



Forschungs- und  
Entwicklungszentrum  
Fachhochschule Kiel GmbH



FACHHOCHSCHULE KIEL  
University of Applied Sciences



EKSH

Gesellschaft für Energie und  
Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH

# Sachbericht

für das Projekt

„Entwicklung einer Netzeinspeisung zum Betrieb von zwei  
Windkraftgeneratoren an einem Umrichter“

Förderkennzeichen: 8/12-17

Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.08.2017

# 1 Kurzfassung

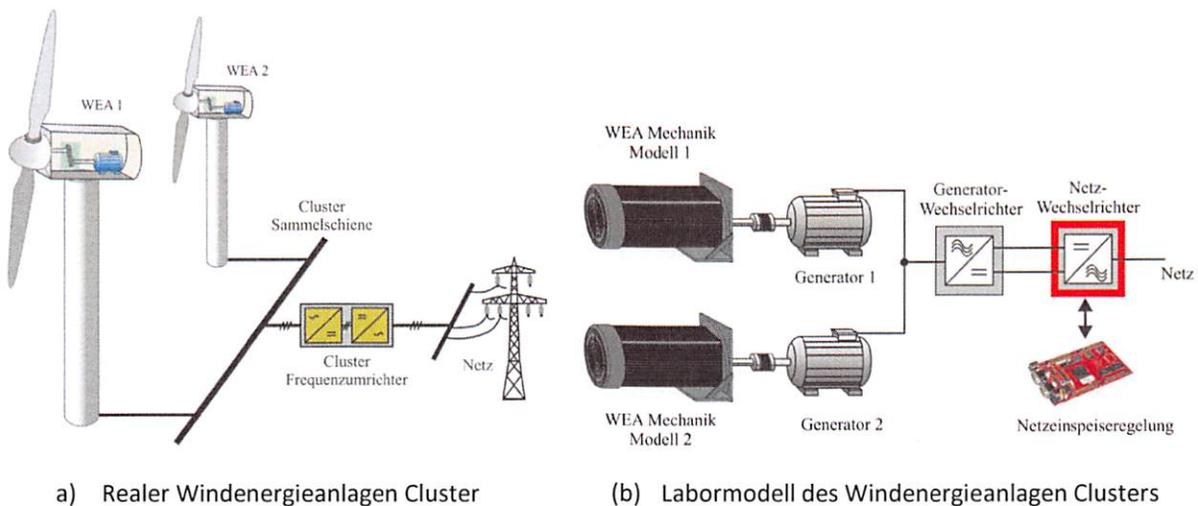
## 1.1 Zielstellung

### Ausgangssituation

In dem von der WTSH geförderten Projekt „Windenergieanlagen Cluster (WEAC)“ wurde an der Fachhochschule Kiel ein Regelungsverfahren zum Betreiben von zwei Asynchrongeneratoren an einem Frequenzumrichter entwickelt (Bild a). Der Schwerpunkt des bisherigen Projektes lag auf der Entwicklung eines Regelungsverfahrens der beiden Generatoren. In diesem Rahmen wurden unterschiedliche Regelungsverfahren untersucht und letztendlich praktisch am Prüfstand erprobt.

### Projektziele

Im Rahmen des EKSH geförderten Projektes war eine Entwicklung und Realisierung einer Netzeinspeisung für die vorhandene Generatorregelung von zwei Windkraftanlagen an einem Umrichter vorgesehen. Die zu entwickelnde Regelung soll nicht nur die Einspeiseenergie der beiden Windenergieanlagen regeln, sondern auch die Netzstützung bei Netzausfällen ermöglichen. Im Projektverlauf soll eine frei programmierbare netzseitige Einspeiseeinheit mit dazugehörigen Komponenten entwickelt und aufgebaut werden (Bild b, rote Markierung). Als weiteres soll eine Einrichtung zur Netzeinbruchsimulation für den Prüfstand realisiert werden. Die benötigten Komponenten und Einrichtungen werden zum größten Teil neu entwickelt und aufgebaut. Zum Schluss soll das Gesamtsystem, bestehend aus Generator- und Netzeinspeiseregulation, getestet werden.



## 1.2 Realisierte Ergebnisse

Die wesentlichen Ziele konnten zum Projektende erreicht werden.

Zusammengefasst wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Verschiedene Regelungskonzepte zur Netzeinspeisung wurden analysiert.
- Einfache Netzeinspeisung wurde entwickelt und umgesetzt.
- Ein Frequenzumrichter zur vorgesehenen Netzeinspeisung wurde entwickelt und aufgebaut.
- Anforderungen zur Netzstützung wurden analysiert und ein regelungstechnisches Modell entwickelt.
- Ein Simulator zum Netzeinbruch wurde entwickelt und aufgebaut.
- Die Regelung zur Netzstützung wurde auf einem Mikrocontroller umgesetzt und getestet.
- Die Einspeiseregulation wurde an einem Generator-Prüfstand verifiziert.

Es wurde ein lauffähiges Regelungsmodell zur Netzstützung entwickelt und dieses an einem Prüfstand verifiziert. Abweichend von den geplanten praktischen Tests an dem großen Prüfstand wurden diese Tests an einem kleinen Prüfstand durchgeführt. Die entwickelten und aufgebauten leistungselektronischen Systeme vervollständigen den bereits vorhandenen Windkraftanlagen-Prüfstand. Dieser Prüfstand kann weiter sowohl in der Lehre als auch zu Prüfzwecken von Dritten eingesetzt werden.

## 2 Projektverlauf

Im Folgenden wird anhand der einzelnen Arbeitspakete der Projektverlauf dargestellt.

### 2.1 AP1: Konzeptkonkretisierung

Die Netzeinspeisung wird bei allen Stromerzeugungsanlagen, die an das Gesamtverbundnetz angeschlossen sind, umgesetzt. Dazu gehören unter anderem Windkraft-, Photovoltaik-, Biomassegas-, Hausmüllverbrennungs- und Wasserkraftanlagen.

Um die Netzeinspeisung zu realisieren, wird die von der Erzeugungsanlage generierte Spannung zunächst in eine Dreiphasenspannung umgewandelt. Liegen die Spannungsphasen der Erzeugungsanlage und des Netzes synchron zu einander, so kann die Netzeinspeisung erfolgen. Der Amplitudenunterschied der Ausgangsspannung zu der Netzspannung verursacht den Stromfluss zwischen der Erzeugungsanlage und dem Gesamtnetz. Das Produkt der Netzspannung und des Stroms liefert die momentan umgesetzte Leistung.

Im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurden mögliche Regelungskonzepte für die Netzeinspeisung ausgearbeitet. So wurden Regelungskonzepte für den normalen Betrieb, also ohne Netzfehler und Netzeinspeisung mit fehlerhaften Netzbedingungen, analysiert. Es wurden Anforderungen an die Netzeinspeisung und das Umrichtersystem definiert.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Der Netzumrichter wurde dimensioniert.
- Die Steuer- und Überwachungselektronik des Netzumrichters wurde ausgelegt.
- Die für die Einspeiseregulation benötigten Messeinrichtungen zur Messung von Netzspannung und Strom wurden ausgelegt.
- Unterschiedliche Netzfilter wurden untersucht.
- Die benötigten Schutzeinrichtungen für das Betreiben des Netzumrichters im Labor wurden ausgelegt.
- Die Möglichkeit zur Kommunikation zwischen Generator-Wechselrichter und Netzumrichter wurde entwickelt.

