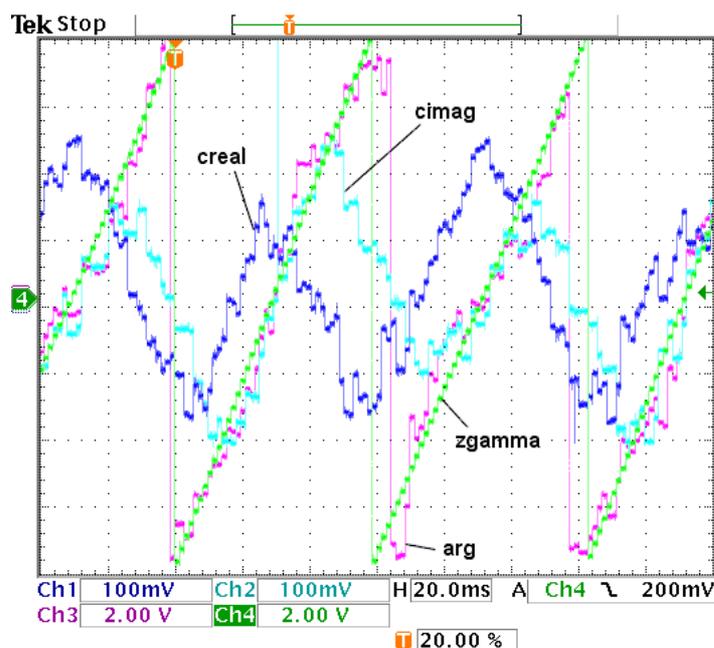


Abbildung 9.13: Zeitverlauf der INFORM-Größen bei Drehzahlregelung im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung

CH1 c_{real}

CH2 c_{imag}

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

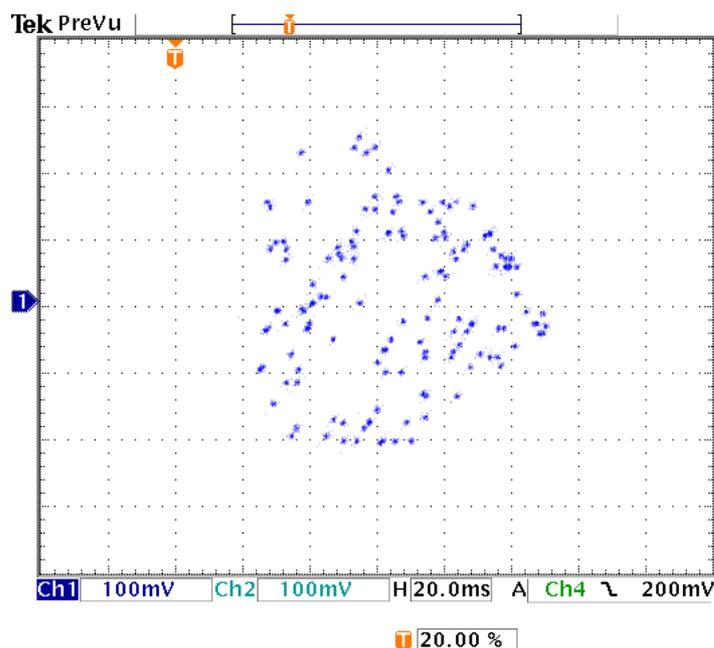


Abbildung 9.14: INFORM-Kreis im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung

Der Standardabweichung nach, als auch der Abweichung mancher Messpunkte verteilt über den Rotorwinkel zu urteilen, hat sich der Fehler im ungefilterten Betrieb vergrößert. Die Normalverteilung (Abbildung 9.15) der statistischen Auswertung

ergibt eine Standardabweichung von 9.47 Grad. Über den Rotorwinkel verteilt sind Abweichungen des Modellwinkels bis zu 30 Grad möglich.

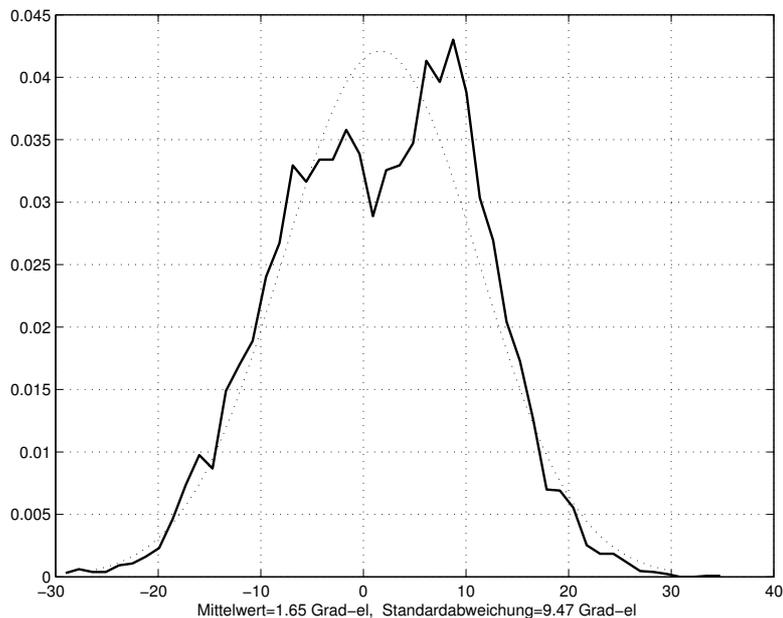


Abbildung 9.15: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl

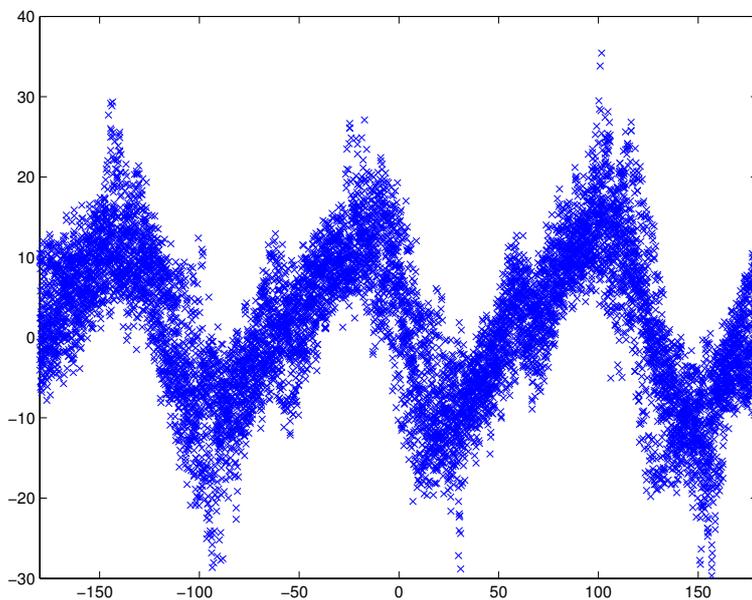


Abbildung 9.16: Fehlerwinkel im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.3.2.2 Fehler des Modellwinkels bei Drehzahlprüngen mit konstanter Beschleunigung

Im togelnden Betrieb mit einem Strom in q-Richtung von $i_q = 0.3$ verschlechtern sich die Ergebnisse der INFORM-Messung hinsichtlich der Standardabweichung zwar nicht wesentlich, dennoch treten in Abbildung 9.19 vereinzelt Abweichungen der Rotorlage über 60 Grad auf.

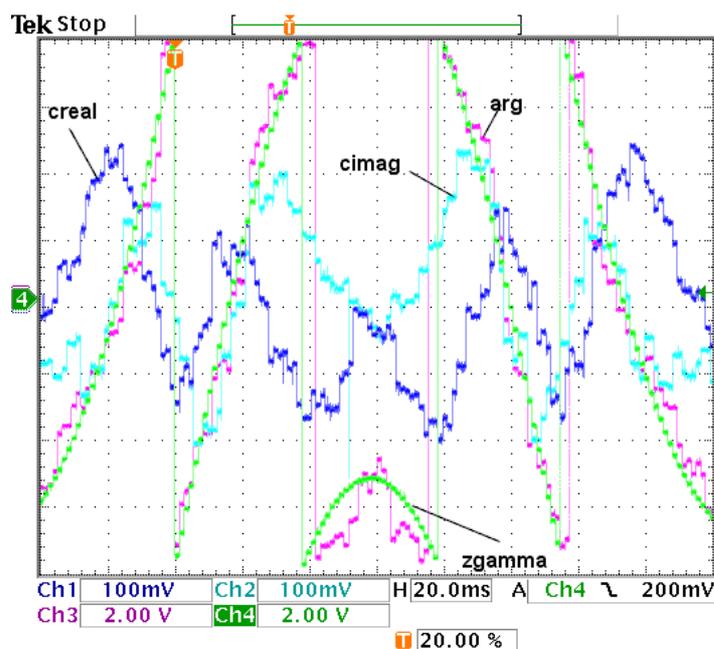


Abbildung 9.17: Zeitverlauf der INFORM-Größen im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

CH1 c_{real}

CH2 c_{imag}

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

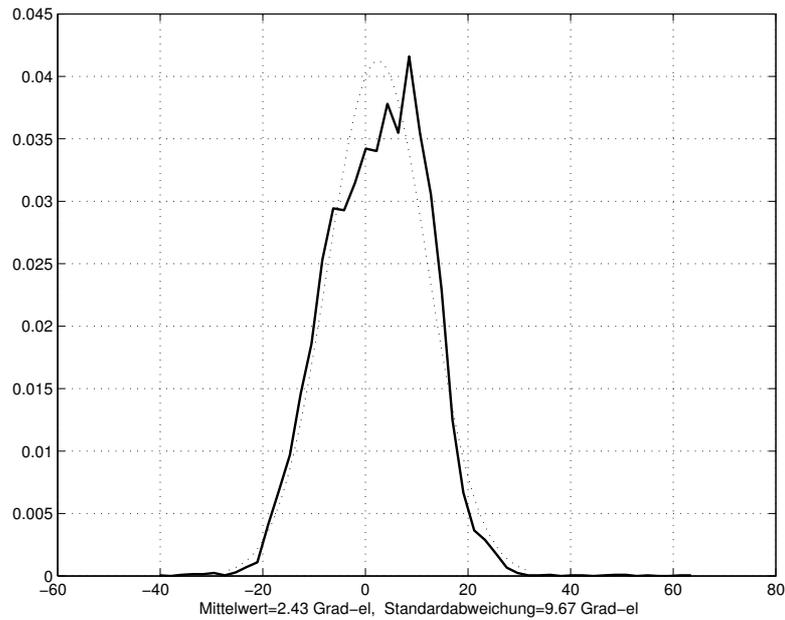


Abbildung 9.18: Normalverteilung des Fehlers im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

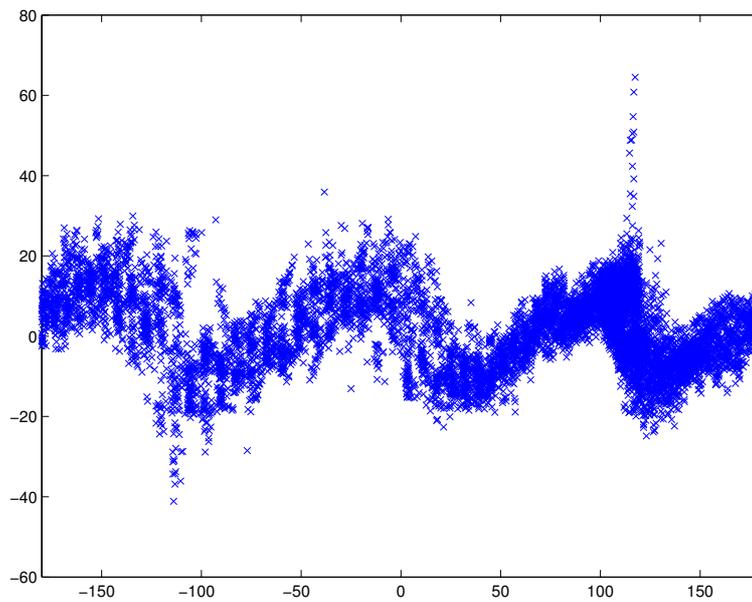


Abbildung 9.19: Fehlerwinkel im Diodenbetrieb mit gefilterter Strommessung im togelnden Betrieb
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.4 Umrichter im Hochsetzbetrieb

Die Messungen im Hochsetzbetrieb unterscheiden sich vom Diodenbetrieb nur in der Hinsicht, dass der Zwischenkreis eine dementsprechend höhere Spannung aufweist

und dadurch die INFORM-Sequenz in ihren Schusszeiten verkürzt wird, da der Stromanstieg diesbezüglich schneller erfolgt.

9.4.1 Ungefilterte Strommessung

Der entscheidende Punkt für die Auslegung der neuen Schusszeiten ist, dass die Stromauslenkung in eine Richtung ungefähr denselben Endwert von 190A erreicht.

