

**Aufbau einer Forschergruppe
„Hochleistungselektronik für Windenergieanlagen“**

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Berichtszeitraum: 01. Juli 2017 – 30. Juni 2021

**Aufbau einer Forschergruppe
„Hochleistungselektronik für Windenergieanlagen“**

Kurzform „Forschergruppe HLE“



Dezember 2021

**Die Förderung erfolgt aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale
Entwicklung und des Landes Bremen – EFRE-Programm Bremen 2014-2020**



**Europäische Union
Investition in Bremens Zukunft
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung**

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
AP1: Modellbildung typischer Umrichterkonzepte von Windenergieanlagen	4
AP2: Entwicklung eines Simulators zur Untersuchung der Wechselwirkungen	7
AP3: Aufbau eines Gondelversuchsstands mit einer Nennleistung von 50 kW	10
AP4: Aufbau eines Versuchsstands für thermisch-elektrische Lastprüfungen	15
AP5: Entwicklung einer universellen Experimentierplattform	16
AP5: Entwicklung einer universellen Experimentierplattform	16
AP6: Experimentelle Untersuchungen leistungselektronischer Komponenten	17
AP7: Entwicklung von Dienstleistungsangeboten und Forschungsprojekten	20
AP8: Veranstaltung von themenbezogenen Workshops	24

Einleitung

Die hohe Entwicklungsgeschwindigkeit bei den heutigen Multimegawatt-Windenergieanlagen bedeutet, dass bei der technischen Zuverlässigkeit während der kontinuierlichen Stromerzeugung über die Lebensdauer nur geringe Langzeiterfahrungen bestehen können. Ihre weltweite Verbreitung führt zu immer diverseren und, damit einhergehend, herausfordernden Umgebungsbedingungen für die eingesetzte Leistungselektronik. Gleichzeitig führt der Kostendruck zu einer Minimierung der Anlagenklimatisierung, so dass die Elektronik nicht nur unterschiedlichen Belastungsprofilen ausgesetzt ist, sondern auch wechselnden klimatischen Bedingungen. Hauptaufgabe der entstandenen Forschergruppe „Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen“ ist es, multimodale Belastungen mit der Erforschung der Wechselwirkungen zwischen elektrischen, mechanischen und klimatischen Profilen zu untersuchen. In dem neuen Kompetenzzentrum am Bremer Centrum für Mechatronik an der Universität Bremen wurden in den vergangenen vier Jahren leistungselektronische Bauelemente und deren Verhalten basierend auf Felderfahrungen und in der gesamten Bandbreite von Einzelkomponententests bis hin zu Tests mit kompletten Umrichtern durchgeführt und analysiert. Die Vorhersage der Wirkung der multimodalen Belastungen bereits während der Entwicklungsphase ist von großer Bedeutung für die Lebensdauer von Bauelementen und zur Vermeidung von Felddausfällen und damit für den langfristigen Produkterfolg.

Die Bedeutung der innerhalb des Vorhabens entstandenen Labormöglichkeiten zu praxisnahen Zuverlässigkeitstests lässt sich bereits heute an der konkreten Nachfrage von Unternehmen nach Simulationsmodellen, Belastungsmessungen und weiterführenden Forschungs- und Entwicklungskooperationen erkennen. Dabei kommt insbesondere das Know-how der Forschergruppe zum Tragen, die Gebiete der leistungselektronischen Bauelemente, der Stromrichtertechnik und der Regelungstechnik, vom Bauteil über Schaltungsmodule bis hin zu herunterskalierten Prüfständen für praktische Untersuchungen von dynamischen Belastungen, welche die elektronischen Komponenten von Windenergieanlagen ertragen müssen, gesamtheitlich zu betrachten. Mit modernen Analyse- und Messsystemen zur Bestimmung der Bauelementcharakteristik und durch nachbildende Bauelementsimulationen lassen sich wichtige Erkenntnisse sowohl zur Steigerung der Lebensdauer als auch zur Wirkungsgradsteigerung der Leistungsbaulemente erzielen.

Die Forschergruppe des BCM bedankt sich für die Unterstützung bei der Anschubinvestition durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). In den nächsten Jahren wird die Gruppe zukunftsorientiert stetig weiterentwickelt. Neue unbefristete Stellen und der Neubau des Multimegawatt-Labors HiPE-LAB des universitären Instituts für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente stellen in Kombination mit dem in diesem Vorhaben erzielten Expertenwissen das avisierte Spezialangebot in der Hochleistungselektronik an die Unternehmen aus der Windenergiebranche sicher.

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst alle Arbeiten innerhalb des Zeitraumes vom 1. Juli 2017 bis zum 30. Juni 2021.

AP1: Modellbildung typischer Umrichterkonzepte von Windenergieanlagen zur Untersuchung relevanter Einflüsse auf die Lebensdauer

Sämtliche Arbeiten innerhalb des Arbeitspakets 1 wurden planmäßig durchgeführt und sind im Jahr 2020 erfolgreich abgeschlossen worden.

Nach intensiven Rechercharbeiten zu den zur Anwendung kommenden Umrichter-Topologien in Windenergieanlagen in Kombination mit der jeweiligen eingesetzten Generatorart lag der Fokus der weiteren Betrachtungen auf den häufig verwendeten Vollumrichtern mit Spannungszwischenkreis. Die Abbildung 1 stellt exemplarisch eine WEA mit permanentmagneterregtem Synchrongenerator (PMSG) und Vollumrichter mit Spannungszwischenkreis dar.