### 2.2 AP2: Entwicklung und Test erster Simulationsmodelle für die Netzeinspeisung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde ein Matlab/Simulink Modell für eine „einfache“ Netzeinspeisung entwickelt, so dass eine Netzeinspeisung im normalen Betrieb möglich ist. Der normale Betrieb bedeutet, dass die Netzspannung konstant ist und die Regelung noch keine Reaktion auf Netzfehler bereitstellt.

Die folgende Abbildung zeigt die eingesetzte Regelung der einfachen Netzeinspeisung.

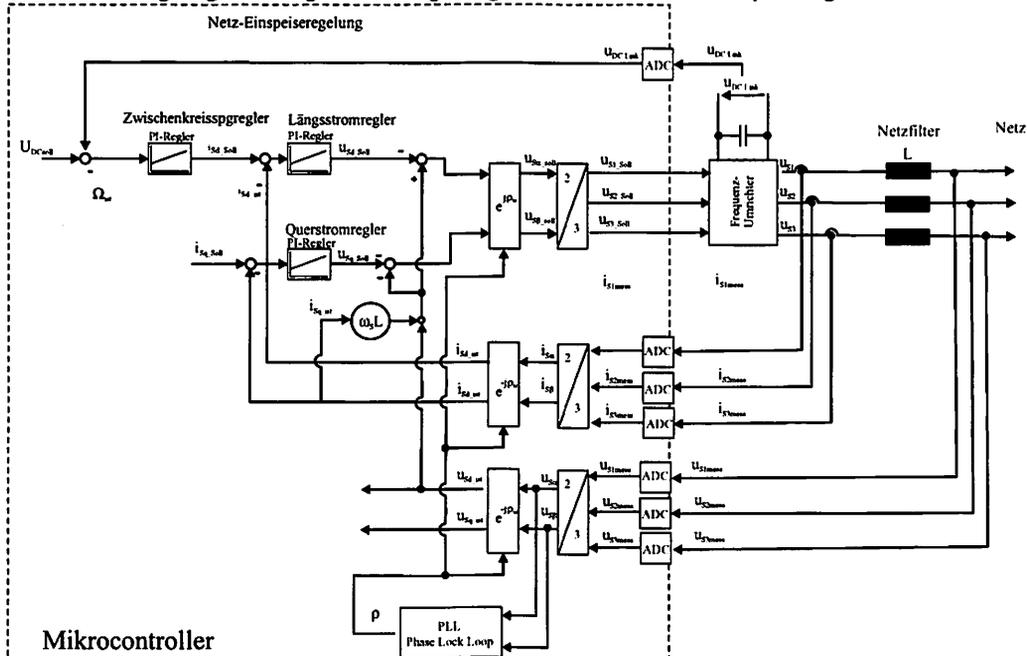


Abbildung 1: Regelungstechnisches Modell der einfachen Netzeinspeisung

Zum Testen der entwickelten Regelung wurde ein bereits vorhandener selbstentwickelter Frequenzumrichter, der in der folgenden Abbildung dargestellt ist, verwendet.

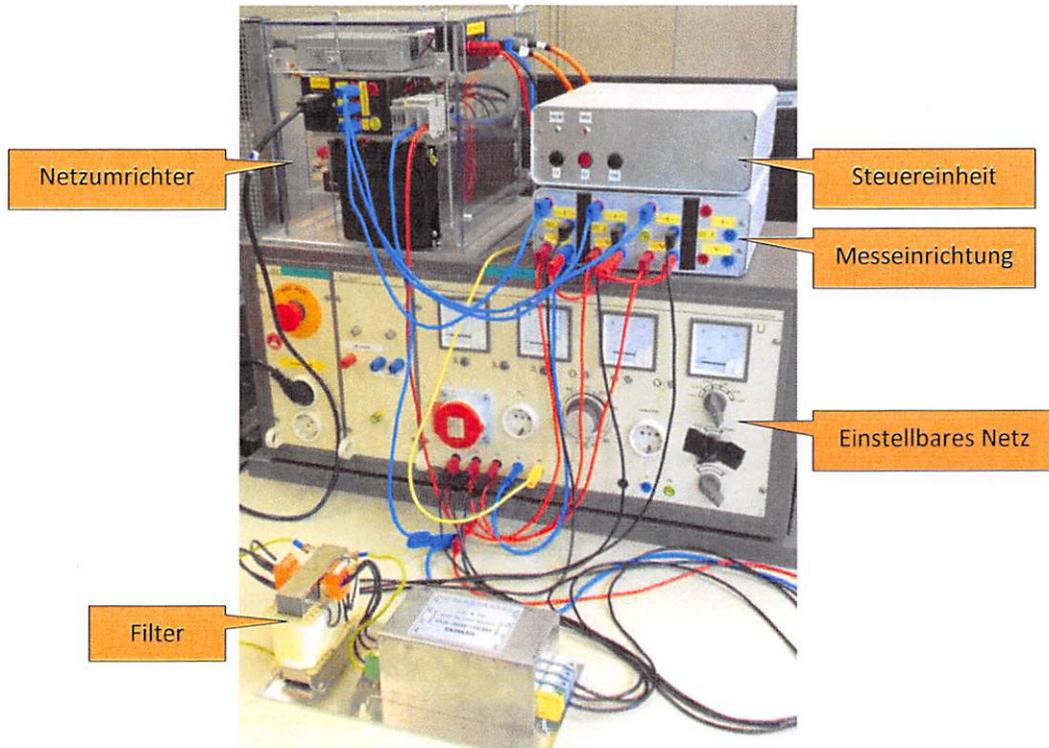


Abbildung 2: Prüfstands-aufbau zum Testen der einfachen Netzeinspeisung

Der vorhandene Frequenzumrichter musste minimal verändert und optimiert werden. Der Aufbau wurde um eine Messung des Stromes und der Netzspannung erweitert und der Netzfilter optimiert. Durch die durchgeführten Tests auf dem kleinen Prüfstand wurde die einfache Netzeinspeisung untersucht und das entwickelte Regelungsverfahren verifiziert.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Ein Regelungsmodell zur Netzeinspeisung in Matlab/Simulink wurde entwickelt.
- Das entwickelte Modell wurde zur Umsetzung auf einem Mikrocontroller angepasst.
- Der Regelungsalgorithmus wurde auf dem Mikrocontroller programmiert.
- Der vorhandene Umrichter wurde erweitert und optimiert.
- Eine zusätzliche Messung des Einspeisestroms und der Netzspannung wurde aufgebaut.
- Die Komponenten der Netzeinspeisung wurden an dem kleinen Prüfstand untersucht und entwickelte Regelungsverfahren verifiziert.