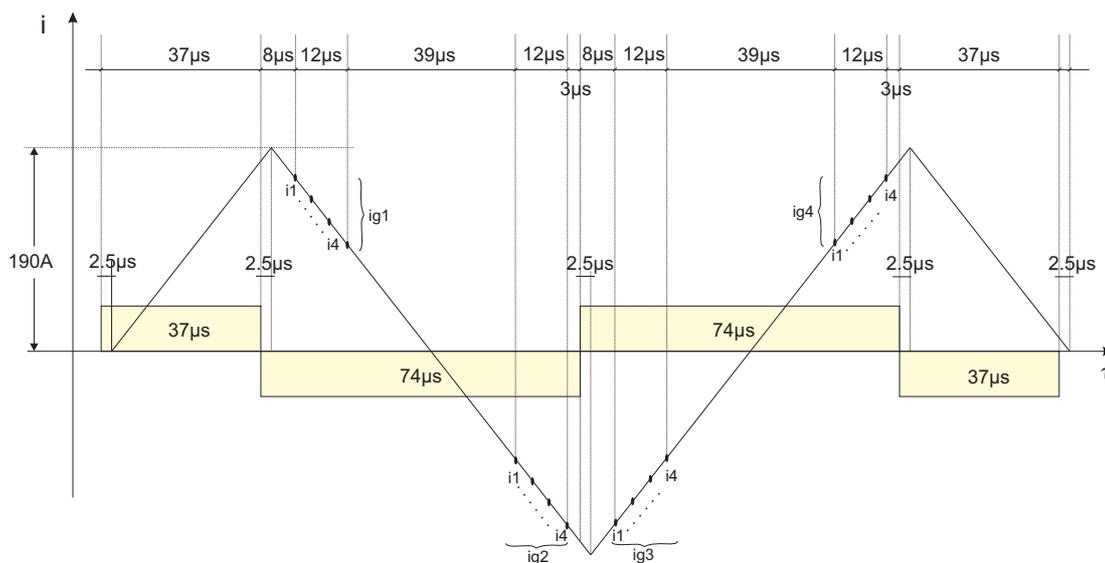


Abbildung 9.20: Die INFORM-Sequenz für den Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung

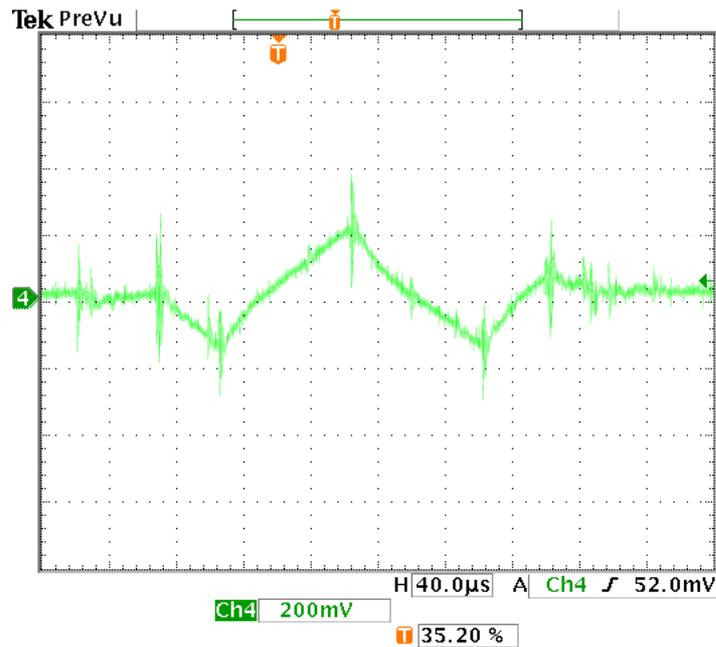


Abbildung 9.21: INFORM-Schuss im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung
CH3 Ansteuersignal Phase U
CH4 Strom Phase U; 186A/Div

Der Hochsetzbetrieb liefert im Fall der ungefilterten Strommessung ähnliche Ergebnisse bei der statistischen Auswertung, sowie der Form des INFORM-Kreises, wie die ungefilterte Strommessung im drehzahlgeregelten Diodenbetrieb. Im Folgenden sind die Abbildungen für den Hochsetzbetrieb mit konstanter Drehzahl und bei Drehzahlssprüngen mit konstanter Beschleunigung angeführt.

9.4.1.1 Fehler des Modellwinkels bei konstanter Drehzahl

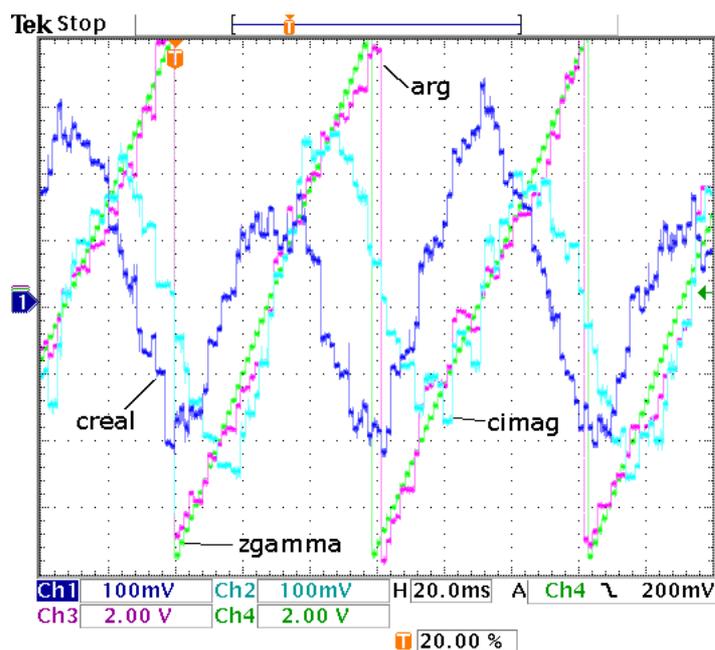


Abbildung 9.22: Zeitverlauf der INFORM-Größen bei Drehzahlregelung im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung

CH1 c_{real}

CH2 c_{imag}

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

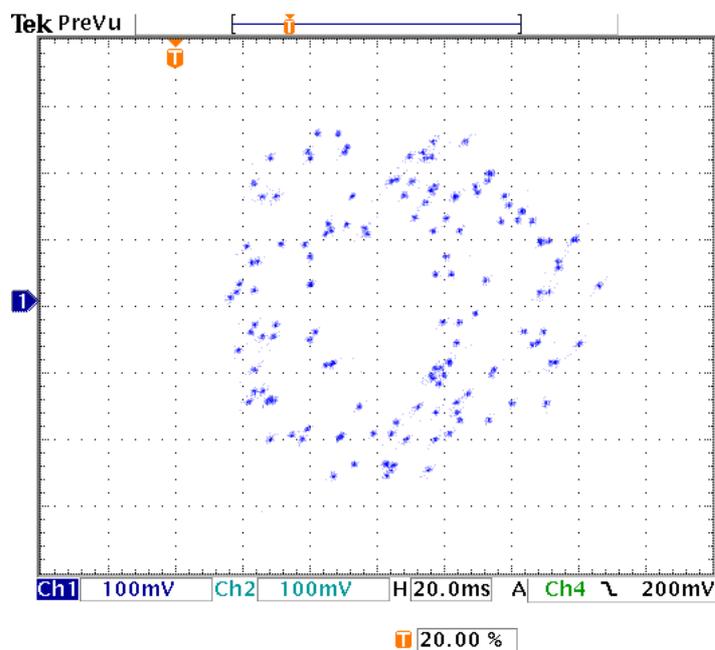


Abbildung 9.23: INFORM-Kreis im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung

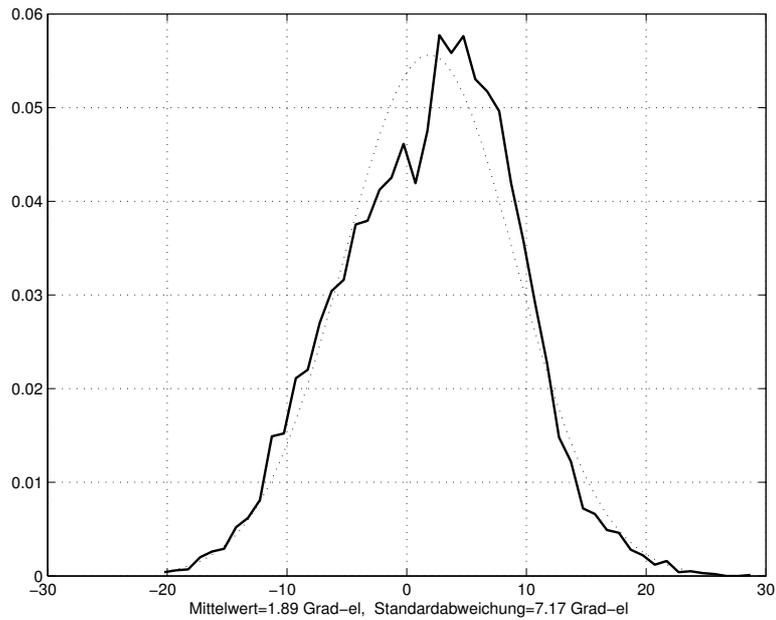


Abbildung 9.24: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl

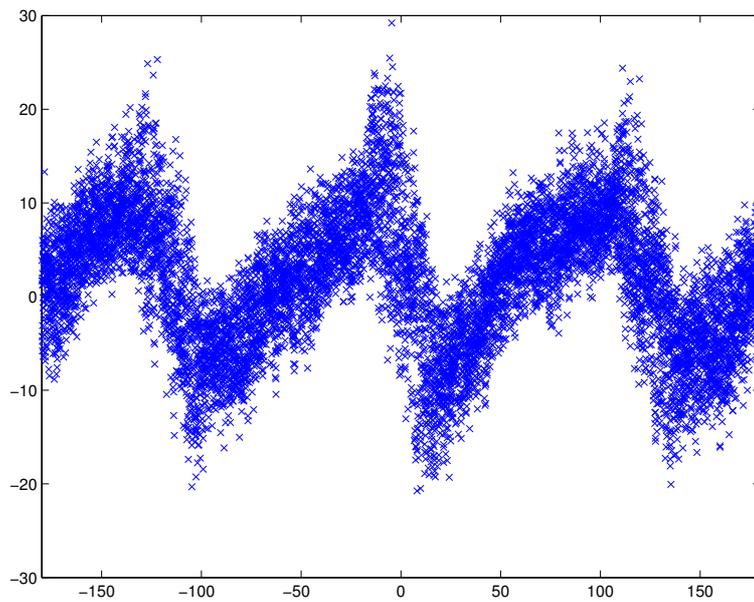


Abbildung 9.25: Fehlerwinkel im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.4.1.2 Fehler des Modellwinkels bei Drehzahlprüngen mit konstanter Beschleunigung

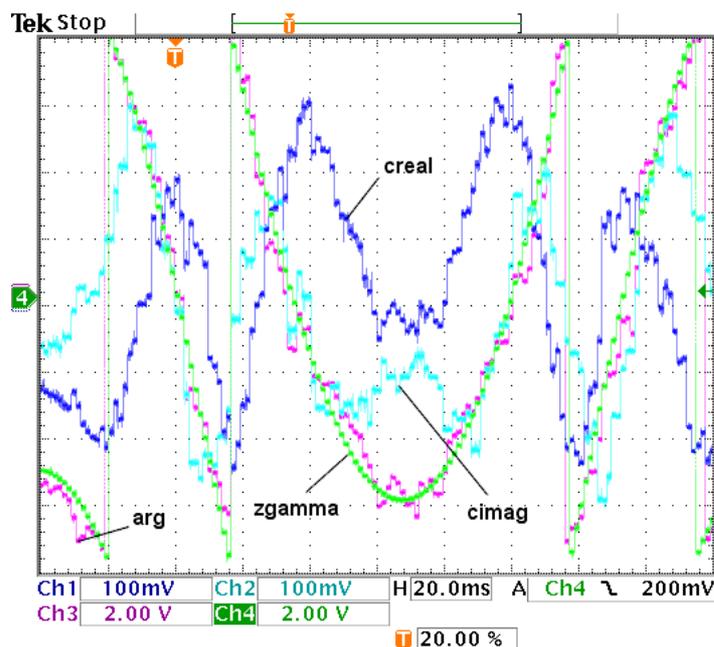


Abbildung 9.26: Zeitverlauf der INFORM-Größen im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