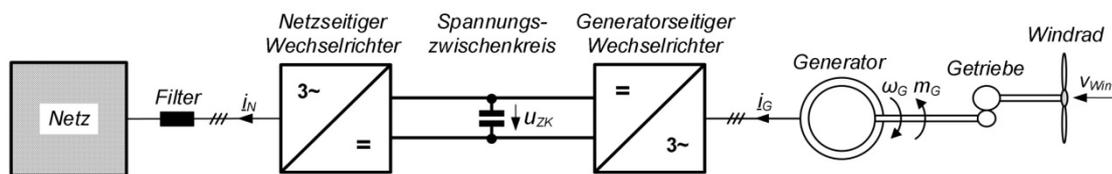


Abbildung 1: Netzanbindung des Windenergieanlagengenerators über einen Vollumrichter mit Spannungszwischenkreis

Je nach Leistungsklasse und Art des verwendeten Generators (Asynchronmaschine (IG), Doppelgespeiste Asynchronmaschine (DFIG), PMSG, fremderregter Synchrongenerator (SG)) sind die verschiedene Topologien für den netz- und generatorseitigen Wechselrichter detaillierter betrachtet und modelliert worden. Peripher wurden auch zukünftig zum Einsatz kommende Konzepte für Leistungsklassen oberhalb von acht Megawatt, z. B. die Multilevel-Umrichter (u. a. aufgebaut in NPC-Topologie), betrachtet.

In anschließenden Arbeiten erfolgte eine weitere Fokussierung auf die am Häufigsten zum Einsatz kommenden WEA-Konzepte mit DFIG und PMSG zusammen mit jeweils parallel verschalteten 2L-IGBT oder 3L-NPC als netz- und generatorseitige Umrichter. Hierfür wurden dann entsprechende Gesamtmodelle einer Windenergieanlage nach Tabelle 1 in MATLAB/Simulink erstellt.

Wie bei der Anlage mit PMSG in Abbildung 1 illustriert, wurden dabei Rotor-, Getriebe- und Generatormodelle sowie realitätsnahe Windprofile entwickelt. Weiterhin wurden für die Modelle entsprechende Regelungen entsprechend dem aktuellen Stand der Technik ausgelegt und implementiert.

Tabelle 1: Übersicht über die aufgebauten Anlagenmodelle

Spannungsebene (verkettet)	Nennleistung	Umrichter	Generator	Getriebe	Rotorradius
690 V	2 MW	2L-IGBT-BTB (parallel)	DFIG	Dreistufig	58 m
690 V	2 MW	3L-NPC-BTB			
690 V	5 MW	2L-IGBT-BTB (parallel)	PMSG-Multipol	Einstufig	
2000 V	5 MW	3L-NPC-BTB			

Diese ausgewählten Anlagenmodelle wurden in der Folge um Modelle der Leistungselektronik mit zugehöriger Parametrierung ergänzt und die thermischen Ersatznetzwerke der Leistungsmodule integriert. Ebenso wurden äquivalente Windfelder für die verschiedenen Windenergieanlagentypen erarbeitet und im Modell hinterlegt. Auf Basis dieser Arbeiten konnten am Ende erfolgreich die elektrischen Ströme des Umrichters in Verbindung mit den sich einstellenden Sperrschichttemperaturen der Leistungshalbleiterschalter berechnet bzw. modelliert werden. In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind Ergebnisse exemplarisch für einen kurzen Betriebszeitraum einer 5 MW-WEA dargestellt.

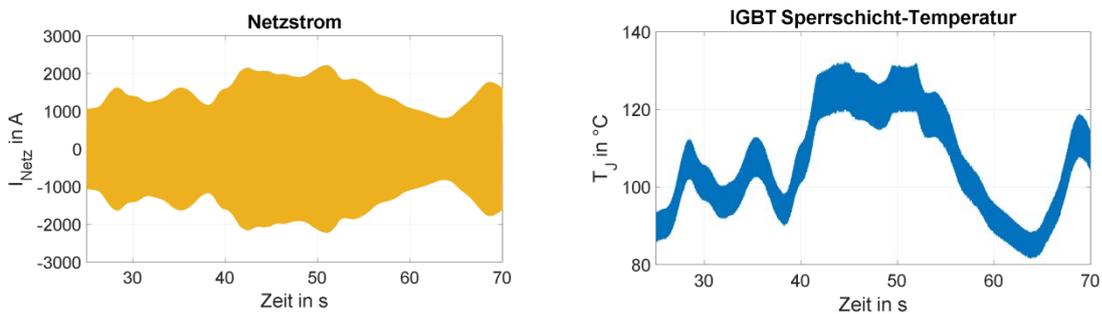


Abbildung 2: Simulationsergebnisse zur 5 MW-Anlage mit PMSG und 3L-NPC-BTB

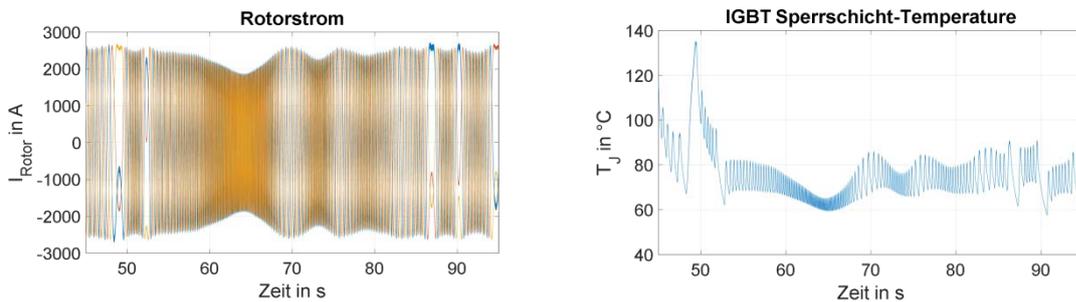


Abbildung 3: Simulationsergebnisse zur 2 MW-Anlage mit DFIG und parallelgeschalteten 2L-IGBT-BTB

In den daran anschließenden weiterführenden Arbeiten erfolgte die Untersuchung der Einflussmechanismen auf die Lebensdauer der Leistungsschalter von Umrichtern in Windenergieanlagen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen führte zur Erstellung von Anforderungsprofilen für eine DFIG-Anlage mit parallelgeschalteten Teilumrichtern.