### 2.3 AP3: Aufbau und Inbetriebnahme des netzseitigen Umrichtersystems

Die ersten praktischen Tests der Netzeinspeisung wurden auf einem kleinen selbstentwickelten Frequenzumrichter getestet. Um die erzeugte Energie von vorhandenen Generatoren ins Netz zurück zu speisen, wird ein größerer netzseitiger Umrichter benötigt. Auf Basis des vorhandenen Prüfstandes mit zwei Generatoren wurde ein Umrichtersystem entwickelt und aufgebaut, der die generierte Energie der beiden Generatoren ins Netz einspeisen soll. Es wurden größtenteils die gleichen Elektronikschaltungen zum Steuern und Messen wie beim Generatorumrichter verwendet. In der Abbildung 3 ist ein prinzipieller Aufbau des netzseitigen Frequenzumrichters dargestellt und die Abbildung 4 zeigt den real aufgebauten Umrichter.

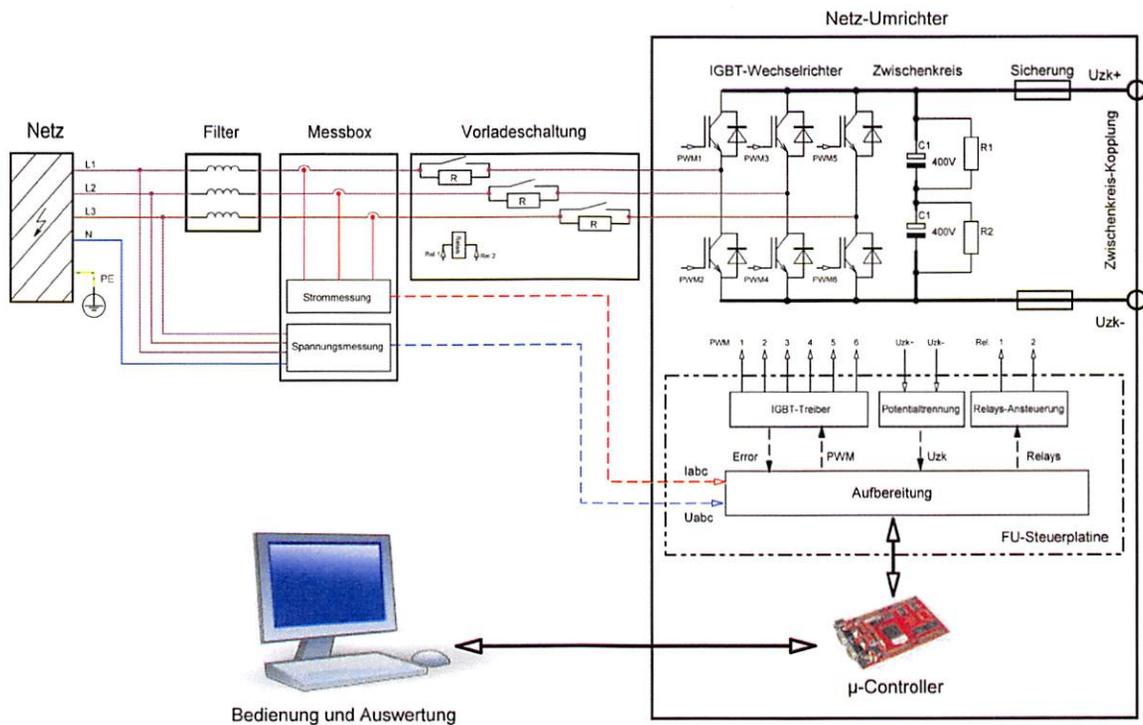
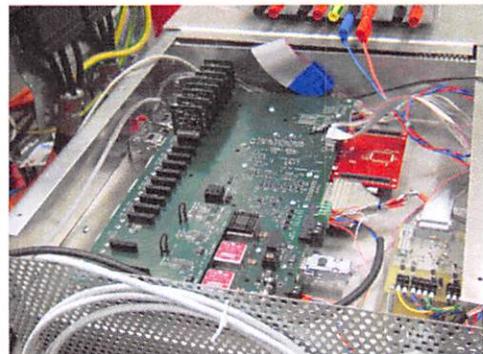


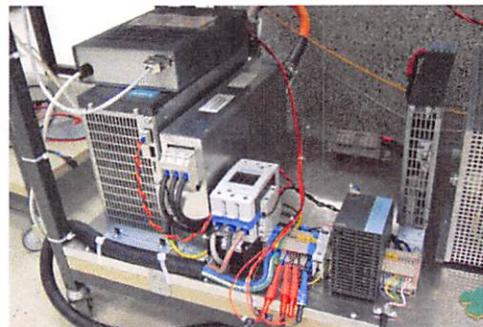
Abbildung 3: Schematischer Aufbau des netzseitigen Umrichters



Freiprogrammierbarer Netz-Einspeisenumrichter



Steuereinheit



Filter, Mess- und Schutzeinrichtungen

Abbildung 4: Entwickelter Netzumrichter zur Netzeinspeisung

Zur Regelung des Netzumrichters werden Strom- und Spannungsgrößen an dem Einspeisepunkt benötigt. Die Strommessung ist in dem Netzumrichter integriert und wird von der Steuerelektronik des Netzumrichters ausgewertet. Die Messung der Netzspannung musste neu entwickelt werden. Dazu wurden unterschiedliche Konzepte zur Spannungsmessung untersucht und ein geeignetes Verfahren ausgewählt.

Als weiteres wurde eine sogenannte Zwischenkreis-Vorladeschaltung realisiert. Diese Vorladeschaltung schützt im Einschaltmoment des Netzumrichters ans Netz die Zwischenkreis-Kondensatoren vor zu hohem Ladestrom. Zur Realisierung dieser Schaltung wurden unterschiedliche Schaltungskonzepte untersucht. Die entwickelte Vorladeschaltung wurde in den Netzumrichter integriert und in Betrieb genommen.

Parallel zum Aufbau und zur Inbetriebnahme des netzseitigen Umrichters wurde das Matlab/Simulink Modell für den größeren Netzumrichter neu parametrisiert und optimiert. So wurden die Signale neu dimensioniert, zusätzliche Funktionen wie Steuerung für Vorladeschaltung und zusätzliche Netzüberwachung eingefügt.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Der vorgesehene Umrichter wurde in ein Gehäuse eingebaut und elektrisch verdrahtet.
- Die Steuer- und Überwachungselektronik des Netzumrichters wurde aufgebaut und getestet.
- Die Vorladeschaltung für Zwischenkreiskondensatoren wurde entwickelt, aufgebaut und getestet.
- Der Netzfilter wurde ausgelegt und eingebaut.
- Die Messeinrichtungen zur Strom- und Spannungsmessung wurden entwickelt, aufgebaut und getestet.
- Ein geeignetes Regelungsmodell wurde entwickelt.