CH1 c_{real}

CH2 c_{imag}

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

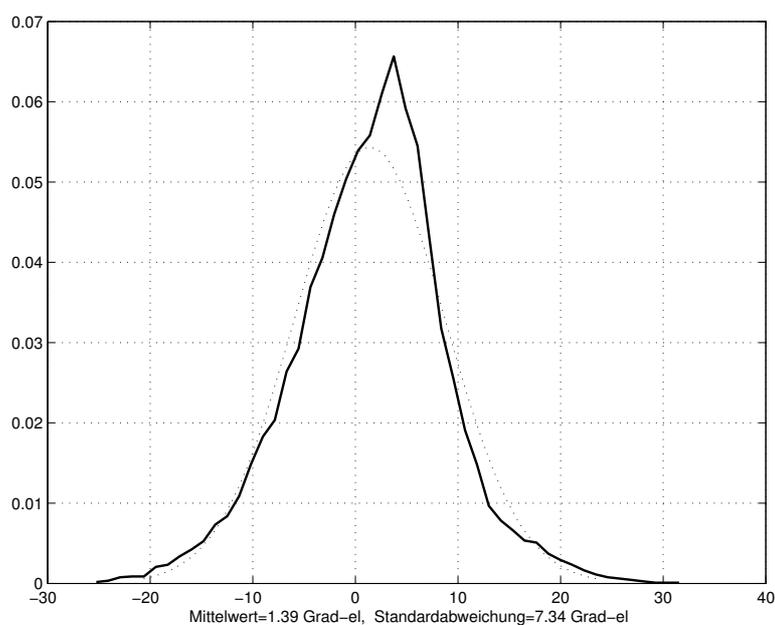


Abbildung 9.27: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

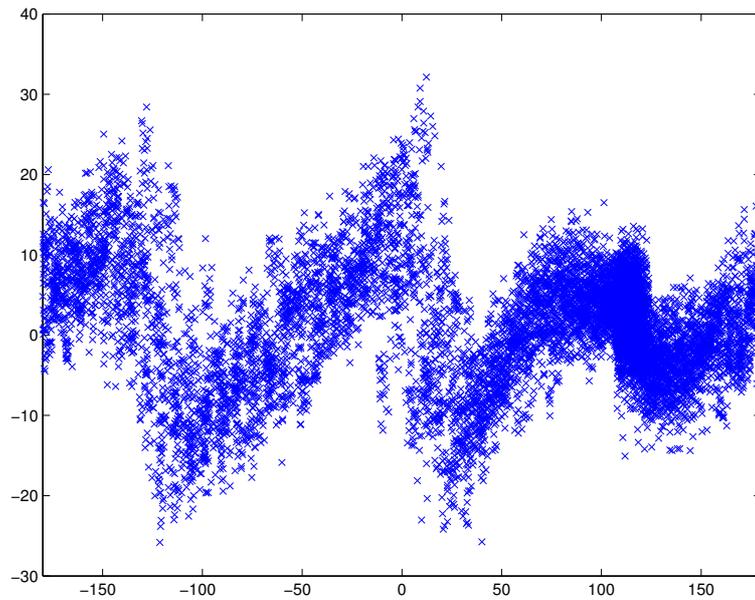


Abbildung 9.28: Fehlerwinkel im Hochsetzbetrieb mit ungefilterter Strommessung im togelnden Betrieb
 x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.4.2 Strommessung mit Butterworthfilter

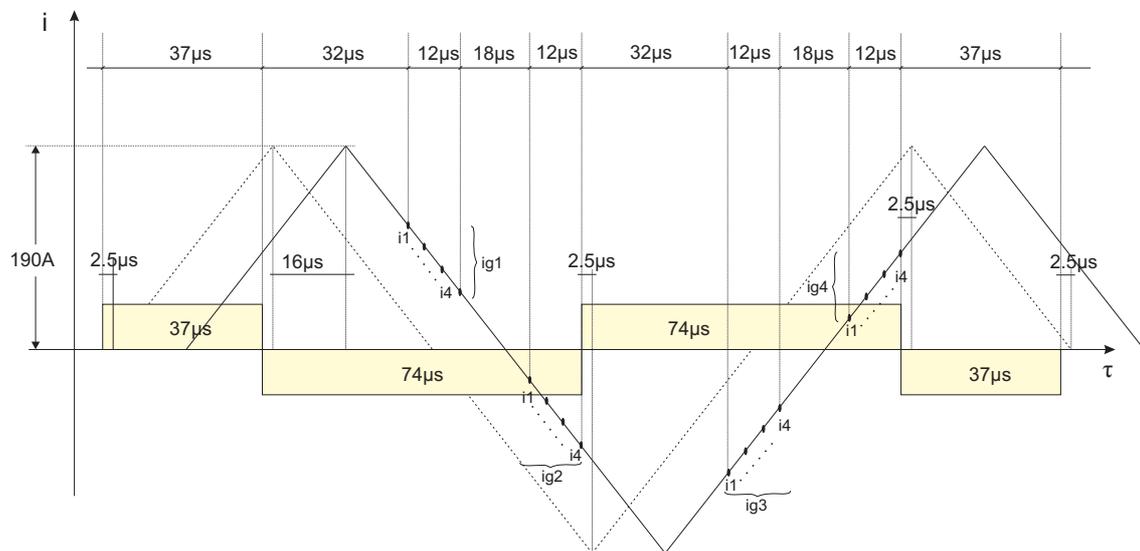


Abbildung 9.29: Die INFORM-Sequenz für den Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung

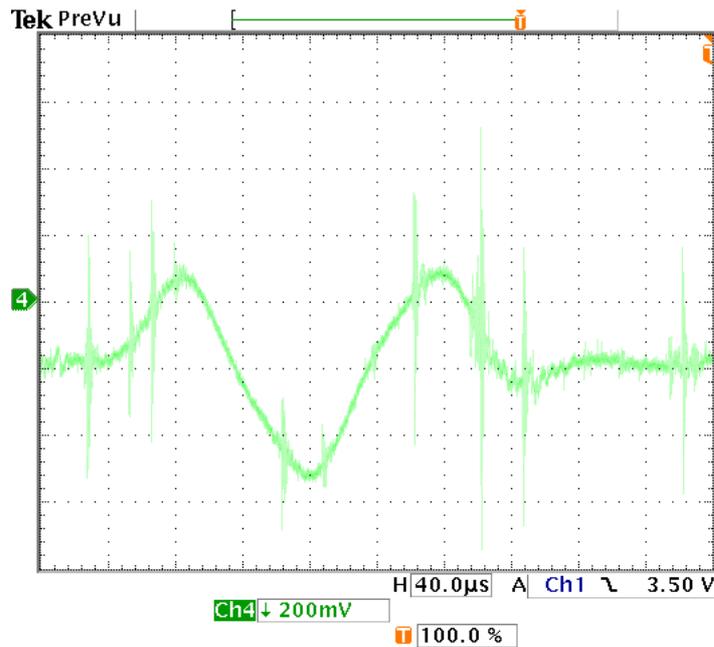


Abbildung 9.30: INFORM-Schuss im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung
CH3 Ansteuersignal Phase U
CH4 Strom Phase U; 96A/Div

Die Abweichung der sensorlosen INFORM-Lagebestimmung und die statistische Auswertung, weisen für die Strommessung mit Butterworthfilter im Hochsetzbetrieb eine noch größere Standardabweichung und Winkelfehler im Bereich bis zu 80 Grad auf. Im Folgenden ist die INFORM-Auswertung mit dazugehörigem INFORM-Kreis, sowie die statistische Auswertung im Betrieb mit konstanter Drehzahl und bei konstanter Beschleunigung mit Drehzahlsprüngen für den gefilterten Hochsetzbetrieb angeführt.

9.4.2.1 Fehler des Modellwinkels bei konstanter Drehzahl

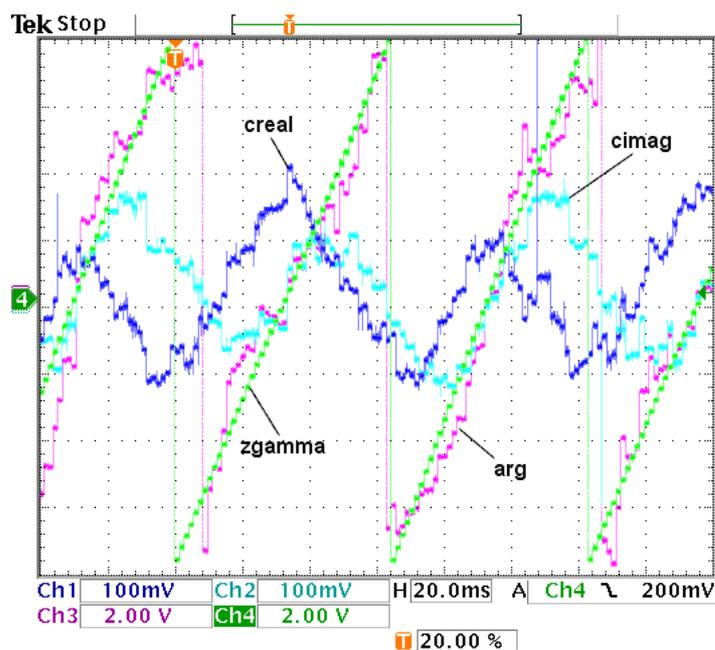


Abbildung 9.31: Zeitverlauf der INFORM-Größen bei Drehzahlregelung im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl

CH1 c_{real}

CH2 c_{imag}

CH3 INFORM-Rohwinkel arg

CH4 doppelter Lagegeberwinkel

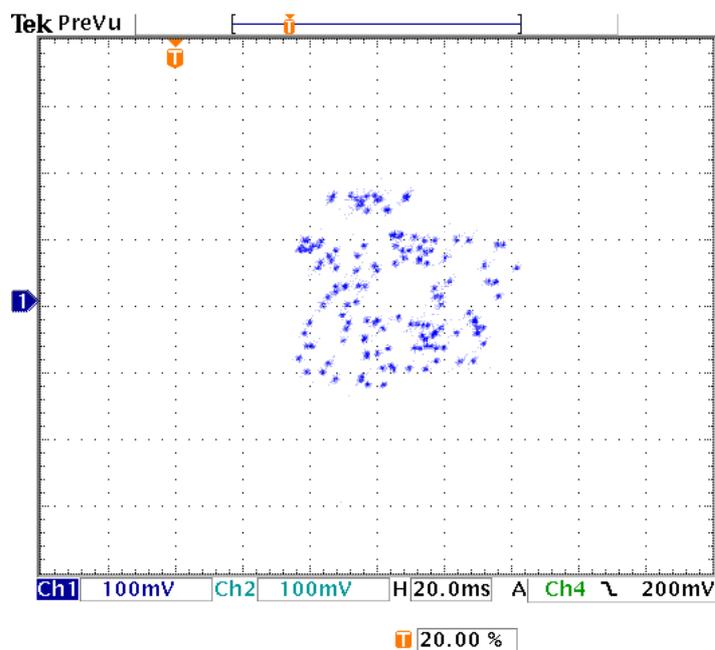


Abbildung 9.32: INFORM-Kreis im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung

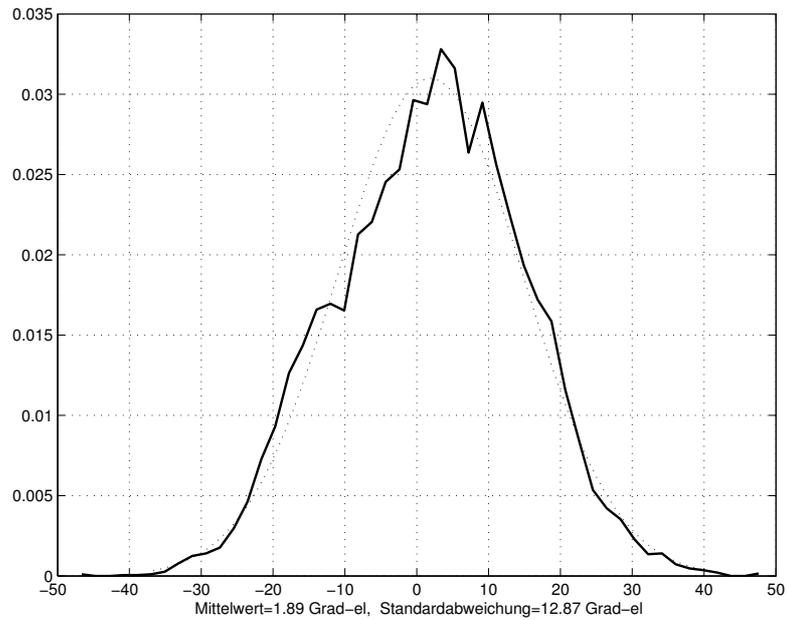


Abbildung 9.33: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl

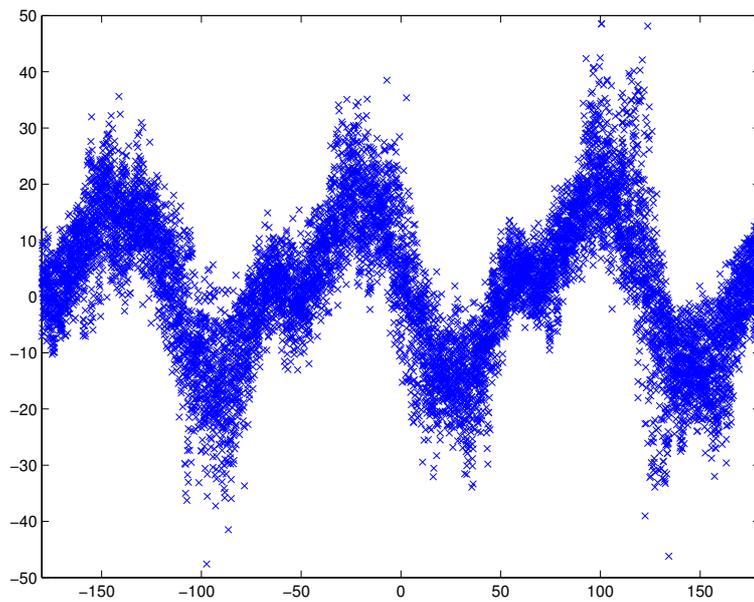


Abbildung 9.34: Fehlerwinkel im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung bei konstanter Drehzahl
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