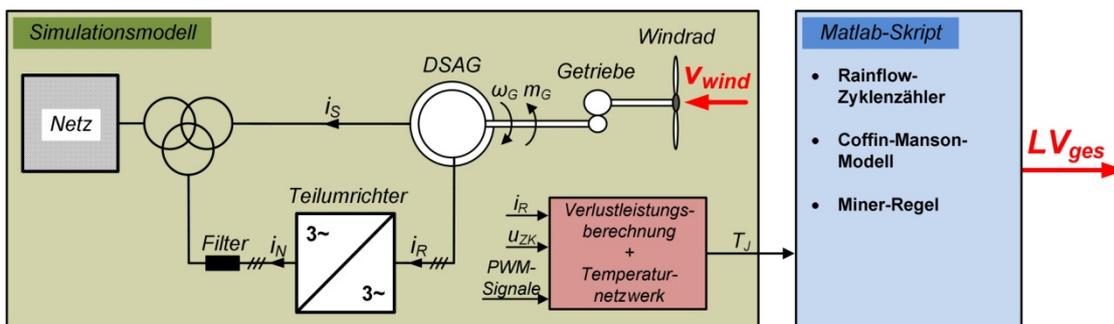


Abbildung 4: Verwendetes Simulink-Modell mit zugehörigem MATLAB-Skript zur Bestimmung des aus dem eingangsseitigen Windfeld v_{wind} hervorgehenden Lebensdauer verbrauchs LV_{ges}

Die Kenntnis über den Verlauf der Sperrschichttemperatur T_J der Halbleiterchips im Umrichter in Verbindung mit der simulierten Belastung (Windfeld: v_{wind}) erlaubt die Berechnung bzw. Abschätzung der Lebensdauerabnahme auf Basis der ebenfalls im Modell hinterlegten Schädigungsalgorithmen. In Simulationsläufen wurde der Lebensdauerverbrauch für typische Windfelder im Offshore-Bereich ermittelt.

Tabelle 2: Übersicht über den Lebensdauerverbrauch und den zeitlichen Verlauf der Sperrschichttemperatur für ein vorgegebenes Windfeld

Windfeld (v_{wind})		Sperrschichttemperatur T_J	
$LV_{ges} \cdot 10^9$ (Schaden)	13,4224	Anzahl Zyklen	35481

Mit den erstellten Modellen konnte am Ende erfolgreich eine Optimierung bezüglich der Netzintegration von WEA auf Basis einer im Rahmen des Vorhabens entwickelten Betriebsweise erarbeitet werden, die darüber hinaus bei der Leistungseinspeisung netzstabilisierend eingreift.

Hierfür wurde zunächst ein Modell einer WEA mit Vollumrichter, angeschlossenem permanentmagneterregten Synchrongenerator (PMSG) und einer Pitchverstellung implementiert (Abbildung 5 links und rechts). Die Betriebsweise (Abbildung 5 rechts) dieser netzstützenden Regelung ist äquivalent zu konventionellen Kraftwerken. Hierzu wurde dem netzseitigen Umrichter das Verhalten eines starr an das Netz gekoppelten Synchrongenerators mit Statik-Regelung eingepägt.

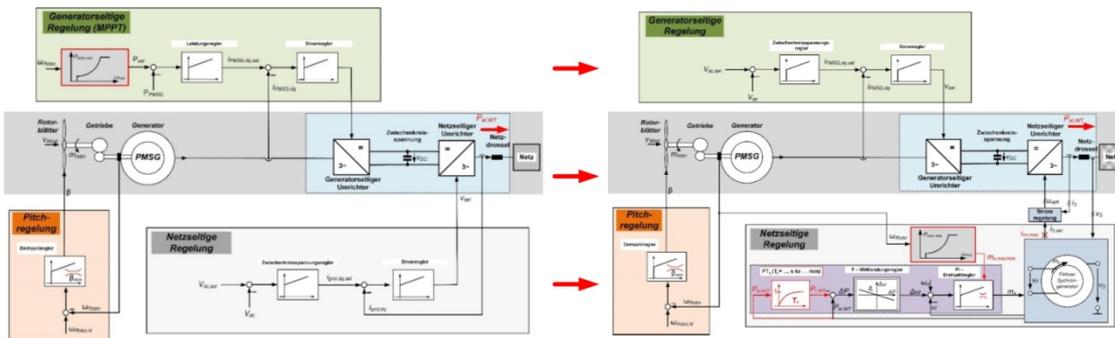


Abbildung 5: Übergang vom MPPT-Verfahren zur entwickelten netzstützenden Regelstrategie

Die entwickelte Anlagenbetriebsweise sorgt dafür, dass die geforderte Leistung der Verbraucher bis zur Begrenzung durch die aktuell zur Verfügung stehende Windleistung in das Netz eingespeist wird.

AP2: Entwicklung eines Simulators zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Betriebsmitteln bzw. Anlagen

Das Arbeitspaket 2 beinhaltet die Analyse von Ausfallmechanismen und Fehlermodi unter Berücksichtigung physikalischer Effekte. Weiterhin wurden Betriebsmittel wie Kabel und Windenergieanlagen unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens modelliert. Für die Simulation von komplexen Modellen wurde ein Rechner-Cluster aufgebaut, in Betrieb genommen und ein Software-System zur verteilten Simulation erarbeitet. Darauf aufbauend wurden die zuvor erstellten Modelle für die verteilte Simulation angepasst auf dem Rechner-Cluster implementiert und simuliert. Darauf aufbauend wurden Wechselwirkungen zwischen verschiedenen elektrischen Energieanlagen simuliert und getestet. Sämtliche Arbeiten innerhalb des Arbeitspakets 2 wurden planmäßig durchgeführt und sind erfolgreich abgeschlossen worden.