## **2.4 AP4: Anforderungen und Simulation von Regelalgorithmen zur Netzstützung**

Mit dem Zuwachs der Erzeugungsanlagen in den letzten Jahren stiegen entsprechend die Anforderungen an die Umrichter für die Netzeinspeisung. Laut Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) müssen sich die Erzeugungsanlagen während der Netzeinspeisung an der statischen und dynamischen Spannungshaltung im Netz beteiligen können. Unter statischer Spannungsstützung wird die Spannungshaltung im Normalbetrieb verstanden, bei der die langsamen Spannungsänderungen im zulässigen Bereich gehalten werden. Unter dynamischer Netzstützung im Mittelspannungsnetz wird eine Spannungshaltung bei Spannungseinbrüchen im Hoch- und Höchstspannungsnetz verstanden. Die steigende Anzahl der Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz macht die Einbeziehung der dynamischen Netzstützung immer bedeutsamer. Das bedeutet, dass alle Erzeugungsanlagen technisch in der Lage sein müssen, sich während eines Fehlerfalles nicht vom Netz zu trennen. Während eines Netzfehlers ist die Netzspannung durch die Einspeisung eines Blindstromes in das Netz zu stützen. Nach der Fehlerklärung an dem Spannungsnetz darf von den betroffenen Erzeugungsanlagen nicht mehr Blindleistung als vor dem Fehler entnommen werden.

Eine Voraussetzung für die Netzeinspeisung ist die synchrone Phasenlage der Ausgangsspannung des Netzumrichters mit der Netzspannung. Die Kenntnis über die Phasenlage der Netzspannung spielt eine wichtige Rolle bei einer Transformation des Drehstromsystems in ein zweiphasiges Gleichstromsystem. Das zweiphasige Gleichstromsystem ermöglicht eine getrennte Regelung von Wirk- und Blindleistung und bildet das Grundkonzept des Regelalgorithmus der Netzeinspeisung.

Das Erkennen der Fehlerart und darauf richtig zu reagieren, stellt die Hauptherausforderung bei der zu entwickelnden Regelung dar. Einige Netzfehler (z.B. einphasiger Kurzschluss) sorgen dafür, dass das symmetrische Drehstromnetz zu einem unsymmetrischen Netz wird. Um eine Netzspeisung bei so einen unsymmetrischen Netz zu ermöglichen, wird eine so genannte Methode der symmetrischen Komponenten angewendet. Dabei wird ein unsymmetrisches System in drei symmetrische Systeme zerlegt. Diese Zerlegung ermöglicht eine relativ einfache Regelung der symmetrischen Systeme, ähnlich wie bei der Regelung im normalen Betrieb. Die drei symmetrischen Systeme müssen aber dementsprechend einzeln geregelt werden, was den Aufwand für die Entwicklung des Regelalgorithmus und dessen Umsetzung auf einem Mikrocontroller erhöht.

Anhand der Anforderungen und möglicher Ansätze wurde ein Matlab/Simulink Modell entworfen, das eine Netzstützung in Fehlerfall (z.B. Kurzschluss in Netz) ermöglicht. Mit der Simulation wurden unterschiedliche Kurzschlussarten generiert und die Reaktion der Regelung des Netzumrichters untersucht.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Anforderungen zur Netzstützung wurden analysiert.
- Mögliche Ansätze zur technischen Realisierung der Netzstützung wurden untersucht.
- Mögliche Regelalgorithmen zur Netzstützung wurden untersucht.
- Ein Modell zur Netzstützung wurde mit Matlab/Simulink entwickelt.

## 2.5 AP5: Aufbau einer Schaltung zum Test von Netzeinbrüchen

Zur praktischen Untersuchung des Regelalgorithmus zur dynamischen Netzstützung wird eine Einrichtung benötigt, die ermöglicht, unterschiedliche Netzfehler/-Netzeinbrüche zu simulieren. Als erstes wurden die Fehlerarten definiert und eine mögliche praktische Umsetzung konzipiert. Darauf wurde eine Schaltung zum Netzeinbruch entwickelt, die ermöglicht, verschiedene Fehlerarten sowohl dreiphasig als auch einphasig zu simulieren. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten Netzeinbruchsimsulators.

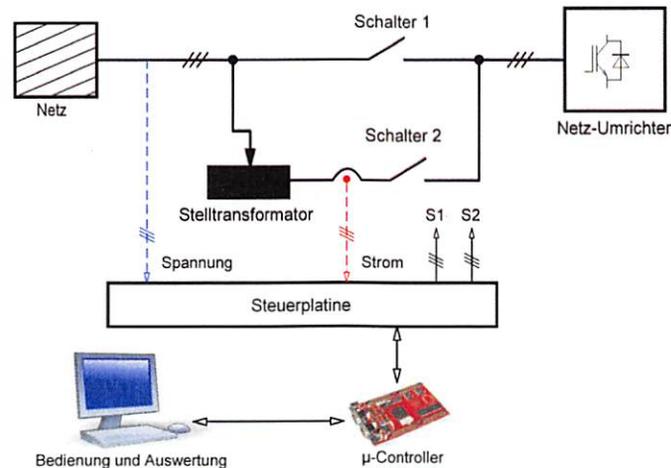


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Netzeinbruchsimsulators

Die Herausforderung bei der Entwicklung der Schaltung zum Netzeinbruch lag in der Ansteuerung der Triacs. Diese elektronischen Schalter müssen gezielt zu netzabhängigen Zeiten angesteuert werden. Dazu bedarf die Messung sowohl des netzseitigen Stromes und der Spannung als auch lastseitigen elektrischen Größen. Abhängig von diesen elektrischen Größen und geforderten Fehlerarten werden die Triacs (6 Stück) einzeln angesteuert. Dazu wurde eine zusätzliche Mess- und Steuereinrichtung entwickelt und aufgebaut. In der Abbildung 6 ist der aufgebaute Netzeinbruchsimsulator dargestellt.