9.4.2.2 Fehler des Modellwinkels bei Drehzahlprüngen mit konstanter Beschleunigung

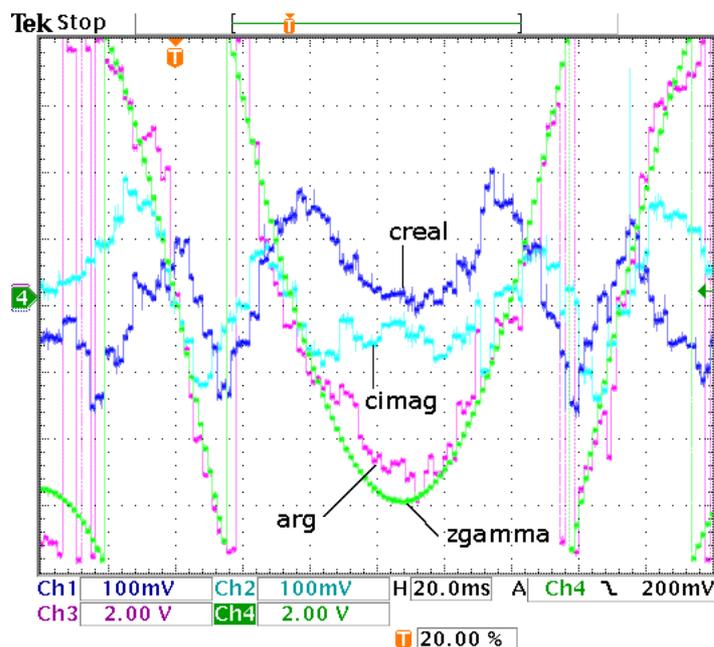


Abbildung 9.35: Zeitverlauf der INFORM-Größen im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

CH1 c_{real} CH2 c_{imag}
 CH3 INFORM-Rohwinkel arg CH4 doppelter Lagegeberwinkel

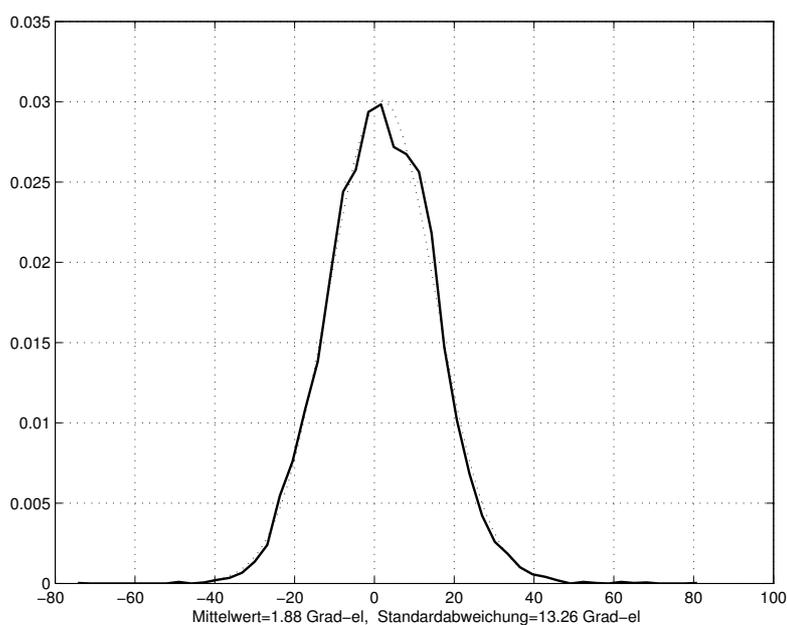


Abbildung 9.36: Normalverteilung des Fehlers im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung im togelnden Betrieb

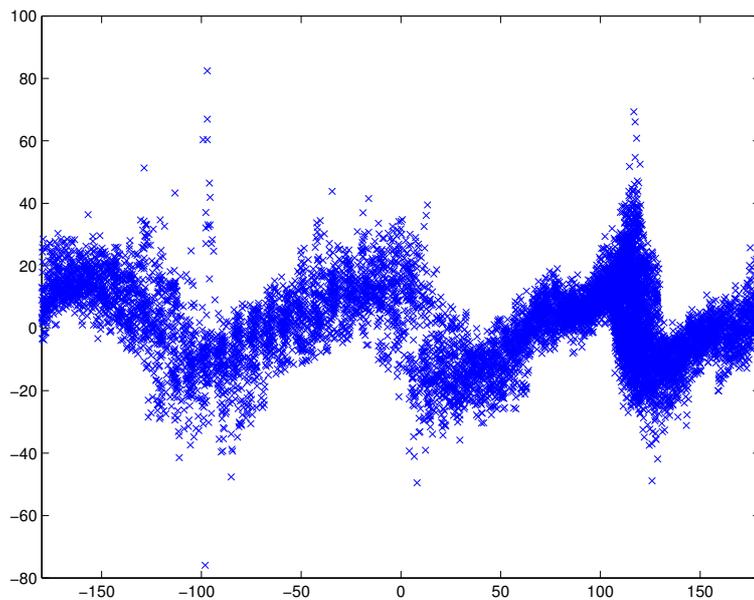


Abbildung 9.37: Fehlerwinkel im Hochsetzbetrieb mit gefilterter Strommessung im
toggelnden Betrieb
x-Achse: Rotorlage y-Achse: Winkelfehler

10 Resümee und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es zunächst, die Rotorlage im Stillstand sensorlos zu erfassen. Die Schussesequenz des Großsignal-INFORM wurde daher optimal ausgelegt, sodass die Abweichung des Modellwinkels minimal von der Absolutlage des Drehgebers abweicht. Obwohl die Maschine sehr ungünstige Eigenschaften für die INFORM-Methode aufweist, kann im sensorlosen Betrieb eine hinreichend genaue Aussage über die aktuelle Rotorposition getroffen werden.

Bedingt durch das Butterworthfilter bringt die gefilterte Strommessung eine zeitliche Verschiebung mit sich, die in der Auslegung der Schussesequenz berücksichtigt worden ist. Die Messzeitpunkte sind daher gegenüber der Schussesequenz der ungefilterten Strommessung verschoben und das Messfenster $\Delta\tau$ zusätzlich verkleinert worden.

Ausgehend von der statistischen Auswertung der unterschiedlichen Messreihen, ergeben sich für die ungefilterte Strommessung in beiden Umrichterbetriebsfällen ähnliche Ergebnisse, sodass die sensorlose Bestimmung der Rotorlage in beiden Betriebsfällen möglich ist. Etwas größer fällt die Standardabweichung bei der Strommessung mit Butterworthfilter im Hochsetzbetrieb des Umrichters aus. Hier treten im unkorrigierten Fall Abweichungen bis zu ± 24 Grad auf. Steht nur eine Strommessung mit Filter zur Verfügung, ist es günstiger die Rotorlage der stillstehenden Maschine im Diodenbetrieb zu bestimmen und erst anschließend für den drehzahlgeregelten Betrieb den netzseitigen Umrichter im Hochsetzbetrieb zu betreiben.

Die Aufgabe dieser Arbeit war es zudem, die periodische Abweichung in Abhängigkeit der aktuellen Rotorlage mit einer Korrekturfunktion zu minimieren und mit den Ergebnissen der unkorrigierten Messreihen zu vergleichen. Prinzipiell kann hier die Aussage getroffen werden, dass eine Korrekturfunktion die Genauigkeit des Modellwinkels sowohl mit ungefilterter, als auch mit gefilterter Strommessung deutlich erhöht. Die Standardabweichung senkte sich in weiteren Messungen unter Verwendung der Korrekturfunktion bis auf maximal 5 Grad, wo hingegen im unkorrigierten Fall eine maximale Standardabweichung von 11 Grad aufgetreten ist.

Für die Approximierung der Fehlerkurve wurde hier die Fourierreihe herangezogen wobei nur die Grundschwingung in die Bildung der Korrekturfunktion miteingeht. Weiterführend könnte hier untersucht werden, ob andere Ansätze, wie die Verwendung eines neuronalen Netzes oder ein Polynom höherer Ordnung bessere Ergebnisse liefern.

Dabei muss der Aufwand von zusätzlicher Rechenzeit und Komplexität der Modelle gegenüber einer Verbesserung der Genauigkeit abgewogen werden.

Die sensorlose Lageerfassung bei tiefen Drehzahlen hat im Rahmen dieser Diplomarbeit nur unzufriedene Ergebnisse geliefert. Zwar ist die Schusszeit optimal den Bedingungen der Maschine angepasst worden, trotzdem lagen die Abweichungen weit außerhalb eines tolerierbaren Bereichs.

Es muss hier dazu gesagt werden, dass die Schusssequenzen für die verschiedenen Stränge nacheinander angelegt worden sind. Die Durchführung der Schusssequenzen für alle drei Stränge und die dazugehörige Stromanstiegsmessungen innerhalb eines Programmdurchlaufes könnte daher eine deutliche Verbesserung der sensorlosen Lageerfassung mit sich bringen.

Um die Genauigkeit des Rotorwinkels mit der klassischen INFORM-Methode auch im drehzahlgeregelten Betrieb zu erhöhen, kann der Einfluss einer zusätzlichen rotorflussparallelen Stromkomponente (d-Strom) genauer untersucht werden. Ein positiver Strom in d-Richtung bewirkt eine betragsmäßige Vergrößerung der d-Komponente des Statorflussraumzeigers, wodurch der Arbeitspunkt in den Bereich größerer Sättigung verschoben wird.

Ein weiterführender Ansatz ist es die Rotorlage auch bei höheren Drehzahlen erfassen und bestimmen zu können. Hierbei kommen vor allem das Spannungs- und Kurzschlussmodell zum Einsatz.

11 Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen

U, u	Momentanwert der elektrischen Spannung, normierte Spannung
U_N	Nennwert der Strangspannung (Effektivwert)
U_{bez}	Bezugssspannung der Strangspannung für die Normierung
I, i	Momentanwert des elektrischen Stromes, normierter Strom
I_N	Nennwertes des Strangstromes (Effektivwerte)
I_{bez}	Bezugsstrom des Strangstromes für die Normierung
Z_{bez}	Bezugsimpedanz
P_N	Nennleistung
f_N	Nennfrequenz
R	Ohmscher Widerstand
ω_k	Winkelgeschwindigkeit des Rotors
Ω_{bez}	Bezugswinkelgeschwindigkeit
τ_m	Mechanische Anlaufzeitkonstante
τ_A	Normierte Abtastzeit
l_s	Bezogene Statorinduktivität
l_{INFORM}	Informreaktanz
$l_{d,diff}, l_{q,diff}$	Differentielle Induktivitäten
M_{bez}	Bezugswert für das Drehmoment
m_i	Inneres bezogenes Moment
m_L	Bezogenes Lastmoment
n_N	Nennzahl der Maschine
γ_{el}	Elektrischer Rotorlagewinkel
γ_m	Mechanischer Rotorlagewinkel
p	Polpaarzahl der Maschine
T_t	Totzeit für die Ansteuerung der Halbleiterventile
f_{clk}	Grundfrequenz des Schwingquarzes
f_g	Grenzfrequenz
$H(s)$	Übertragungsfunktion
V	Verstärkung
$a_0 \dots a_n$	Koeffizienten des Nennerpolynoms
$s_1 \dots s_n$	Polstellen

U_a	Eingangsspannung
U_e	Ausgangsspannung
U_v	Verschiebungsspannung bei der Spannungsmessung
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung
\underline{C}	Komplexe Kurven der μ - und ν -Ebene
$i_{g1} \dots i_{g8}$	Mittelwerte der Strommessungen in einem Schuss
σ	Standardabweichung
μ	Mittelwert des Winkelfehlers
$\gamma_{korrigiert}$	Korrekturwinkel
$\gamma_{INF,korr}$	Korrigierter Modellwinkel

Raumzeigerrechnung

\underline{u}_s	Statorspannungsraumzeiger
\underline{i}_s	Statorstromraumzeiger
$\underline{\psi}_s$	Statorflussraumzeiger
$\underline{\psi}_M$	Flussverkettung der Dauermagnete

Verwendete Indizes

N; Nenn,Strang	Nennwerte, wenn nicht anders angegeben, Strang-Effektivwerte
α, β	Statorfestes Koordinatensystem
d, q	Rotorfestes Koordinatensystem
u, v, w	Bezeichnung der einzelnen Phasen
s	Statorbezogene Größen
M	Größen, die vom Permanentmagneten herrühren
L	Lastabhängige Größen
el	Elektrisch Größen
m	Mechanische Größen
off+	Mit positiven Offset behaftete Größen
off-	Mit negativen Offset behaftete Größen
inf	INFORM- bzw. Modellgrößen
ZK	Zwischenkreis

Literaturverzeichnis

- [1] Holger, R.: Realisierung eines Quasi-Direktumrichters durch eine hochdynamische Zwischenkreisspannungsregelung, VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [2] Kovács, K.P., und Rácz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Ungarische Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1959
- [3] Rieder, U.H.: Intelligentes Bremskonzept für sensorlos betriebene permanenterregte Synchronmaschine, Diplomarbeit TU Wien, Institut E372 IEAM, 2001
- [4] Robeischl, E.: Sensorlose Regelung einer permanenterregten Synchronmaschine mit Zwischenkreisstrommessung, Diplomarbeit TUWien, Institut E372 IEAM, 1999
- [5] Robeischl, E., u.a.: Befehlsreferenz HANSL, Institut E372 IEAM, TU Wien, 2000
- [6] Schrödl, M.: Elektrische Antriebe und Maschinen, Vorlesungsskriptum TU Wien, 1998
- [7] Schrödl, M.: Sensorless control of permanent-magnet synchronous machines at arbitrary operating points using a modified INFORM flux model, Vol.3 No.4 July/Aug, VDE Verlag - EUREL Publication, 1993
- [8] Schrödl, M.: Sensorless control of AC machines, Vorlesungsskriptum TU Wien, 2001
- [9] Weinmann, A.: Regelungen, Analyse und technischer Entwurf, Band 1, 3. Auflage, Springer, Wien und NewYork, 1994
- [10] Weinmann, A.: Regelungen, Analyse und technischer Entwurf, Band 2, 3. Auflage, Springer, Wien und New York, 1995
- [11] Weinrichter, H.: Einführung in die Nachrichtentechnik, Vorlesungsskriptum TU Wien, 2003
- [12] Zach, F.: Leistungselektronik, 3. Auflage, Springer, Wien und New York, 1990

A Gehäuse und Fernbedienung des Umrichters

Die Abbildung A.1 zeigt das Gehäuse, in dem die TU-Elektronik und die Signalprozessorplatine untergebracht sind. Dem Gehäuse integriert sind:

- der Hauptschalter
- der Freigabe-Schalter
- zwei LEDs, eine rote und eine grüne, für die Statusanzeige des Umrichters
- Sicherungen für die Spannungsmessung
- Sicherungen für die eingebauten Netzgeräte, die der Spannungsversorgung der unterschiedlichen Komponenten auf der Platine, sowie der Versorgung für die Signalprozessorplatine, dienen.