Bei der Energieübertragung können aufgrund der mitunter komplexen Topologie des Hochsee-Übertragungs- bzw. Sammelnetzes unterschiedliche Fehlerfälle eintreten. Diese Fehlerfälle lassen sich zunächst in Leitungs- und Komponentenfehler unterteilen, wobei die Komponenten von der Beschaffenheit des Netzes abhängig sind. In konventionellen Drehstromsammelnetzen sind im Wesentlichen die netzseitigen Transformatoren der Windenergieanlagen (WEA), Kompensationsanlagen, die Exporttransformatoren sowie die Stromrichter auf der Hochsee-Umspannstation (HUS) als Komponenten anzusehen. In zukünftigen Gleichstromsammelnetzen entfallen die Drehstromtransformatoren und Kompensationsanlagen, sodass das Netz in diesem Fall überwiegend aus Stromrichtern und Leitungselementen besteht.

In diesen Übertragungssystemen treten auf der Komponentenebene hauptsächlich Transformatorfehler durch Isolationsversagen auf. In den Übertragungsleitungen können je nach Beschaffenheit der Seekabel die klassischen Fehlerfälle (Erdschluss, Kurzschluss, Leiterabriss) im Drehstromfall eintreten. Bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) besteht der hochseeseitige Stromrichter ebenso wie der festlandseitige Stromrichter aus einer Reihenschaltung von zwei Stromrichtern auf der Gleichstromseite. Da die Stromrichter typischer Weise über eigene Stromregelungen verfügen, kann es auf der Gleichstromseite zu Gleich- und Gegentaktstörungen kommen. Falls die Schaltfrequenzen der Umrichter nicht exakt identisch sind, sind zudem Ausbreitungen niederfrequenter Schwebungen möglich. Im HGÜ-System können neben Stromrichterfehlern auf Komponentenebene ebenfalls folgende Leitungsfehler auftreten: Erdschluss einpolig, Kurzschluss, Leiterabriss. Aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Kabel kann ein reiner Leiter-Leiter-Kurzschluss ohne Einbeziehung des Schirms auf der Übertragungsstrecke nicht entstehen. Allerdings ist ein solcher Kurzschluss an den Stromschienen der Übergabestellen möglich.

In Simulationen werden die Leitungen durch Ersatzschaltbilder beschrieben. Da sich aufgrund der konzentrierten Bauelemente ein Schwingkreis ergibt, muss bei der Festlegung der Leitungslänge die Resonanzfrequenz dieser Schwingkreise berücksichtigt werden. Bei der Verwendung von Stromrichtern muss ein ausreichend großer Abstand zwischen dieser Resonanzfrequenz und der Stromrichterschaltfrequenz bestehen.

Zu den beschriebenen Betriebsmitteln des Stromnetzes bzw. zu den (Teil-) Anlagen wurden modulare Simulationsmodelle erzeugt, die im Folgenden beschrieben werden.

- 1.) Überlagertes Stromnetz: Zur Nachbildung des überlagerten Stromnetzes wurden die Modelle zweier in Großkraftwerken eingesetzten Turbogeneratoren samt ihrer elektrischen Zuleitung über eine gemeinsame ohmsch-induktive Last miteinander gekoppelt. Hierdurch ist es möglich, die dynamischen und sich stationär ergebenden Zustände sowie das Verhalten bei Laständerungen und auftretenden Netzfehlern darzustellen und zu veranschaulichen.
- 2.) Windenergieanlagen: Einzelne Teilmodelle einer WEA, wie z. B. Getriebe- und Rotormodelle, wurden in verschiedenen Ausführungen und unterschiedlichen Komplexitätsebenen erstellt. Hierbei wurden verschiedene Umrichtertopologien mit den zugehörigen Generatorarten berücksichtigt. Die Teilmodelle wurden anschließend zu kompletten WEA-Modellen verschiedener Leistungsklassen zusammengefügt und mit entsprechenden Regelungen nach dem Maximum-Power-Point-Tracking-Verfahren (MPPT-Verfahren) versehen.
- 3.) Leitungen und Kabel: Es wurden Modelle von Freileitungen und Kabeln durch Aneinanderreihung einer für die jeweilige Gesamtlänge ausreichender Anzahl an PI-Ersatzmodellen mit spezifischer Parametrierung angefertigt. Ergänzend zu diesem in üblicher Weise verwendeten Modell eines Transformators, wurde ein Modell auf Basis des T-Ersatznetzwerkes unter Vernachlässigung der Eisenverluste erarbeitet und hinterlegt.
- 4.) HGÜ-Stationen: Bei dem implementierten Modell einer bipolaren HGÜ-Konverter-Plattform sind zwei 2L-IGBT-Stromrichter DC-seitig in Reihe geschaltet. AC-seitig wird die Plattform zur Erhöhung der DC-Spannung über einen Dreiwicklungstransformator gespeist. Für die Stromrichter wurde eine typische Kaskadenregelung ausgelegt und implementiert, wodurch zwei Stationen gekoppelt werden können (Punkt-zu-Punktverbindung).

Um diese modularen Modelle in ein Rechner-Cluster zur verteilten Simulation des gesamten Stromnetzes mit den verschiedenen Netzteilnehmern zu implementieren, wurde die gesamte Rechner-Hardware zum Aufbau beschafft, vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Rechner-Cluster besteht aus vier Rechnern, jeder mit einer AMD Threadripper 1950x CPU ausgestattet. Jede CPU hat 16 Rechenkerne, somit ergibt sich eine Gesamtanzahl von 64 Rechenkernen für das gesamte Rechner-Cluster. Die vier Rechner sind mit einem 10 Gbit Ethernet Netzwerk verbunden.