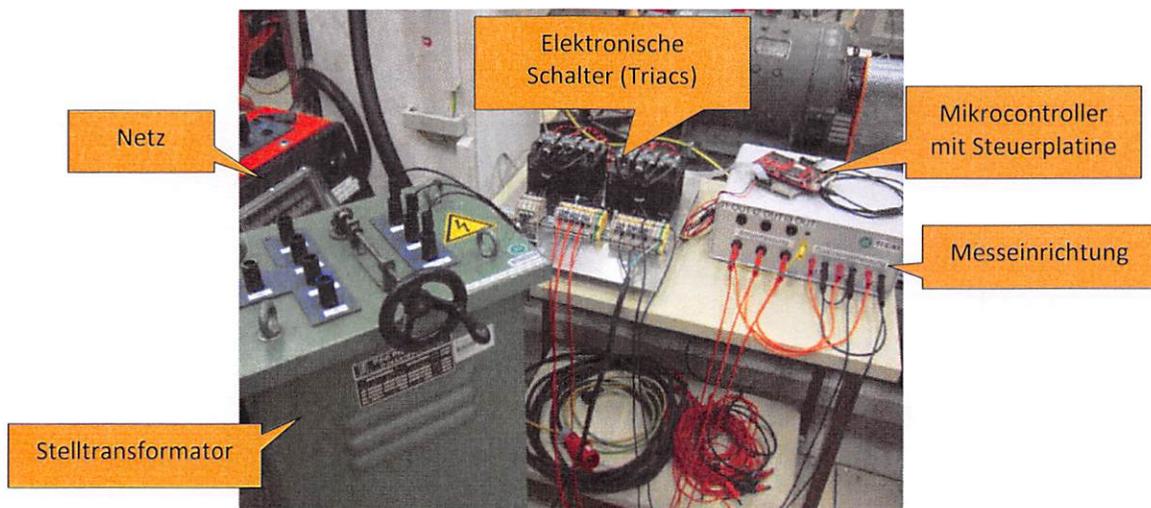


Abbildung 6: Entwickelter Netzeinbruchsimsulator

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Mögliche Schaltungen und die Machbarkeit wurden analysiert.
- Unterschiedliche Schaltungskonzepte wurden mit Matlab/Simulink untersucht.
- Ein geeignetes Modell des Netzeinbruch-Simulators wurde entwickelt.
- Die Steuerschaltung wurde entwickelt und aufgebaut.
- Zusätzliche Messeinrichtungen wurden entwickelt und aufgebaut.
- Die Steuerung auf einem Mikrocontroller wurde programmiert und getestet.
- Die Inbetriebnahme des Netzeinbruch-Simulators wurde durchgeführt.

## 2.6 AP6: Umsetzung der Regelung zur Netzstützung

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurde die im Arbeitspaket 4 entwickelte Regelung zur Netzstützung weiterentwickelt und praktisch umgesetzt. Große Herausforderung bei der praktischen Umsetzung der Regelung lag bei der Implementierung der entwickelten Regelung auf einem Mikrocontroller. Die in Matlab/Simulink entwickelte Regelung musste in mehreren Schritten an den Mikrocontroller angepasst werden. So wurde zuerst die Steuerung und Überwachung der Leistungselektronik auf dem Mikrocontroller programmiert und die Messsignalauswertung implementiert. Danach wurden die Synchronisation-Routinen programmiert und getestet. Im weiteren Verlauf wurde die komplette Regelung auf dem Mikrocontroller implementiert und auf dem Umrichter verifiziert.

Bei den Inbetriebnahmen neuer Regelungsverfahren ist es schwierig, gleich einen laufenden Algorithmus zu erzeugen, der direkt am Netz betrieben werden kann. Es bedurfte mehrerer Anpassungen und Optimierungen der Umrichter-Komponenten und der Reglerparameter. Um die Regelung zu verifizieren, wurde der kleine Umrichter zuerst an eine kleinere Netzspannung angeschlossen. Die überflüssige Zwischenkreisenergie kann dementsprechend früher erreicht werden und die Netzeinspeiseregung einfacher verifiziert werden. So konnte die Regelung zuerst im Normalbetrieb und danach mit zusammengebrochener Netzspannung untersucht werden. In erste Linie wurden die Algorithmen zur Netzsynchronisation und Fehlererkennung getestet.

Die gleiche Vorgehensweise zur Verifizierung der Regelung wurde auch bei dem großen Umrichter durchgeführt. Hier hat sich aber herausgestellt, dass diese Methode nicht ohne weiteres eingesetzt werden kann. Die Umrichter-Komponenten sind für höhere Leistung ausgelegt, dementsprechend benötigen diese schon im Leerlauf eine gewisse Energie. Dadurch war es nicht möglich, mit gleichen Komponenten wie bei der Verifizierung des kleinen Umrichters die Regelung auf dem großen Umrichter in Betrieb zu nehmen. Wie bereits im AP3 beschrieben wurde, stand die bei der Antragstellung vorgesehene Gleichspannungsquelle nicht zur Verfügung. Daher wurde der große Frequenzumrichter im nächsten Schritt direkt am Netz betrieben. Dadurch war die Inbetriebnahme sehr umständlich und zeitintensiv. Es wurden Instabilitäten mit dem vorgesehenen Netzfilter festgestellt. So mussten weitere Optimierungen des Regelungsverfahrens und der Hardware unternommen werden. Um möglichen Schaden bei der Inbetriebnahme der großen Umrichter zu minimieren, wurde entschieden, die Regelung zur Netzstützung nur am kleinen Prüfstand weiter zu testen. Dazu wurde der kleine Netzumrichter mit dem Netzeinbruchsimulator gekoppelt und unterschiedliche Betriebsarten der Regelung getestet. In der folgenden Abbildung ist eine schematische Darstellung des Testaufbaus dargestellt.

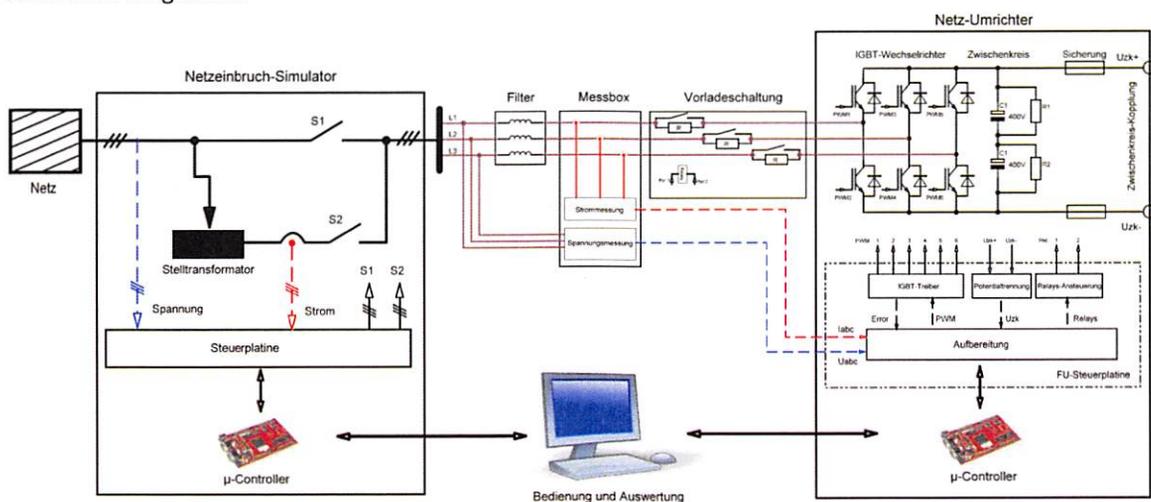


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Netzstützung

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einige Messwerte aus dem realen Aufbau. Die dargestellten Werte wurden von dem Mikrocontroller des Netzumrichters gemessen und auf einem Computer ausgewertet. Die Abbildung 8 zeigt die Netzspannung vor und nach einem dreiphasigen Netz-Zusammenbruch. Der Fehler bestand 150ms lang und die Netzspannung ist um ca. 20% gesunken. Die Zeit von 150ms entspricht der minimalen Fehlerzeit, bei der die Regelung noch reagieren muss.