Das Gehäuse hat in der Rückwand ein kreisförmiges Loch, durch das die Lichtwellenleiter für die Ansteuerung der Halbleiterventile, sowie die Kabel für die Strommessung und der Spannungsmessung in den Umrichter hineingeführt und verbunden werden.

Die Abbildung A.2 zeigt die Fernsteuerung des Umrichters. Der grüne Taster "EIN" schaltet den Umrichter ein, wenn die TU-Elektronik zuvor mit dem Freigabe-Schalter freigegeben wird und keine Fehlermeldung vorliegt. Der rote Taster, dient dem Abschalten des Systems. Wird dieser Knopf gedrückt, während sich der Umrichter im regulären betrieb befindet, dann wird die Freigabe von der Elektronik nicht zurückgesetzt, weshalb der Betrieb durch drücken des grünen Tasters jederzeit wieder aufgenommen werden kann. Kommt es zu einer Abschaltung des Systems infolge eines detektierten Überstroms oder eines anderen Fehlers, dann leuchtet die rote LED am Gehäuse. Die Fehlermeldung muss zunächst durch betätigen des roten Tasters an der Fernbedienung quittiert werden. Erst dann kann der reguläre Betrieb wieder aufgenommen werden.

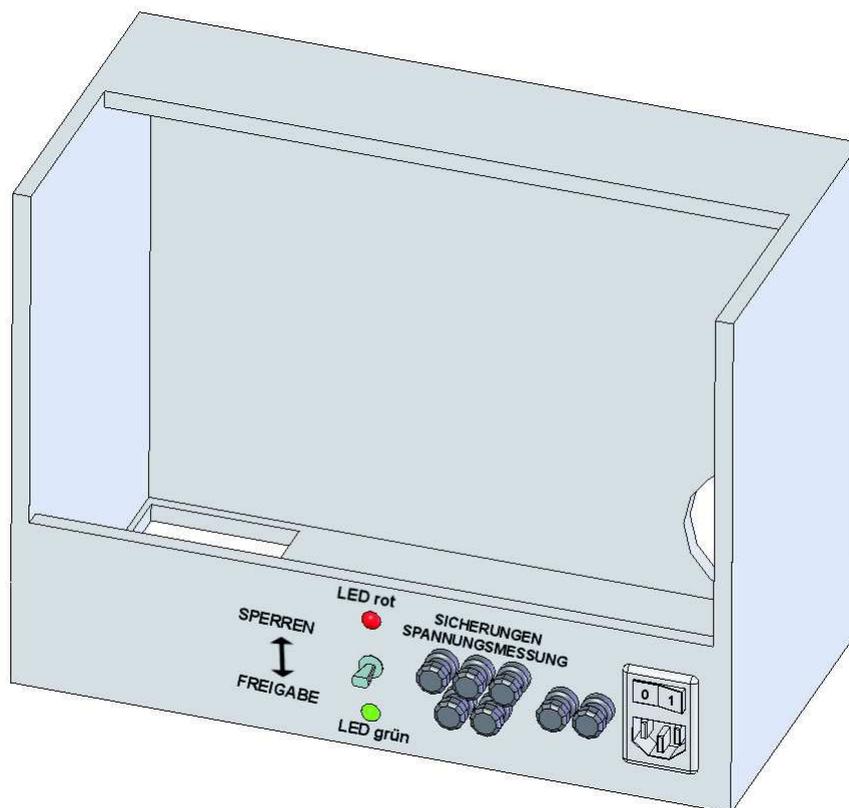


Abbildung A.1: Das Gehäuse in dem die Elektronik untergebracht ist

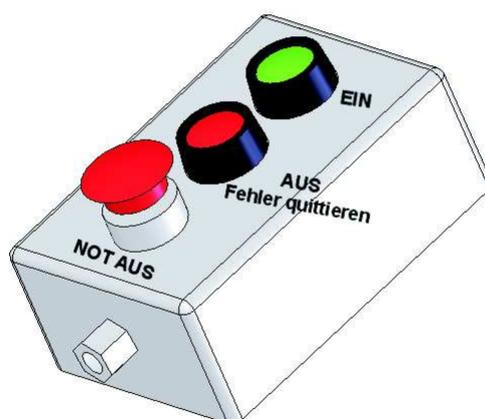


Abbildung A.2: Das Steuerpult zur Fernbedienung des Umrichters mit Not-AusSchalter

B Programmlistings

B.1 Das HANSL-Programm

```
; Beschleunigung mit neuer INFORM Programmieretechnik – Gro{\ss}signal-Anfangslagebestimmung
; Gro{\ss}signalmessung mit Korrekturfunktion
; Mittelwertbildung durch Winkelmittelung des INFORM-Winkels (gagross)
; ueber 8 INFORM-Sequenzen
; Anstiegsmessung nur 2mal je Schuss
; 180 Grad Unsicherheit mit Grosssignal-INFORM ausgeschlossen

CANINA=konst(0)
CANINB=konst(0)
CANINC=konst(0)
CANIND=konst(0)
CANNODE=konst(0)
CANESR=konst(0)
CANOUTA=konst(0)
CANOUTB=konst(0)
CANOUTC=konst(0)
CANOUTD=konst(0)

klsig=konst(0)

ramadr=konst(07 fffh)
ramstart=konst(07 fffh)
rammax=konst(0CE34h) ;maximale RAM-Adresse fuer 10010 Messwerte
ramdat=konst(0)

$ LDP #232
$ SPLK #0002h,T1CNT ; T1 zuruecksetzen
$ LDP #4

$ b weiter ;Initialisierung

; Kuzer Task
;*****
$A_INT:nop
zeit(1)

; Ist-Stroeme einlesen in 1,2,3
;*****
inorm=konst(-0.2033159) ;Normierungsfaktor, negativ damit Stromrichtung stimmt
i1=in(a1) ;Einlesen von Strom I1
i2=in(a2) ;Einlesen von Strom I2
i3=in(a3) ;Einlesen von Strom I3
u_w=in(a9) ;Einlesen der Spannung U
u_v=in(a10) ;Einlesen der Spannung V
```

```

u_u=in(a11) ;Einlesen der Spannung W
u_zk=in(a12) ;Zwischenkreisspannung einlesen

i1=sum(i1 , i1offs) ; Offset korrigieren
i1=mult(i1 , inorm) ;Strom normieren
i2=sum(i2 , i2offs) ; Offset korrigieren
i2=mult(i2 , inorm) ;Strom normieren
i3=sum(i3 , i3offs) ; Offset korrigieren
i3=mult(i3 , inorm) ;Strom normieren

; Ist-Stroeme 1,2,3 -> alpha ,beta KOS
;*****
ii_alpha=sum(i1) ;Iststrom i_alpha

hilfk2=sum(i2 , -i3)
ii_beta=mult(hilfk2 , nk5774) ;Iststrom i_beta
;*****

; Ist-Stroeme alpha ,beta -> d,q KOS
;*****

ii_d=mult(ii_alpha , cosgamma)
hilfk3=mult(ii_beta , singamma)
ii_d=sum(ii_d , hilfk3) ;Iststrom Id

ii_q=mult(ii_beta , cosgamma)
hilfk3=mult(ii_alpha , singamma)
ii_q=sum(ii_q , -hilfk3) ;Iststrom Iq
;*****

; Stromregler in d,q KOS
;*****
kp_ireg=konst(0.5) ;p-Anteil vom Stromregler
ki_ireg=konst(0.5) ;I-Anteil vom Stromregler

id_d=sum(is_d , -ii_d) ;Differenzbildung Sollwert-Istwert
id_q=sum(is_q , -ii_q)

idi_d=mult(id_d , i_ aus) ;AntiWindUp
idi_q=mult(id_q , i_ aus)

idi_d=mult(id_d , freigabe) ;Freigabe
idi_q=mult(id_q , freigabe)

udp_h=p(id_d , 0.7 , kp_ireg) ;p-Anteil
uqp_h=p(id_q , 0.7 , kp_ireg)

udi_h=i(idi_d , 0.0053571 , ki_ireg) ;i-Anteil
uqi_h=i(idi_q , 0.0053571 , ki_ireg)

us_d=sum(udp_h , udi_h) ;p und i-Anteil zusammenfuehren
us_q=sum(uqp_h , uqi_h)
;*****

; Usoll von d,q -> alpha ,beta-KOS
;*****
us_alpha=mult(us_d , cosgamma)
hilfk1=mult(us_q , singamma)
us_alpha=sum(us_alpha , -hilfk1) ; Sollspannung u_alpha

```

```

us_beta=mult(us_q,cosgamma)
hilfk1=mult(us_d,singamma)
us_beta=sum(us_beta,hilfk1)           ;Sollspannung u_beta

us_alpha=mult(us_alpha,freigabe)     ;Freigabe
us_beta=mult(us_beta,freigabe)
;*****

; PWM ausgeben
;*****
umax=konst(0.866)                    ;Spannungsbegrenzung

i_aus=sumw(eins)                     ;AntiWindUp fuer Stromregler
hilfk1=betrg(us_alpha,us_beta)       ;Spannungsraumzeiger begrenzen

if hilfk1>umax then
    i_aus=sumw(null)                 ;AntiWindUp -> I-Anteil Stromregler aus
    hilfk1=atan(us_beta,us_alpha)    ;Winkel des Spannungsraumzeigers
    hilfk2=sin(hilfk1)               ;Imaginaerteil
    hilfk3=cos(hilfk1)               ;Realteil
    us_beta=multf(umax,hilfk2)
    us_alpha=multf(umax,hilfk3)
endif

tp=konst(0.9765625)                  ;5kHz PWM-Frequenz bei 40MHz DSP

hilfk1=sumw(us_alpha)
hilfk2=sumw(us_beta)
pwm(hilfk1,hilfk2,eins,tp)          ;PWM ausgeben, u_alpha und u_beta
;*****

zeit(0)
$ ret
$weiter:nop

; Langer Task mit INFORM-Sequenzen
;*****
zoomfaktor1=konst(1)
zoomfaktor2=konst(1)
zommfaktor3=konst(1)
zoomfaktor4=konst(1)

;Nichtveraenderbare Konstanten definieren
;*****
ink=konst(1h)
null=konst(0)
eins=konst(1)
zwei=konst(2)
drei=konst(3)
vier=konst(4)
funf=konst(5)
acht=konst(7.998)

nk5774=konst(0.5774)
meins=konst(-1)
mhalb=konst(-0.5)
macht=konst(-8)
wdhalb=konst(0.86603)
wdrei=konst(1.73205)

;verschiedene Spannungsraumzeiger fuer INFORM

```

```

;*****

uplus=konst(0cc3h)
vplus=konst(0c3ch)
wplus=konst(03cch)
uminus=konst(033ch)
vminus=konst(03c3h)
wminus=konst(0c33h)
pwmoff=konst(0000h)
pwmkurz=konst(0ccch)
pwmfrei=konst(0666h)
einmal=konst(0)

if einmal=null then

    kurz(1,1) ;Interrupt fuer kurzen Task enable

    ;benoetigte Totzeit einstellen
    ;*****

    $ LDP #232
    $ SPLK #00e0h,DBICON ;0 us delay
    $ LDP #4

    i1=in(a1) ;einmalige Offsetkorrektur
    i2=in(a2)
    i3=in(a3)
    i1offs=sumw(-i1) ;Offset Strom I1
    i2offs=sumw(-i2) ;Offset Strom I2
    i3offs=sumw(-i3) ;Offset Strom I2

    tab=konst(1.398) ;Abtastzeit in ms
    ombez=konst(1.047198) ;2p=2 ;=1/1000
    azeit=mulf(tab,ombez) ;el.Bezugswinkelgeschw. =2*PI*AnzPole(2)*Nbezug(=5000U/min)/60

    einmal=sumw(eins)
endif

;*****
if freigabe=eins then
    if frei_e=null then
        pinit(0)
        frei_e=sumw(eins)
    endif
endif
if frei_u=null then ;externes Freigabesignal
    freigabe=sumw(null)
endif
;*****

; Lagegeber einlesen und Freigabe
;*****
lageoffs=konst(0c4c0h)
hilf1=def
hilf2=def
hilf3=def
hilf4=def
lage=def
frei_u=konst(0)

;----- externes Freigabesignal