Die Programmierung der System- und Ablaufsteuerung für das Rechner-Cluster wurde durchgeführt, wobei ein Rechner des Clusters die Funktion des Servers übernimmt, die drei weiteren Rechner fungieren als Clients. Auf dem Server werden aus den Teilmodellen ablauffähige Programme generiert und diese auf die Clients übertragen.

Die Simulationsergebnisse können beispielweise in der MATLAB-Software zur Auswertung und Visualisierung geladen werden. Hierzu wurde ein Beitrag auf der Konferenz PCIM 2019 unter dem Titel „*Distributed simulation of wind farm grids*“ veröffentlicht.

Um die Betriebsmittelmodelle beispielhaft zu implementieren, wurde das Modell der Nachbildung von zwei konventionellen Kraftwerken, die auf eine gemeinsame Last speisen, verwendet. Das erstellte Modell besteht aus zwei Turbogeneratoren, einem Netz und einer Last. Das Modell wurde anschließend für die Simulation auf dem Rechner-Cluster aufgeteilt, um mehrere Rechner und Rechenkerne nutzen zu können. Die Aufteilung erfolgte in drei Teilmodelle: das Netz und die Last sowie jeweils ein Generator (Abbildung 6).

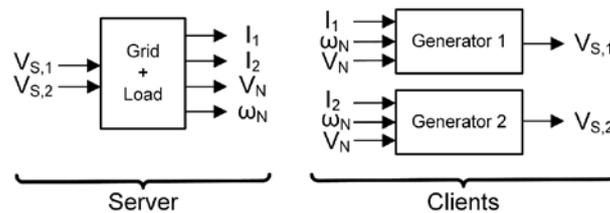


Abbildung 6: Erstellte Teilmodelle

Um die erstellten Teilmodelle auf dem Rechner-Cluster ausführen zu können, mussten diese zunächst als Programmcode der Programmiersprache „C“ exportiert werden. Die Programmteile der Teilmodelle wurden dann zusammen mit den erarbeiteten Kommunikationsmodulen zu eigenständigen Programmen übersetzt.

Als Ergebnisse der Simulation werden im Folgenden die abgegebene Leistung der Generatoren und die Netzfrequenz betrachtet. Verglichen werden die Ergebnisse des Gesamtmodells und die der verteilten Simulation der Teilmodelle. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der abgegebenen Leistung der Generatoren 1 und 2. Zu erkennen ist eine sehr gute Übereinstimmung der numerischen Ergebnisse beider Simulationssysteme. In Abbildung 8 wird die Netzfrequenz verglichen. Auch hier ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen.

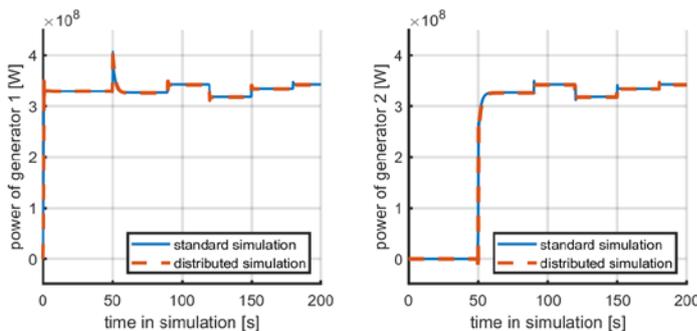


Abbildung 7: Vergleich der abgegebenen Leistung der Generatoren

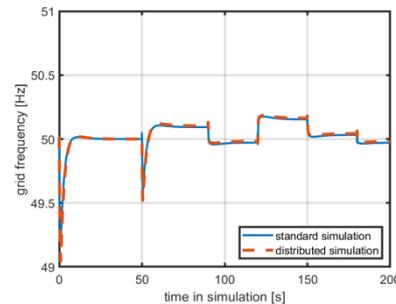


Abbildung 8: Vergleich der Netzfrequenz

Neben den numerischen Ergebnissen wurde auch die benötigte Zeit für die Simulation gemessen und verglichen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die verteilte Simulation auf einem Rechner mit mehreren Rechenkernen des betrachteten Rechner-Cluster nur etwa 27 % der Zeit benötigt, welche bei der Simulation des Gesamtsystems gemessen wurde. D. h. es ergab sich eine Zeiteinsparung von 73 %. Bei der Simulation eines jeden Teilmodells auf jeweils einem Rechner des Rechner-Clusters ergab sich nur eine Zeiteinsparung von 13 %. Dies ist durch die zusätzlich benötigte Zeit für die Kommunikation, d. h. die Übertragung der Daten zwischen den Rechnern, zu erklären.

Zusammenfassend konnten die betrachteten Modelle auf dem Rechner-Cluster erfolgreich simuliert werden. Wie beabsichtigt konnte die angestrebte Einsparung bei der Simulationszeit erreicht werden.

Um die Wechselwirkungen zwischen einem Windparkmodell und dem elektrischen Netz zu simulieren, wurde das entwickelte Modell erweitert. Der zusätzliche Einsatz der MATLAB-Bibliothek PLECS bietet die Möglichkeit, ein hartes Schalten von Bauteilen zu simulieren und auf diese Weise den netzseitigen Frequenzumrichter (FU) einer WEA nachzubilden. Der FU wurde als dritte Energiequelle in das zuvor verwendete Modell eingebunden. Auch dieses Modell wurde in drei Teilmodelle aufgeteilt und die numerischen Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Gesamtmodells.