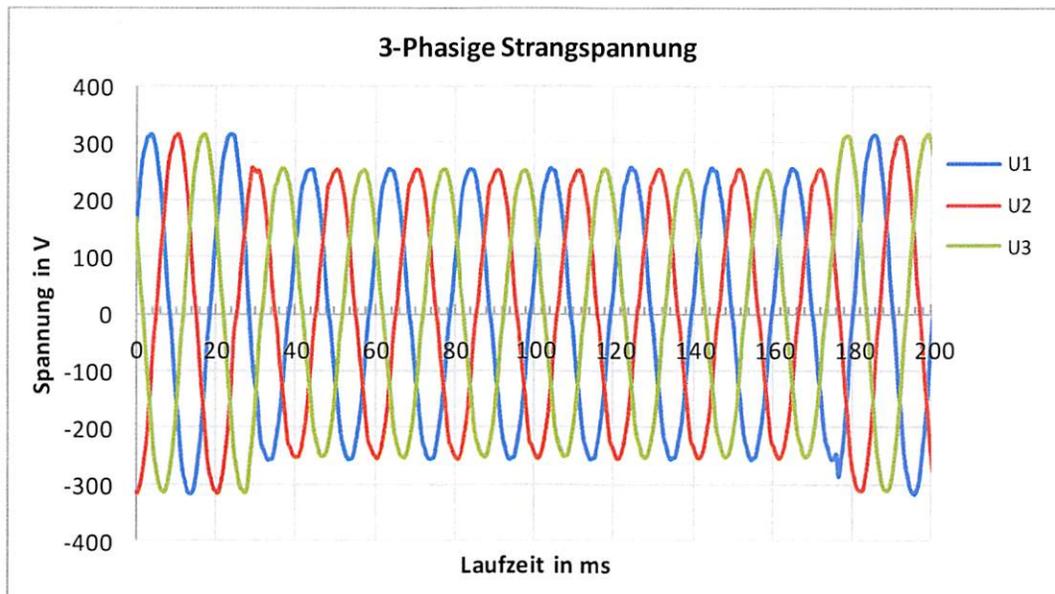


Abbildung 8: Netzspannungsform beim Fehler

Die Abbildung 9 zeigt die Fehlererkennung: „Grid-Error“ und die berechneten Zeiten: „Soll-Time“ und „Ist-Time“ zur weiteren Netzstützung. Der Wert des „Soll-Time“ Parameters gibt an, wie lange die Netzstützung dauern soll. Dieser Wert ist von der Netzspannung abhängig. Je stärker die Spannung zusammenbricht, desto weniger Zeit zur Netzstützung wird verlangt. Bei dem getesteten Zusammenbruch der Netzspannung um 20% betrug die gesamte Zeit zur Netzstützung etwa 1,33s und entspricht den gesetzten Anforderungen. Der Parameter: „Ist-Time“ misst die Zeit ab dem Zeitpunkt, wo der Fehler erkannt wurde. Die gemessene Zeit betrug ca. 145ms. Die Netzspannung wurde für 150ms zusammengebrochen. Das bedeutet, dass der Regelalgorithmus nur 5ms zur Fehlererkennung benötigt hat, was dem Viertel der Periodendauer der 50 Hertz Netzspannung entspricht und dementsprechend einen sehr guten Wert darstellt. Die Tests haben gezeigt, dass die entwickelte Regelung zuverlässig den Netzzusammenbruch erkennt und die benötigten Zeiten zur Netzstützung wie gefordert berechnet.

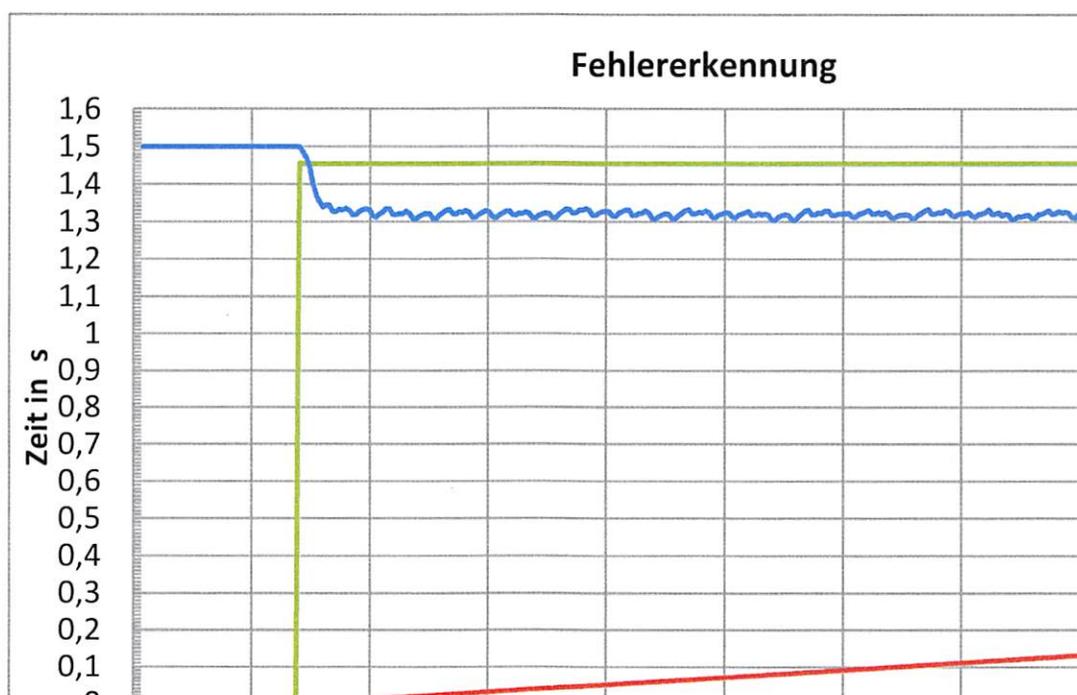


Abbildung 9: Fehlererkennung

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die entwickelte Regelung zur Netzstützung wurde auf einem Mikrocontroller implementiert.
- Die Steuerung des Aufbaus des Netzeinbruchsimulators wurde optimiert.
- Die Regelung zur Netzstützung wurde auf einem kleinen Umrichtersystem getestet.
- Der Regelalgorithmus wurde für den großen Umrichter angepasst und teilweise getestet.
- Stabilitätsuntersuchungen sowohl auf dem großen als auch auf dem kleinen Umrichter wurden durchgeführt.

## 2.7 AP7: Simulation von netzseitigem Umrichter und Clusterregelung

Im vorherigen Projekt (WTSH) wurde eine Regelung entwickelt, die ermöglicht, gleichzeitig zwei Generatoren mit einem Frequenzumrichter zu regeln. Das verwendete Regelungsverfahren basiert auf einer statorflussorientierten Regelung. Beim diesem Verfahren werden die für die Regelung benötigten Flusswinkel und Drehzahl mit Hilfe von Statorgrößen und einem Flussbeobachter geschätzt. Da die Regelungsgrößen größtenteils nur durch den Flussbeobachter geschätzt werden, neigt das eingesetzte Regelungsverfahren zu Schwingungen.