```

```

hilf2=inp(1)
$ lacc [ hilf2 ]
$ and #0001h
$ sacl [ hilf1 ]

frei_u=sumw(null)
if hilf1=ink then
    frei_u=sumw(eins)
endif

;----- Lagegebereinlesen und von gray->bin
$ lacc [ hilf2 ]
$ and #0fff0h
$ sacl [ hilf1 ]

$ dint

$ clrc sxm
$ lack #15
$ sacl [ hilf2 ]
$gray1: nop
$ lacc [ hilf1 ],15
$ sach [ hilf3 ]
$ lacc [ hilf3 ]
$ xor [ hilf1 ]
$ sacl [ hilf1 ]
$ lacc [ hilf2 ]
$ sub [ ink ]
$ sacl [ hilf2 ]
$ bgz gray1
$ lacc [ hilf1 ]
$ sacl [ lage ]
$ sxxm

$ eint

lagemech=sumw(lage,-lageoffs)           ;mechanische Lage vom Offset befreien
gamma=sumw(lagemech,lagemech)           ;4 polige Maschine - el. Lage
gamma=multf(gamma,meins)                 ;Invertierung noetig wegen lagegeber
zgamma=sumw(gamma,gamma)                 ;doppelte el.Lage
;*****

;*****      EMK - MODELL *****

; Spannung 1,2,3 -> alpha,beta KOS
;*****
zwdr=konst(0.66666)
unorma=konst(1)
unormb=konst(1)
u_u_o=konst(-0.0285)
u_v_o=konst(0.035)
u_w_o=konst(-0.035)
u_u=sum(u_u,u_u_o)
u_v=sum(u_v,u_v_o)
u_w=sum(u_w,u_w_o)

hilf1=multf(mhalb,u_v)
hilf2=multf(mhalb,u_w)

```

```

hilf3=sum(u_u, hilf1 , hilf2)
us_am=multf(hilf3 ,zwdr)
us_am=multf(us_am, unorma)

hilf1=multf(nk5774 ,u_v)
hilf2=multf(nk5774 ,u_w)
us_bm=sum(hilf1 , - hilf2)
us_bm=multf(us_bm, unormb)

us_absm=betrg(us_am, us_bm)

; Ist-Stroeme 1,2,3 -> alpha, beta KOS
hilf1=multf(mhalb, i2)
hilf2=multf(mhalb, i3)
hilf3=sum(i1, hilf1, hilf2)
ii_am=multf(hilf3, zwdr)

hilf1=multf(nk5774, i2)
hilf2=multf(nk5774, i3)
ii_bm=sum(hilf1, - hilf2)

ki_emk=konst(0.6262)
kp_emk=konst(0.005)
kg_emk=konst(1)
rs=konst(0.05)
ls=konst(0.1)
hilf1=mult(ii_am, rs) ; alpha-richtung du=us-rs*is
hilf2=mult(kp_emk, ps_sa)
dus_a=sum(us_am, - hilf1, - hilf2)
if emk_pwm=eins then
    dus_a=sum(us_alpha, - hilf1, - hilf2)
endif

hilf1=mult(ii_bm, rs) ; beta-richtung
hilf2=mult(kp_emk, ps_sb)
dus_b=sum(us_bm, - hilf1, - hilf2)
if emk_pwm=eins then
    dus_b=sum(us_beta, - hilf1, - hilf2)
endif

hilf1=mult(ki_emk, dus_a) ; Ki*integratoreingang
hilf2=mult(ki_emk, dus_b)

ps_sa=sum(ps_sa, hilf1)
ps_sb=sum(ps_sb, hilf2)

hilf1=mult(ls, ii_am)
psim_a=sum(ps_sa, - hilf1) ;psim_a

hilf1=mult(ls, ii_bm)
psim_b=sum(ps_sb, - hilf1) ;psim_b

psim_re=betrg(psim_a, psim_b) ;KOS von polar -> kartesisch
psim_ae=atan(psim_b, psim_a)
psim_rg=t1(psim_re, 0.1, kg_emk, 1) ;psim radius glatt

gaerre=sumw(gamma, -psim_ae) ; Fehler des emk-modell

```

```

hilf1=abs(gaerre)                ; Absolutfehler
gaeabse=t1(hilf1,0.5)

;*****

;Beginn der INFORM-Schussesequenz
;*****
grkor_0=konst(-0.0053866)        ; a0 ; Koeffizienten fuer Korrekturfunktion
grkor_a=konst(0.2687555)        ; a1
grkor_b=konst(-0.3688888)       ; b1
grkor_w=konst(1)                ; omega

if schuss=eins then             ; Schussesequenz fuer Grosssignal-INFORM
    $ dint                       ; Interrupt disable

; Grosssignalmessung
;*****
if grsig=eins then
    if grok=eins then           ; nur jeden zweiten Abtastschritt INFORM schiessen
        grok=sumw(null)
        wechsel=sumw(wechsel,eins) ; Variable wechsel inkrementieren
        if wechsel>zwei then   ; wenn wechsel=drei, dann auf 0 setzen
            wechsel=sumw(null)  ; u=0; v=1; w=2
        endif

;INFORM-Schuss in Strang U
;*****
if wechsel=null then
    schusp=sumw(plus)
    schusm=sumw(uminus)

    $ call gr_inf                ; Unterprogramm gr_inf aufrufen

    iou=sum(ig2,-ig1,-ig4,ig3)   ; Stromaenderung berechnen
    iuu=sum(ig6,-ig5,-ig8,ig7)

    deltaiu=sum(iou,iuu)

endif

;INFORM-Schuss in Strang V
;*****
if wechsel=eins then
    schusp=sumw(vplus)
    schusm=sumw(vminus)

    $ call gr_inf                ; Unterprogramm gr_inf aufrufen

    iov=sum(ig2,-ig1,-ig4,ig3)   ; Stromaenderung berechnen
    iuv=sum(ig6,-ig5,-ig8,ig7)

    deltaiv=sum(iov,iuv)

endif

;INFORM-Schuss in Strang W
;*****

```

```

if wechsel=zwei then
  schusp=sumw( wplus )
  schusm=sumw( wminus )

  $ call gr_inf           ;Unterprogramm gr_inf aufrufen

  iow=sum( ig2,-ig1,-ig4 , ig3 ) ;Stromaenderung berechnen
  iuw=sum( ig6,-ig5,-ig8 , ig7 )

  deltaiw=sum( iow , iuw )

endif

  inf(pwmoff)           ;Sperrn der PWM, freigabe fuer Pulsmuster

else
;*****
grok=sumw( eins )
endif

;Grosssignal – INFORM–Auswertung  Stromaenderungsraumzeiger bestimmen
;*****

regross=sum(-deltaiu,-deltaiu , deltaiv , deltaiw) ;Realteil
imgross=sum( deltaiw , -deltaiu )                ;Imaginaerteil
imgross=mult( imgross , wdrei )

gagross=atan( imgross , regross ) ;INFORM–ROHWINKEL aus Grosssignalmessung

hilf1=multf( gagross , grkor_w ) ;Die Korrekturfunktion einbinden
hilf2=cos( hilf1 )
hilf3=multf( hilf2 , grkor_a )

hilf2=sin( hilf1 )
hilf4=multf( hilf2 , grkor_b )

;korrigierter Winkel mit  a0 + a1*cos( gagross*w ) + b1*sin( gagross*w ):
gagross=sumw( gagross , grkor_0 , hilf3 , hilf4 )

grerra=sumw( gagross , -gamma )           ;Fehlerwinkel
hilf1=abs( grerra )
grerrg=t1( hilf1 , 0.15 )                 ;geglatteter Fehlerwinkel

if wechsel=null then           ;gagross von 8 Sequenzen speichern
  if grok=null then
    wia8=sumw( wia7 )
    wia7=sumw( wia6 )
    wia6=sumw( wia5 )
    wia5=sumw( wia4 )
    wia4=sumw( wia3 )
    wia3=sumw( wia2 )
    wia2=sumw( wia1 )
    wia1=sumw( gagross )
  endif
endif

endif
;*****

```

```

;Die Kleinsignal- INFORM-Sequenz
;*****
if klsig=eins then

    inf(pwmoff)                ;Sperren der PWM, freigabe fuer Pulsmuster

    switch=sumw(switch , eins)  ;die Variable switch um 1 inkrementieren
    if switch>zwei then        ;u=0; v=1; w=2
        switch=sumw( null)
    endif

;INFORM-Schuss in Strang U
;*****
if switch=null then
    if utogg=eins then          ;Schussrichtung festlegen , abwechselnde Schussequenz
        utogg=sumw(meins)

        schusp=sumw( uplus )
        schusm=sumw( uminus )

        $ call kl_inf           ;INFORM-Schussprogramm fuer Kleinsignal aufrufen

        iupdiff=sum(- hilf1 , hilf2)  ;Stromaenderung berechnen
        iumdiff=sum( hilf3 ,- hilf4)

    else
        utogg=sumw(eins)              ;Schussequenz umdrehen

        schusp=sumw( uminus )
        schusm=sumw( uplus )

        $ call kl_inf           ;INFORM-Schussprogramm fuer Kleinsignal aufrufen

        iumdiff=sum( hilf1 ,- hilf2)  ;Stromaenderung berechnen
        iupdiff=sum(- hilf3 , hilf4)

    endif
endif

;INFORM-Schuss in Strang V
;*****
if switch=eins then
    if vtogg=eins then        ;Schussrichtung festlegen , abwechselnde Schussequenz
        vtogg=sumw(meins)

        schusp=sumw( vplus )
        schusm=sumw( vminus )

        $ call kl_inf           ;INFORM-Schussprogramm fuer Kleinsignal

        ivpdiff=sum(- hilf1 , hilf2)  ;Stromaenderung berechnen
        ivmdiff=sum( hilf3 ,- hilf4)

    else
        vtogg=sumw(eins)            ;Schussequenz umdrehen

        schusp=sumw( vminus )

```

```

        schusm=sumw(vplus)

        $ call kl_inf

        ivmdiff=sum(hilf1,-hilf2) ;Stromaenderung berechnen
        ivpdiff=sum(-hilf3,hilf4)

    endif
endif

;INFORM-Schuss in Strang W
;*****
if switch=zwei then
    if wtogg=eins then ;Schussrichtung festlegen, abwechselnde Schussequenz
        wtogg=sumw(meins)

        schusp=sumw(wplus)
        schusm=sumw(wminus)

        $ call kl_inf

        iwmdiff=sum(-hilf1,hilf2) ;Stromaenderung berechnen
        iwmdiff=sum(hilf3,-hilf4)

    else
        wtogg=sumw(eins) ;Schussequenz umdrehen

        schusp=sumw(wminus)
        schusm=sumw(wplus)

        $ call kl_inf

        iwmdiff=sum(hilf1,-hilf2) ;Stromaenderung berechnen
        iwmdiff=sum(-hilf3,hilf4)

    endif
endif
endif

    inf(pwmfrei) ;PWM und Interrupts wieder freigeben
    $ eint
endif
;*****

;Beginn der Informauswertung
;*****

argoff=konst(0)
argstg=konst(-3.5)
argwstg=konst(2)
omgrenz=konst(0.1)

iudiff=sum(-iupdiff,-iumdiff) ;hier alle subtrahieren, da inorm negativ
ivdiff=sum(-ivpdiff,-ivmdiff)
iwdiff=sum(-iwmdiff,-iwmdiff)

ivreal=multf(ivdiff,mhalb)
hilf1=sumw(-wdhalb)
ivimag=multf(ivdiff,hilf1)

```

```

iwreal=multf(iwdiff,mhalb)
iwimag=multf(iwdiff,wdhalb)

creal_r=sum(iudiff,ivreal,iwreal) ; Kleinsignal
cimag_r=sum(ivimag,iwimag)
;

hilf1=abs(omega)
if hilf1>omgrenz then
    crealoffs=t1(creal_r,3,0.01416)
    cimagoffs=t1(cimag_r,3,-0.00488)
endif

creal=sum(creal_r,-crealoffs)
cimag=sum(cimag_r,-cimagoffs)

arg_i=t1(ii_q,0.0028) ; Winkelkorrektur Strom- u Drehzahlabh
hilf1=sumw(omega)

if kosflag=zwei then
    hilf1=sumw(omdachi)
endif

arg_w=t1(hilf1,0.003)

hilf1=atan(cimag,creal)
hilf2=sumw(hilf1,argoff) ; offset
hilf3=mult(arg_i,argstg) ; stromabhaengiger Offset
hilf4=mult(arg_w,argwstg) ; drehzahlabhaengiger Offset
hilf4=sum(hilf4,hilf4,hilf4) ; noetig, da w_m mal 18,5
hilf1=sumw(hilf2,hilf3)
arg=sumw(hilf1,hilf4) ;INFORM-Rohwinkel-Kleinsignal
;*****

;Beobachter fuer INFORM ermittelt elektr. Lage und mech. Istdrehzahl
;*****

kalli=konst(0.03) ;Gewichtungsfaktor fuer Omega
kal2i=konst(0.3) ;Gewichtungsfaktor fuer Winkel

edgfakt=konst(0.3927) ;pi/8
achtdpi=konst(2.5465) ;8/pi

zgsterni=sumw(gsterni,gsterni)
diffi=sumw(arg,-zgsterni) ; in Hansl

differi=multf(diffi,edgfakt) ; in Radiant
hilf1=multf(differi,kalli)
omdachi=sum(osterni,hilf1)

hilf1=multf(diffi,kal2i)
gadachi=sumw(gsterni,hilf1) ; in Hansl

osterni=sum(omdachi) ;Voraussage omega
hilf2=multf(azzeit,omdachi)
hilf3=multf(hilf2,achtdpi)
gsterni=sumw(hilf3,gadachi) ;Voraussage gamma

;gadachi elektrische Lage des Rotors
;omdachi mechanische Istdrehzahl der Rotors