Die eingespeiste Leistung aus dem Gesamtmodell, bestehend aus Netz, einer Last sowie den drei Erzeugungsanlagen - zwei Generatoren und eine Windenergieanlage (WEA) als Quelle, d. h. einen Frequenzumrichter - wurde abschließend analysiert. Die Abbildung 9 zeigt den Start des ersten Generators ab $t_1 = 0$ s, den Start des zweiten Generators ab $t_2 = 50$ s und den Start der Einspeisung durch den Frequenzumrichter ab $t_3 = 75$ s. Zu beachten ist hier, dass die Generatoren eine Leistung von 400 MW bereitstellen können, wobei die WEA für eine Leistung von 5 MW ausgelegt ist. Entsprechend gering fällt der Beitrag der WEA bzw. das Absenken der eingespeisten Leistung durch die Generatoren aus.

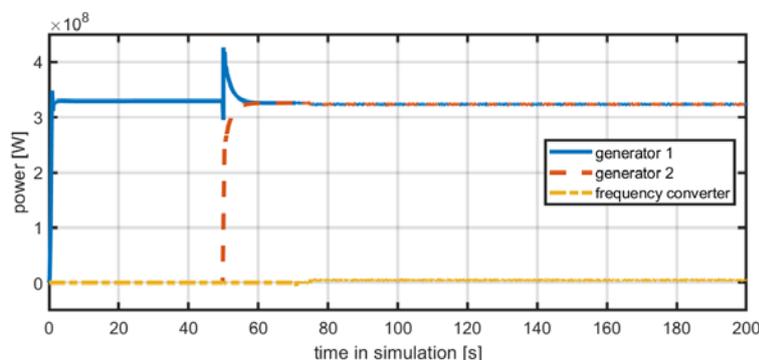


Abbildung 9: Eingespeiste Leistung der Generatoren und des Frequenzumrichters

Das Einspeisen von Energie durch eine zusätzliche Quelle kann hier als Störgröße für die zwei weiteren Quellen betrachtet werden. Wie zu erkennen ist, verringern diese ihre Energiezufuhr und reagieren so auf die Änderung im Netz. Dennoch bleiben die Netzspannung und die Netzfrequenz stabil. Hierzu wurde ein Beitrag auf der Konferenz PCIM 2021 unter dem Titel „Separation of Models for the Distributed Simulation of Electric Grids“ veröffentlicht.

AP3: Aufbau eines Gondelversuchsstands mit einer Nennleistung von 50 kW

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurde ein Windenergieanlagen-Gondelversuchsstand mit einer Nennleistung von 50 kW erfolgreich aufgebaut, erweitert und in Betrieb genommen. Das Ziel des Aufbaus ist es, das reale Verhalten der Windenergieanlage in einer sicheren Laborumgebung abzubilden und dabei die gesamte Gondel untersuchen zu können.

Parallel zum Aufbau des Gondelversuchsstands wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWES eine identische Anlage vom Typ Krogmann 15-50 im Freifeld zu Forschungszwecken aufgebaut. Mit dieser Anlage kann Windenergie-Forschung durchgeführt werden, die mit der Simulation beginnt, die Ergebnisse anschließend mit Hilfe von Tests in einer sicheren Laborumgebung verifiziert und mit Untersuchungen an einer realen Anlage abschließt. Das Konzept des Gondelversuchsstands ist in Abbildung 10 dargestellt.

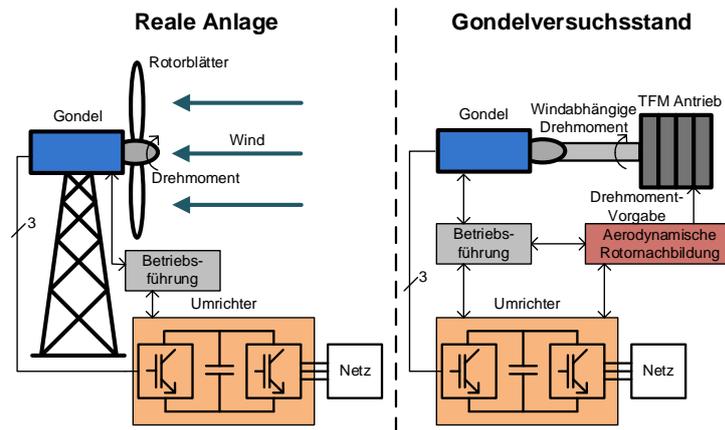


Abbildung 10: Konzept des Gondelversuchsstands

Für den Gondelversuchsstand wurde eine komplette Gondel der Windenergieanlage vom Typ Krogmann 15-50 in der Maschinenhalle des IALB aufgebaut, wobei auf Turm und Rotorblätter verzichtet wurde. Das Antriebsmoment wird in Echtzeit mit Hilfe einer aerodynamischen Rotornachbildung aus den realen Betriebsgrößen der WEA-Gondel berechnet und mittels einer direkt angetriebenen Transversalflussmaschine (TFM) eingestellt.

Abbildung 11 zeigt den Aufbau des Gondelversuchsstands.