Damit die Verifizierung des Gesamtsystems in kurzer Zeit vorgenommen werden kann, wurde entschieden, die statorflussorientierte Regelung durch eine rotorflussorientierte Regelung zu ersetzen und diese nur mit einem Generator zu testen. Die eingesetzte rotorflussorientierte Regelung hat den Vorteil, dass die für die Regelung benötigte Drehzahl direkt gemessen wird. Dadurch ist die Generatorregelung einfacher und stabiler. Die Implementierung auf einem Mikrocontroller ist weniger zeitintensiv. So wurde in relativ kurzer Zeit eine neue Regelung des Generators mit Matlab/Simulink entwickelt.

Im weiteren Verlauf wurde die Generatorregelung für den Normal- und Fehlerbetrieb angepasst und durch Zusammenführen von der Netzeinspeiseregulation unterschiedliche Fehlerszenarien simuliert.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Generatorregelung für einen Generator wurde überarbeitet.
- Die Generator- und Netzeinspeiseregulation wurden zusammengeführt und durch Simulationen getestet.
- Die Regelungsmodelle wurden an die vorhandenen Komponenten angepasst.

## 2.8 AP 8: Praktische Erprobung von netzseitigem Umrichter und Clusterregelung

Im Rahmen des Arbeitspakets 8 wurde das Gesamtsystem, bestehend aus Generator- und Netzumrichter, getestet. In folgender Abbildung ist die schematische Darstellung des Aufbaus dargestellt.

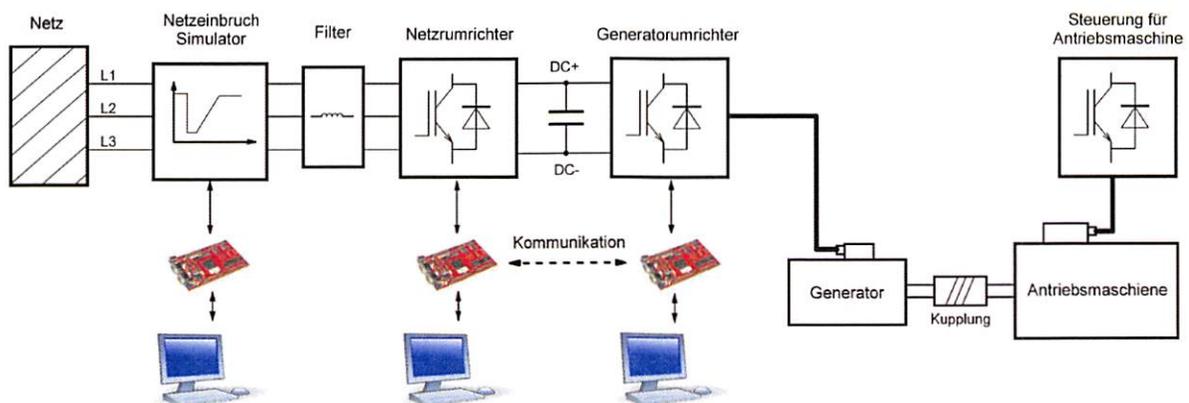


Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau des Gesamtsystems

Im normalen Betrieb speist der Netzumrichter die generatorerzeugte Energie ins Netz zurück. Dabei wird die Wirkleistung über die Höhe der Zwischenkreisspannung geregelt. Liegt ein Netzfehler/ Spannungszusammenbruch vor, so ändert der netzseitige Umrichter den Betriebsmodus und stützt wie gefordert das Netz mit Blindleistung. Da im Fehlerbetrieb keine Wirkleistung ans Netz abgegeben werden darf, kann die Zwischenkreisspannung nicht mehr geregelt werden. Würde der Generator nichts von dem Netzzusammenbruch erfahren, so erzeugt dieser weiterhin die Energie. Das führt zur Steigerung der Zwischenkreisspannung und könnte ohne weitere Maßnahmen die Komponenten der beiden Umrichter zerstören. Um das zu vermeiden,

wurde als erstes die Möglichkeit zur Kommunikation zwischen netzseitigem- und generatorseitigem Umrichter aufgebaut und auf die Funktionalität getestet.

Im weiteren Verlauf wurde überprüft, ob alle Komponenten des eingesetzten Gesamtsystems wie geplant funktionieren. So mussten die Komponenten der Generatorregelung an die erhöhte Zwischenkreisspannung (700V) angepasst und der Reglungsalgorithmus optimiert werden. Bei dem Netzumrichter musste die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Komponenten verbessert werden. So wurde ein zusätzlicher Filter für hochfrequente Störungen in den Rückspeisepfad eingefügt und die Verkabelung der einzelnen Komponenten verbessert.

Um die Bedienung des einzelnen Systems bei den Untersuchungen zu vereinfachen, wurden die Generator- und die Netzeinspeiseregulation weitgehend automatisiert. So müssen die einzelnen Regelungen zwar einzeln gestartet werden, laufen aber während der Untersuchungen unabhängig voneinander. Dadurch muss nur der Netzeinbruch-Simulator während der Untersuchungen manuell bedient werden.

Bei der praktischen Erprobung wurden unterschiedliche Tests des Gesamtsystems durchgeführt. In nachfolgenden Abbildungen sind einige Messwerte zusehen. In der Abbildung 11 sind die Leistungsabgaben des Netzeinspeisenumrichters im Normal- und Fehlerbetrieb dargestellt. Die Netzspannung bricht für ca. 150ms auf 80% zusammen. Vor dem Fehler speist der Netzumrichter im Normalbetrieb die von dem Generator erzeugte Wirkleistung (blaue Kennlinie) und die Blindleistung wird auf null geregelt (rote Kennlinie). Wird der Fehler erkannt (grüne Kennlinie), so wird die Wirkleistung auf null geregelt und die Blindleistung eingespeist. Die Überschwingung der Wirkleistung beim Fehlereintritt ist durch eine gewisse Trägheit des gesamten Systems zu erklären. Von der Netzseite kann keine Energie mehr abgenommen werden und der Generator speist zunächst noch Energie in den Zwischenkreis. Durch die Restmagnetisierung des Generators erzeugt dieser auch kurz nach der Abschaltung die Energie weiter. Der Netzumrichter schaltet im Fehlerfall die Zwischenkreisregelung aus. Dadurch wird die Bereitstellung der höheren Zwischenkreisspannung, die über den Netzfilter funktioniert, nicht mehr benötigt. Das sorgt für die Magnetisierungsvorgänge im Filter und lässt ebenfalls die Leistung kurzzeitig ansteigen. Daher sind solche Überschwinger für diese Art Regelung normal und können nur mit zusätzlichen Schutzkomponenten begrenzt werden.