```

```

bi_fehl=sumw(gamma,-gadachi)           ;Beobachter-Fehlerwinkel
kl_fehl=sumw(zgamma,-arg)              ;Kleinsignal-Fehlerwinkel

if stat_go=eins then                  ;Statistik fuer Kleinsignalfehler
  ramdat=sumw(gamma)                   ;gamma ins RAM schreiben

  $ call ram_wr

  ramdat=sumw(kl_fehl)                  ;kl_fehl ins RAM schreiben

  $ call ram_wr

  if ram_of=eins then                  ;wenn rammax erreicht ist, dann
    stat_go=sumw(null)                  ;keine neuen Werte mehr ins RAM schreiben
  endif
endif

hilf1=abs(kl_fehl)
kl_fehlg=t1(hilf1,0.15)

; Startposition mit Grosssignal, anschliessenderder Betrieb mit Kleinsignal
;*****
is_dkls=konst(0.7)                      ;Sollstrom in d-Richtung
w_start=konst(0)                        ;Solldrehzahl
zaehler1=konst(0FF4h)                   ;12 * 1.398ms
zaehler2=konst(0FDDh)                   ;35 * 1.398ms
if freigabe=eins then
  if frei_n=null then                  ;Den Drehzahlregler nicht freigeben
    grsig=sumw(eins)                   ;Grosssignalstartposition bestimmen
    schuss=sumw(eins)
    zaehler1=sum(zaehler1,ink)
  if zaehler1>eins then                 ;sind 16.78 ms erreicht, dann ist in alle
    grsig=sumw(null)                   ;drei Phasen einmal geschossen worden
    klsig=sumw(eins)                   ;Kleinsignal freigeben
    is_d=sumw(is_dkls)
    zaehler2=sum(zaehler2,ink)
  endif
  if zaehler2>eins then                 ;Nach 50ms Drehzahlregler freigeben
    frei_n=sumw(eins)
    w_0=sumw(w_start)                   ;mit w_start drehen
    hilf1=sumw(gagross,-gadachi)        ;Beobachter mit Grosssignalwinkel korrigieren
    hilf1=abs(hilf1)
    if hilf1 > vier then
      gsterni=sumw(gsterni,acht)
    endif
  endif
endif
endif
endif

; Beobachter fuer Drehzahl
;*****
kal2e=konst(0.08)
hilf1=sumw(gamma,-gaemk)
hilf2=multf(hilf1,edgfakt)
hilf3=multf(hilf2,kal2e)
omega=sum(omega,hilf3)
hilf1=multf(achtdpi,azzeit)
hilf2=multf(hilf1,omega)

```

```

gaemk=sumw(gamma, hilf2)

; Beschleunigung mit Grosssignalwinkel als Startposition
;*****
iqmax=konst(0.2)
z_iqi=konst(0fdch) ;36*1,398ms=50ms
z_schi=konst(00fcah) ;54*1,398ms=75,492ms
if go=eins then ;wenn go=eins , dann 75ms lang schiessen
  z_sch=sumw(z_sch,ink) ;um 1h inkrementieren
  schuss=sumw(eins)
  if z_sch>=eins then
    schuss=sumw(null)
    if z_sch_e=sumw(null) then ;nachdem alle Schuesse absolviert wurden
      w1=sumw(wia8) ;Erfolgt eine Mittelung von GAGROSS
      w2=sumw(wia7) ;ueber 8 gesamte Messungen

  $ call wimittel
  hilf1=sumw(wimw)

  w1=sumw(wia6)
  w2=sumw(wia5)

  $ call wimittel
  hilf2=sumw(wimw)

  w1=sumw(wia4)
  w2=sumw(wia3)

  $ call wimittel
  hilf3=sumw(wimw)

  w1=sumw(wia2)
  w2=sumw(wia1)

  $ call wimittel
  hilf4=sumw(wimw)

  w1=sumw(hilf1)
  w2=sumw(hilf2)

  $ call wimittel
  hilf1=sumw(wimw)

  w1=sumw(hilf3)
  w2=sumw(hilf4)

  $ call wimittel
  hilf2=sumw(wimw)

  w1=sumw(hilf1)
  w2=sumw(hilf2)

  $ call wimittel
  gagross=sumw(wimw) ;der gemittelte Grosssignalwinkel GAGROSS

  gafehl=sumw(gagross,-gamma) ;Fehlerwinkel der Startposition
  z_sch_e=sumw(eins)
  ramdat=sumw(gagross) ;gagross ins RAM schreiben
  $ call ram_wr

```

```

    ramdat=sumw(gafehl)           ;gafehl ins RAM schreiben
    $ call ram_wr

    $ dint                       ;Interrupt disable

    cosgamma=cos(gagross)        ;Rotor mit Startwinkel weiterdrehen
    singamma=sin(gagross)
    is_q=sumw(iqmax)             ;mit q-Strom iqmax
    $ eint
endif

z_iq=sumw(z_iq,ink)             ;fuer 50ms Rotor mit iqmax beschleunigen
if z_iq>=eins then
    is_q=sumw(null)             ;danach iq null vorgeben
    omend=sumw(omega)
    go=sumw(null)               ;Messung beenden

    ramdat=sumw(omend)          ;Endgeschwindigkeit ins Ram schreiben
    $ call ram_wr

    if ram_of=eins then        ;wenn gewuenschte Anzahl der Messungen
        auto=sumw(null)        ;durchgefuehrt, dann Messreihe beenden
    endif
endif
endif
else                           ;zu Beginn jeder Messung neu initialisieren
    z_iq=sumw(z_iqi)
    z_sch=sumw(z_schi)
    z_sch_e=sumw(null)
    is_q=sumw(null)
    cosgamma=sumw(null)
    singamma=sumw(null)
endif

z_auti=konst(0bcfh)             ;alle 1,5s eine Messung gestartet
if auto=eins then              ;Variable auto startet Messung
    z_aut=sumw(z_aut,ink)

    if z_aut>=eins then        ;nach 1.5s Messung starten
        z_aut=sumw(z_auti)
        go=sumw(eins)
        ramdat=sumw(gamma)     ;gamma ins RAM schreiben

        $ call ram_wr

    endif
else
    z_aut=sumw(z_auti)          ;initialisieren
endif

; Stoervorgabe
;*****
istoer=konst(0)

hilf1=iw(frequ_i,0.005,eins,0)

; hilf2=abs(hilf1)             ; Rampenstrom
; hilf2=sum(hilf2,-vier)
; hilf2=p(hilf2,0.25)

```

```

hilf2=sign(hilf1) ; Rechteckstrom

isstoer=mult(hilf2, istoer)
;*****

; Drehzahlvorgabe
;*****
w_0=konst(0)
frequ_w=konst(3)
hilf1=iw(frequ_w, 0.1, eins, 0) ;Drehzahl mit Frequenz aendern
hilf2=sign(hilf1)
w_aa=mult(hilf2, w_a)

w_s=sum(w_0, w_aa) ; Solldrehzahl

; Drehzahlregler
;*****
iqmax=konst(0.75) ;q-Strom Begrenzung
kp_nreg=konst(0.5) ;Variable fuer p-Anteil Drehzahlregler
ki_nreg=konst(0.3) ;Variable fuer i-Anteil Drehzahlregler

w_d=sum(w_s, -omega) ;Differenz Soll- Istdrehzahl
if kosflag=zwei then ;umschalten auf Beobachterwinkel
    w_d=sum(w_s, -omdachi)
endif

w_di=multf(w_d, w_aus) ; AntWindUp
w_di=multf(w_di, i_aus)
w_di=multf(w_di, frei_n)

mi_ph=p(w_d, 5, kp_nreg) ;p-Anteil Drehzahlregler
mi_ih=i(w_di, 0.008, ki_nreg) ;i-Anteil Drehzahlregler
mi_h=sum(mi_ph, mi_ih) ;p- und i-Anteil zusammenfuehren

;is_q=sum(mi_h, isstoer)
is_d=konst(0)

; Beschleunigen mit konstanten Strom
;*****
omnull=konst(0.2) ;maximale Drehzahl
is_qb=konst(0.4) ;q-Strom Vorgabe
if omega>omnull then ;Drehzahl abfragen
    is_qv=sumw(-is_qb)
endif
hilf1=sumw(-omnull) ;Drehrichtung aendern
if omega<hilf1 then
    is_qv=sumw(is_qb)
endif
iq_tg=konst(0.25)
is_q=t1(is_qv, 0.01, iq_tg) ;glaetten des Stromes

is_q=multf(is_q, frei_n) ;Drehzahlfreigabe

w_aus=sumw(eins)
if is_q>iqmax then ;q-Strom - Begrenzung

```

```

    is_q=sumw(iqmax)
    w_aus=sumw( null)
endif
hilf1=sumw(-iqmax)
if is_q<hilf1 then
    is_q=sumw( hilf1)
    w_aus=sumw( null)
endif

; Vorgabe des Modellwinkels
;*****
if kosflag=null then                ;Lagegeber als Modellwinkel
    modwink=sumw(gamma)
endif

if kosflag=eins then
    modwink=sumw(psim_ae)            ;EMK-Modell als Modellwinkel
endif

if kosflag=zwei then
    modwink=sumw(gadachi)           ;Kleinsignal INFORM als Modellwinkel
endif

cosgamma=cos(modwink)
singamma=sin(modwink)

$ b softaug

; Mittelwertbildung des Grosssignal – Winkels gagross
;*****
$wimittel:nop

wimw=sumw(wi1,-wi2)                ;Mittelwert von jeweils zwei Winkel
wimw=p(wimw,0.5)
wimw=sumw(wi1,-wimw)               ;wimw wird zurueckgegeben

$ret

; Daten in ramdat werden ins RAM geschrieben ,
; ramadr.–Pointer wird automatisch inkrementiert
; ram_of wird eins , wenn ramadr.–Pointer am max
;*****
$ram_wr:nop

$ dint

$ clrc sxm
$ lacc [ramadr]                    ; ramadr=sum(ramadr ,ink)
$ add [ink]
$ sacl [ramadr]
$ lacc [ramstart]                  ; hilf1=sum(ramstart , ink)
$ add [ink]
$ sacl [hilf1]
$ sxxm

$ eint

```

```

if ramadr<hilf1 then
    ramadr=sumw(hilf1)
endif

$ LAR AR0,[ramadr]
$ MAR *,AR0
$ LACL [ramdat]
$ SACL *

ram_of=sumw(null)

if ramadr>=rammax then
    ram_of=sumw(eins)
endif

$ret

; Grosssignalschuss fuer alle drei Straenge gleich,
; jedoch nur noch einmal ausprogrammiert
;*****
$gr_inf:nop

    inf(pwmoff)
    delay(4)
    inf(schusp)
    delay(74)

    $ call gr_mwi           ;Mittelwertbildung ueber 8 Strommessungen
    ig1=sumw(igx)

    delay(103)

    $ call gr_mwi
    ig2=sumw(igx)

    delay(5)
    inf(schusm)
    delay(10)

    $ call gr_mwi
    ig3=sumw(igx)

    delay(103)

    $ call gr_mwi
    ig4=sumw(igx)

    delay(139)

    $ call gr_mwi
    ig5=sumw(igx)

    delay(103)

    $ call gr_mwi
    ig6=sumw(igx)

    delay(5)
    inf(schusp)
    delay(10)

```

```

    $ call gr_mwi
    ig7=sumw(igx)

    delay(103)

    $ call gr_mwi
    ig8=sumw(igx)

    delay(69)
    inf(pwmoff)

; Auswertung Strang X
; insgesamt nur 4 Strommittelwerte fuer INFORM-Auswertung
;*****

;ig1=shra(ig1,4)
;ig2=shra(ig2,4)
;ig3=shra(ig3,4)
;ig4=shra(ig4,4)
;ig5=shra(ig5,4)
;ig6=shra(ig6,4)
;ig7=shra(ig7,4)
;ig8=shra(ig8,4)
ig3=sumw(null)           ;Strommittelwert Ig3 wird geloesch
ig4=sumw(null)           ;Strommittelwert Ig4 wird geloesch
ig7=sumw(null)           ;Strommittelwert Ig7 wird geloesch
ig8=sumw(null)           ;Strommittelwert Ig8 wird geloesch
                        ;die restlichen 4 Strommittelwerte
                        ;gehen in die Grosssignal - Rechnung ein

$ ret

; Stromsensoren richtig einlesen fuer jeweiligen Strang - Grosssignal
;*****
$gr_infm:nop             ;richtigen Stromsensor fuer richtigen
if langsam=null then   ;Strang nehmen; ausserdem umschalten

    if wechsel=null then   ;zwischen Strommessung mit internen
        igrmess=in(a1)       ;Sensoren und
    endif

    if wechsel=eins then
        igrmess=in(a2)
    endif

    if wechsel=zwei then
        igrmess=in(a3)
    endif

else
                                ;externen Stromsensoren fuer die
    if wechsel=null then     ;langsame Strommessung mit
        igrmess=in(a4)       ;Butterworthfilter
    endif

    if wechsel=eins then
        igrmess=in(a5)
    endif