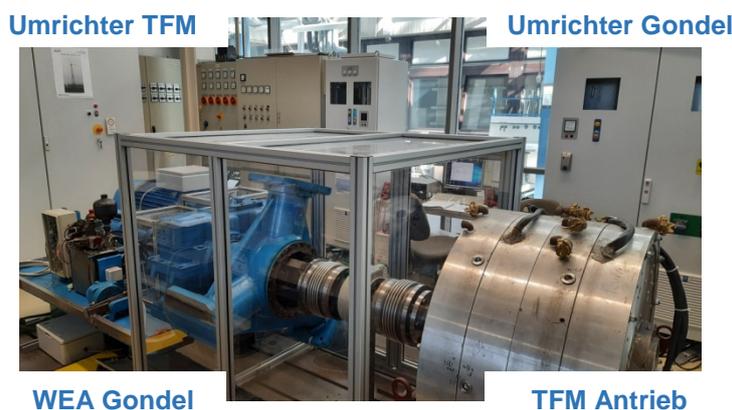


Abbildung 11: Aufbau des Gondelversuchsstands

Nach der Inbetriebnahme wurden die einzelnen Teilregelungen des Versuchsstands sowie die Regelung der Antriebsmaschine mit Hilfe von Messungen verifiziert und justiert. Für den Synchrongenerator der WEA wurde eine elektrische Erregung erarbeitet und abschließend die Betriebsführung der WEA samt Anlagensteuerung und Generatorregelung inklusive Pitchverstellung implementiert.

Um einen sicheren Betrieb des IALB-Gondelversuchsstandes zu ermöglichen, wurde ein umfangreiches Schutzkonzept ausgearbeitet und zur Anwendung gebracht.

Zur Berechnung der windabhängigen Antriebsleistung wurde eine aerodynamische Rotornachbildung erstellt, die das Antriebsmoment der TFM in Abhängigkeit der aktuellen Windgeschwindigkeit, der Drehzahl der Nabe sowie dem Pitchwinkel der WEA berechnet. Für die Abbildung der Aerodynamik wurde für das bestehende Blattprofil ein Kennlinienfeld des Leistungsbeiwertes des Rotors mit Hilfe von aerodynamischen Mehrkörpersimulationen in Simpack® erstellt.

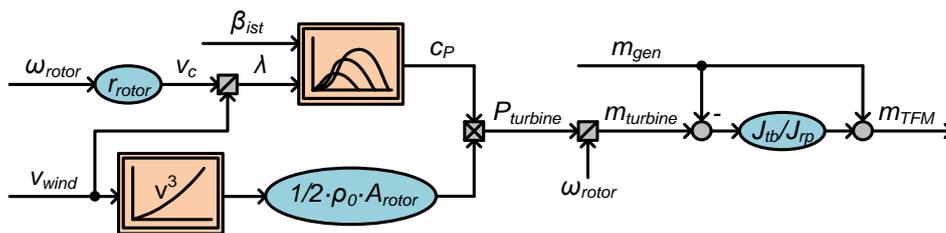


Abbildung 12: Blockschaltbild des Turbinenmodells

Die gesamte Windenergieanlage wurde erfolgreich in Simulationen mit MATLAB/Simulink untersucht. Dabei konnte das Anlagenverhalten der realen Anlage bestätigt werden und die Funktionalität der erarbeiteten Modelle wurde erfolgreich mittels Messungen verifiziert. Zwischen Turbinennachbildung, WEA-Regelung und SPS der Gondel wurde eine digitale Kommunikationsschnittstelle mit Hilfe von Ethercat® realisiert.

Durch diese Vorgaben ist es möglich, den Datenaustausch der einzelnen Subsysteme in Echtzeit zu realisieren. Die Anlagensteuerung der WEA wurde gänzlich auf eine moderne SPS migriert, die vollständig auf die Anlagensteuerung der Freifeld-Anlage abgebildet werden kann.

Die aerodynamische Rotornachbildung und die Ansteuerung der Pitchverstellung wurden gemeinsam auf dem Digitalen Signalprozessor (DSP) als Hardware-in-the-Loop Rotor realisiert. Dabei wird neben dem aerodynamischen Modell ein weiteres unterlagertes Modell der hydraulischen Pitchverstellung verwendet, welches aus den realen Ansteuersignalen der SPS den Pitchwinkel berechnet und diese entsprechend in die Regelung zurückführt, da die Rotorblätter am Gondelversuchsstand fehlen. Abbildung 13 zeigt das Konzept des umgesetzten Hardware-in-the-Loop Rotors.

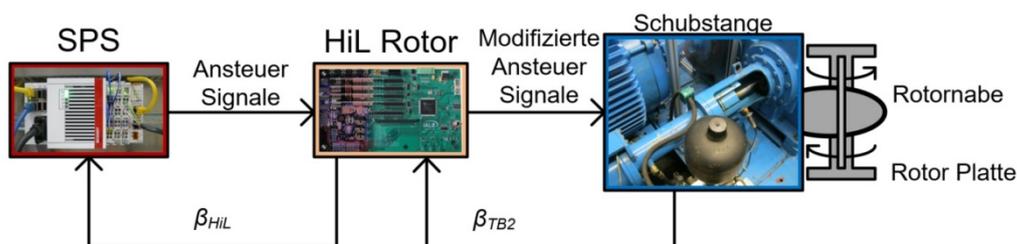


Abbildung 13: Finaler Aufbau des HiL Rotors

Abschließend wurde der Gesamtprüfstand kombiniert in Betrieb genommen und verifiziert. Der Generator wurde final vermessen und aus den Messwerten die Regelung abschließend ausgelegt. Die Leistungseinspeisung wurde für verschiedene Lastbereiche verifiziert. Darüber hinaus wurde experimentell untersucht, mit welchen Verfahren eine optimierte Netzintegration auf der Basis eines dazu angepassten Regelverfahrens realisiert werden kann. Analog zu konventionellen Kraftwerken soll sich der netzseitige Umrichter daher wie ein starr an das Netz gekoppelter Synchrongenerator verhalten. Dazu wurde die Regelung aus Abbildung 14 implementiert. Die Messergebnisse sind in Abbildung 15 gezeigt. Es konnten alle im Rahmen von HLE gesetzten Ziele erfolgreich umgesetzt werden.