Nach ca. 150ms ist der Fehler wieder behoben (Abbildung 11) und die Netz- und Generatorregelung gehen automatisch in den Normalbetrieb über. Die Wirkleistung steigt an und erreicht nach einer gewissen Zeit die Leistung, die bereits vor dem Fehler erzeugt wurde. Die Blindleistung wird wie erwartet wieder auf null geregelt.

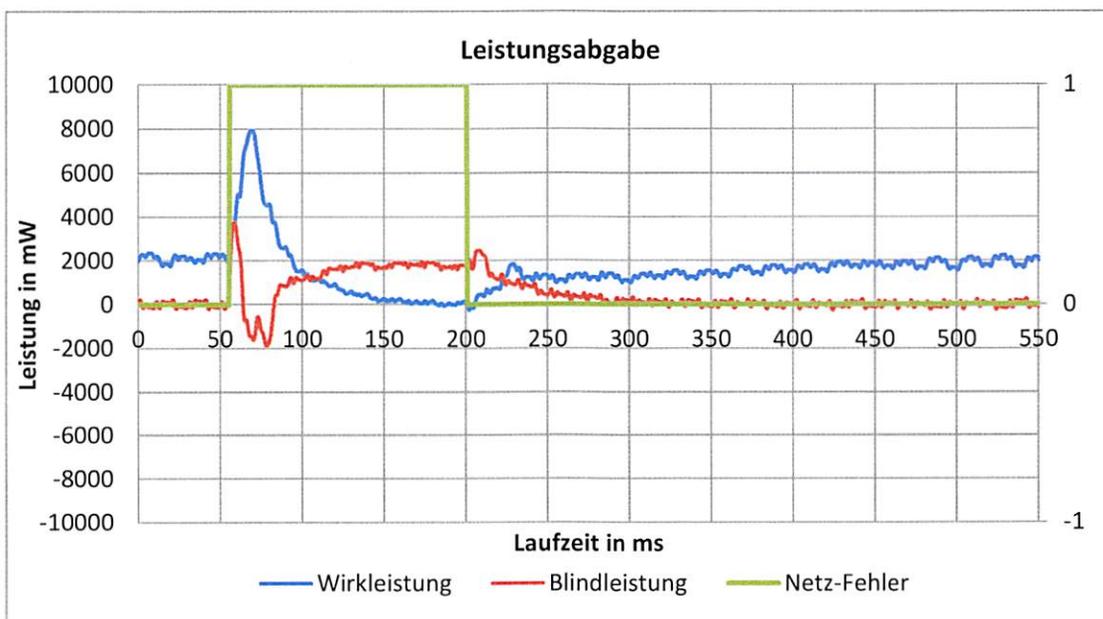


Abbildung 11: Generatorleistung vor und nach dem Netzfehler

Die Zwischenkreisspannung wird durch Netzeinspeiseregulierung auf 640V geregelt (Abbildung 12). Beim Netzzusammenbruch weicht die Zwischenkreisspannung vom Sollwert leicht ab. Das ist normal, da während der Netzfehler keine Wirkleistung ins Netz eingespeist werden darf. Der Generator speist in dieser Zeit keine Energie und die Zwischenkreisspannung sinkt dementsprechend. Ist der Netzfehler wieder behoben, so erzeugt der Generator die Energie und lässt die Zwischenkreisspannung wieder ansteigen, die dann von dem Netzumrichter konstant gehalten wird.

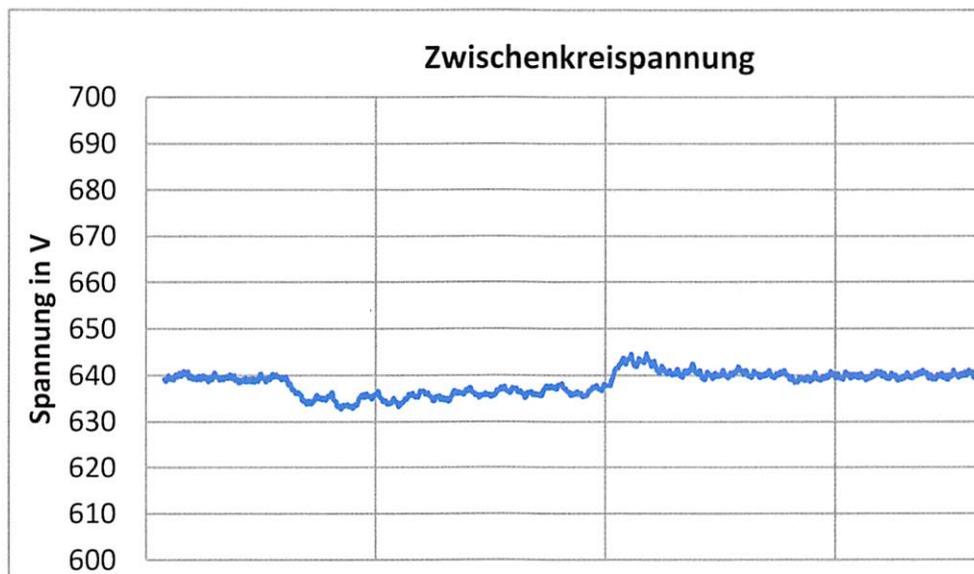


Abbildung 12: Zwischenkreisspannung

Die durchgeführten Tests haben gezeigt, dass die entwickelte Regelung entsprechend der Erwartungen funktioniert.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbau einer Kommunikation zwischen den beiden Umrichtersystemen
- Anpassung und EMV-Verbesserung der Komponenten des Gesamtsystems
- Testdurchführung des Gesamtsystems mit einem Generator

## Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes konnte ein frei programmierbarer Netzeinspeiseumrichter mit zugehöriger Netzeinspeiseregulierung entwickelt werden. Diese ist in der Lage, auch auf unsymmetrische Netzfehler zu reagieren. Dazu wurden vorab entsprechende Simulationen durchgeführt und später in der Praxis auf einem Prüfstand realisiert.

Für diese Untersuchung wurde zusätzlich ein Netzsimulator entwickelt, der es ermöglicht, verschiedene Netzeinbruch-Varianten nachzustellen.

Die entwickelte und aufgebaute Netzeinspeiseeinheit vervollständigen den bereits vorhandenen Windkraftanlagen-Prüfstand. Dieser Prüfstand kann sowohl in der Lehre der Fachhochschule Kiel als auch zu Testzwecken und der Verifikation von Systemregelungen von Dritten genutzt werden.

Durch den Defekt einer großen Gleichspannungsquelle konnte die Regelung nur teilweise getestet werden. An dem großen Prüfstand traten Stabilitätsprobleme auf und konnten durch die nicht vorhandene Quelle im Rahmen des Projektes nicht gelöst werden. Jedoch konnte das Projekt durch eine kostenneutrale dreimonatige Projektverlängerung an einem kleinen Prüfstand leicht vereinfacht doch noch zum Erfolg geführt werden. (angepasste Arbeitspakete 7 und 8).

Durch das Projekt steht der Fachhochschule als auch den Firmen in Schleswig-Holstein damit ein leistungsfähiger Prüfstand zur Untersuchung von Regelverfahren von Windkraftanlagen zur Verfügung.