```

```

    if wechsel=zwei then
        igrmess=in(a6)
    endif

endif

igrmess=shra(igrmess,4)      ;die untersten 4Bits verwerfen

$ ret

; 8-fach Strommessung mit anschliessender Mittelwertbildung; Dauer 24µs
;*****
$gr_mwi:nop                ;Mittelung der Strommessung ueber
;zwei=out(a1)              ;8 hintereinander folgenden Strommesswerten

$ call gr_infm
igrmess=sumw(igrmess)

$ call gr_infm
igrmess=sum(igrmess,igrmess)

igrmess=shra(igrmess,3)

; null=out(a1)
$ ret

; Kleinssignal-INFORM-Schussesequenz fuer alle drei Straenge gleich
; jedoch nur noch einmal ausprogrammiert
;*****
$kl_inf:nop
    inf(schusm)            ;Vorschuss
    delay(56)

    inf(schusp)           ;vorgegebene Richtung schiessen
    delay(8)
    $ call kl_mwi
    hilf1=sumw(igrmess)   ;1. Strommessung
    delay(90)
    $ call kl_mwi
    hilf2=sumw(igrmess)   ;2. Strommessung
    delay(7)

```

```

        inf(schusm)           ; vorgegebene Richtung schießen
        delay(8)
        $ call kl_mwi
        hilf3=sumw(igx)      ; 3. Strommessung
        delay(90)
        $ call kl_mwi
        hilf4=sumw(igx)      ; 4. Strommessung
        delay(7)

        inf(schusp)         ; Nachschuss
        delay(56)
        inf(pwmoff)

$ ret

; Stromsensoren richtig einlesen fuer jeweiligen Strang – Kleinsignal
;*****
$kl_infm:nop
if langsam=null then           ; Stromsensoren fuer schnelle Strommessung

    if switch=null then
        iklmess=in(a1)
    endif

    if switch=eins then
        iklmess=in(a2)
    endif

    if switch=zwei then
        iklmess=in(a3)
    endif

else
        ; Stromsensoren fuer Strommessung mit
        ; Butterworthfilter

    if switch=null then
        iklmess=in(a4)
    endif

    if switch=eins then
        iklmess=in(a5)
    endif

    if switch=zwei then
        iklmess=in(a6)
    endif

endif

iklmess=shra(iklmess,4)
$ ret

; 4-fach Strommessung mit anschliessender Mittelwertbildung; Dauer:12µs
;*****
$kl_mwi:nop           ; Mittelung der Strommessung im Kleinsignal-INFORM
;zwei=out(a1)        ; ueber 4 hintereinander folgende Strommesswerte

$ call kl_infm
igx=sumw(iklmess)

```

```

$ call kl_infm
igx=sum(igx , iklmess)

$ call kl_infm
igx=sum(igx , iklmess)

$ call kl_infm
igx=sum(igx , iklmess)

igx=shra(igx , 2)

; null=out(a1)
$ ret

$softaug:nop
;*****
;Hier beginnen die Standardzeilen fuers Softauge und fuers RAM-Schreiben-Lesen

$ LDP    #7
$ MAR    *,AR3
$ LAR    AR3,116
$ LDP    #4
$ LACC   *
$ SACL   [ hilf1 ]
hilf1 = mult(hilf1 , zoomfaktor1)
hilf1 = out(a1)

$ LDP    #7
$ MAR    *,AR3
$ LAR    AR3,117
$ LDP    #4
$ LACC   *
$ SACL   [ hilf1 ]
hilf1 = mult(hilf1 , zoomfaktor2)
hilf1 = out(a2)

$ LDP    #7
$ MAR    *,AR3
$ LAR    AR3,118
$ LDP    #4
$ LACC   *
$ SACL   [ hilf1 ]
hilf1 = mult(hilf1 , zoomfaktor3)
hilf1 = out(a3)

$ LDP    #7
$ MAR    *,AR3
$ LAR    AR3,119
$ LDP    #4
$ LACC   *
$ SACL   [ hilf1 ]
hilf1 = mult(hilf1 , zoomfaktor4)
hilf1 = out(a4)

;Ende Standardzeilen
;*****

```

B.2 Das MATLAB Programm für die Statistik

```

for i=0:10000
    testin(i+1,1)=hex2hansl(test((i*2+1),2))*360/16;
    testin(i+1,2)=hex2hansl(test((i*2+2),2))*360/16/2;
end
test_sort=sortrows(testin);
figure;
plot(test_sort(:,1),test_sort(:,2),'x');

mittel=mean(testin(:,2))
standard=std(testin(:,2))

figure;
b=testin(:,2);
nbins=50;
[n,xbin]=hist(b,nbins);

dif=max(b)-min(b);
faktor=nbins/dif; % Umrechnungsfaktor fuer Prozentausgabe.

n=n*faktor/length(b);
plot(xbin,n,'k','LineWidth',1.5); % Zeichnet die Wahrscheinlichkeitsverteilung.

hold on;

x=(-3*standard+mittel:0.1*standard:3*standard+mittel);
y = normpdf(x,mittel,standard);

plot(x,y,'k:'); % Zeichnet die Normalverteilung darueber.

disp('ans=mittel___standard');
h = [mittel standard];

grid;

x1='Mittelwert=';
x2=',Standardabweichung=';
x3='Grad-el';
xlabel([x1 num2str(mittel,'%4.2f') x3 x2 num2str(standard,'%4.2f') x3]);

axis auto %([-50,50,0,0.14]);
hold off;

```

C Datenblatt des Umrichters

VA TECH ELIN EBG Elektronik

Vier Quadranten Spannungszwischenkreis-Umrichter
Four-Quadrant-Voltage-Source-Converter

Type/Type	IRIS U33C	
Baunorm/Construction Standard	EN 50178, DIN/VDE 0558	
Schutzart/Degree of Protection	IP23	
Klimaklasse/Climatic category	LYG	
Eingang (Netzseite): <i>Input(mains):</i>		
-Netzspannung/ <i>Mains voltage</i>	3 x 480	V ± 10%
-Netzfrequenz/ <i>Mains frequency</i>	60	Hz ± 1%
-Strom/ <i>Current</i>	400	A
-Leistungsfaktor (cosφ)/ <i>Power factor (cosφ)</i>	1	
-Bemessungs-Ausschaltvermögen(Hauptschalter)/ <i>Misted interrupting rating (mains switch)</i>	65	A
Ausgang: <i>Output:</i>		
-Spannung/ <i>Voltage</i>	3 x 0 bis/ to 500	V
-Frequenz/ <i>Frequency</i>	0,5 bis/ to 300	Hz
-Strom/ <i>Current</i>	460	A
Verlustleistung im Nennpunkt/ <i>power loss at nominal point</i>	ca./ approx. 17	kW
Maximale Einschalthäufigkeit der APA/ <i>maximum starting frequency of APA</i>	5	x/5min
Kühlluftmenge/ <i>Cooling-air rate</i>	ca./ approx. 5500	m ³ /h
Statischer Druck/ <i>Static Pressure</i>	ca./ approx. 600	Pa
Anschlussbolzen Ausgang/ <i>electrical terminal output</i>	3x2xNS 240/S UKH + 1 x M10 (PE)	
Anschluss Netz/ <i>Mains terminal connection</i>	3-#3/0-500 MCM + 1 x M10 (PE)	
Isolationsklassen/ <i>Insulation classes</i>		
-Transformator/ <i>Mains transformer</i>		F
-Drossel Netz/ <i>Mains choke</i>		F
-Drossel Ausgang/ <i>Mains output</i>		F
Gewicht/ <i>Weight</i>	ca./ approx. 1205	kg
Aufstellungshöhe/ <i>Site elevation</i>	≤ 1000	m NN
Umgebungstemperatur im Betrieb/ <i>Ambient temperature during operation</i>	+5 bis/ to +45	oC
Lagerungstemperatur in verpacktem Zustand und wenn kein Kondenswasser auftritt/ <i>Storage temperature of packed equipment, without occurrence of condensed water</i>	-20 bis/ to +65	oC

D Die Software DADA

Umschalten des netzseitigen Umrichterbetriebs

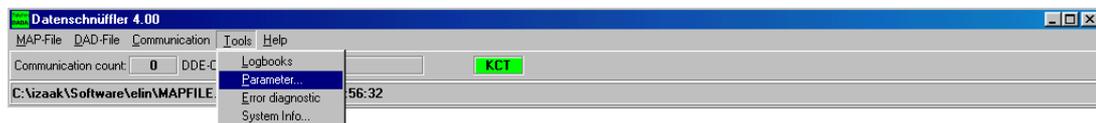
Der netzseitige Umrichter kann sowohl als einfacher Diodengleichrichter mit einer resultierenden Zwischenkreisspannung von 565V, sowie als Pulsumrichter bei einer einstellbaren Zwischenkreisspannung von 770V (mittels Hochsetzsteller) betrieben werden. Zur Umschaltung zwischen Dioden- und Hochsetzbetrieb steht die Software DADA32.exe zur Verfügung. Es soll nun erläutert werden, wie der Betriebsmodus des netzseitigen Umrichters mit der genannten Software umgestellt werden kann. Die Verbindung zwischen Umrichter und PC erfolgt über die serielle Schnittstelle mittels eines Nullmodemkabels.

Bei Starten des Programms DADA32 öffnet sich folgende Oberfläche:

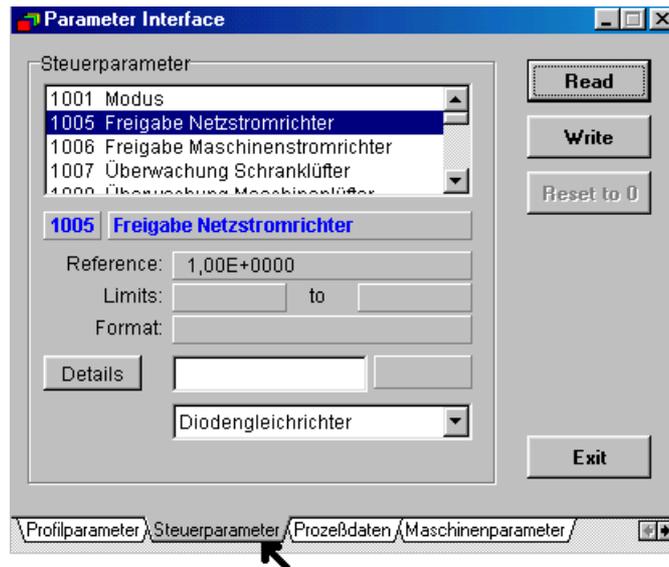


Durch eine Doppelklick auf den roten Button **KCT** wird die Kommunikation aufgebaut. Ändert die Farbe des Buttons anschließend auf grün, signalisiert das eine erfolgreiche Verbindung.

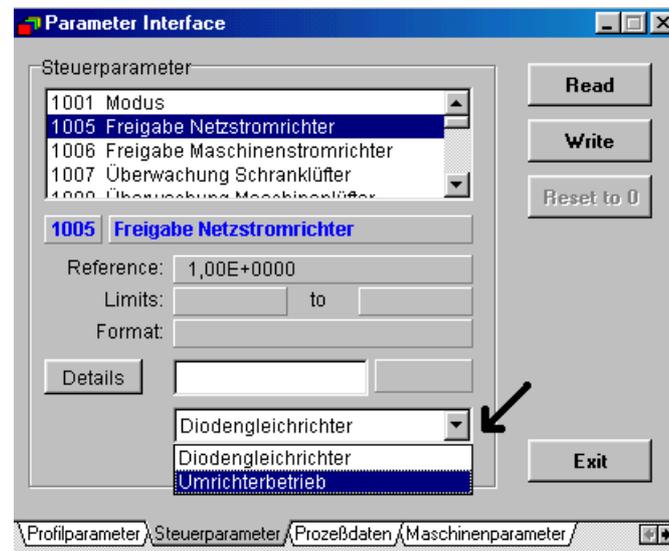
In weitere Folge wird unter dem Menüeintrag Tools → Parameter... das Parameter Interface aufgerufen



Es erscheint folgendes Fenster:



Hier muss nun am unteren Fensterrand die Karteikarte **Steuerparameter** ausgewählt werden. Der Steuerparameter **1005 Freigabe Netzstromrichter** gibt Auskunft über den aktuellen Netzstromrichter und legt den Betriebsmodus fest. Mit dem Button **Read** kann der vorherrschende Umrichterbetrieb ausgelesen werden.



In dem DropDown-Menü kann der gewünschte Betrieb des Netzstromrichters eingestellt werden. Durch betätigen des Buttons **Write** wird die Auswahl in den Umrichter übertragen und der Netzstromrichter dementsprechend eingestellt