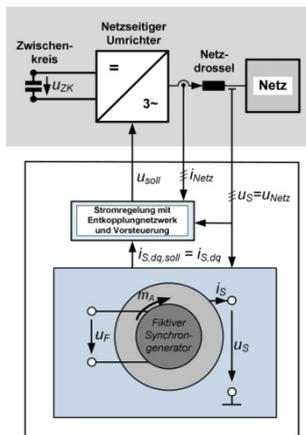


Abbildung 14: Prinzip des fiktiven Generators

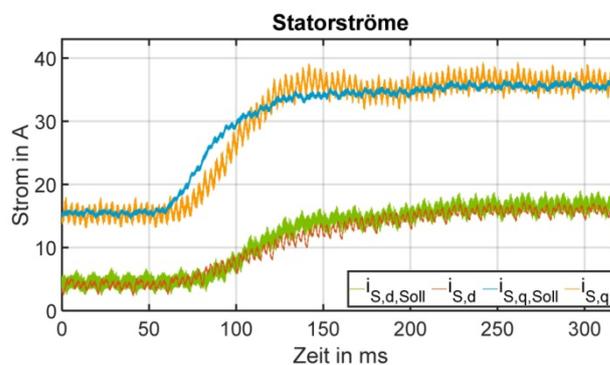


Abbildung 15: Vergleich zwischen den Soll- und Ist-Statorströmen des fiktiven Generators

Der oben beschriebene angepasste Prüfstand des IALB wurde auf Basis eines vor Jahren aufgebauten 50 kW WEA-Gondelversuchsstands weiterentwickelt. Zur Durchführung von praxisnaher Windenergie-Forschung an der Universität Bremen wurde 2016 ein freiprogrammierbarer Prüfstand realisiert. Ziel dieses Versuchsstandes ist es, das Verhalten einer realen Windenergieanlage in der Maschinenhalle vor Ort möglichst genau nachzubilden. Dazu wurde die komplette Gondel einer 50 kW Windenergieanlage „Krogmann 15-50“ mit demontierten Rotorblättern am IALB errichtet. Das Antriebsmoment des Windes wird durch eine aerodynamische Rotornachbildung berechnet und mit einer Transversalflussmaschine bereitgestellt. Dieser Maschinentyp eignet sich ideal für den Versuchsstand, da er hohe Antriebsmomente bei vergleichsweise geringen Drehzahlen (die Drehzahl einer Windenergieanlage liegt unter 60 U/min) ermöglicht. So können die Betriebsführung der Windenergieanlage, Regelungskonzepte in Verbindung mit dem zugehörigen Frequenzumrichter und die mechanischen Komponenten der Gondel ohne aufwändige Freifeldversuche erforscht werden. Durch die offene Programmierschnittstelle können immer wieder völlig neue Regelungsprogramme im Quellcode zur Prüfung innovativer Anlagensteuerungen implementiert bzw. entworfen werden. Die am IALB entwickelte Mikrorechnerkarte besitzt einen digitalen Signalprozessor (DSP) und entsprechender Peripherie und kann an eine Vielzahl von prüfstandspezifischen Herausforderungen adaptiert werden. Die eingesetzten Mikrorechner sind frei zugänglich, d. h. von der Steuerung der Anlage bis zur Erzeugung des Pulsmusters kann alles an neue Regelungskonzepte angepasst werden.

Beispiele für die untersuchten, innovativen Betriebsführungen sind die belastungsminimierenden Regelungen für Laufzeitverlängerungen und für die Erhöhung der WEA-Zuverlässigkeit oder auch die moderne Bereitstellung von Systemdienstleistungen, um Netzstabilität auch bei einem hohen Anteil an WEA zu gewährleisten.

Der Gondelprüfstand in Kombination mit dem Aufbau der Krogmann-Kleinwindenergieanlage in Bremerhaven dient dem Test neuartiger Regelungskonzepte. Es handelt sich hier um eine komplette WEA mit Netzanbindung. Neue Konzepte die im Labor unter sicheren Bedingungen erprobt wurden, können auf die reale WEA in Bremerhaven übertragen werden.

Im Vergleich zum großtechnischen Prüfstand für komplette Gondeln von Windenergieanlagen DynNab in Bremerhaven ist m IALB ist ein kompletter Teststand (WEA und Windnachbildung) entstanden, der für weitere Forschungsarbeiten unabhängig von externen Zulieferern genutzt wird.

Das Dynamic Nacelle Testing Laboratory (DyNaLab) wurde 2015 am IWES in Betrieb genommen. Es bietet allen Anlagenherstellern ein realitätsnahes Testumfeld im Multimegawattbereich für aussagefähige Labortests, die zur Beurteilung und Optimierung von bestehenden und künftigen Anlagenkonzepten beitragen können. Mit dem DyNaLab lassen sich Feldversuche unter realitätsnahen Bedingungen im Labor nachbilden. Mit einer Antriebsleistung von 10 MW und der Einleitung eines nominellen Drehmoments von 8.600 kNm werden die Prüfleistungen zur Prototypen-Validierung angeboten.

Durch die Netz- sowie die Hardware-in-the-loop (HiL)-Windlastsimulationen können unterschiedliche Belastungsszenarien unter reproduzierbaren Bedingungen erstellt werden und das Verhalten einer WEA bei Szenarien wie Multidips im Netz bei Sturm, Netzkurzschluss bei fehlerhafter Pitchregelung oder Notstopps getestet werden. Neben der Zertifizierung im Feld soll das DyNaLab damit die Möglichkeit bieten, die bislang langwierigen Zertifizierungen durch den Einsatz auf dem Prüfstand stark zu verkürzen, da im DyNaLab unterschiedliche Betriebsfälle beliebig oft angefahren werden können. Auf diese Weise lassen sich zudem die Betriebsführung und die Regelung optimieren sowie Modellvalidierungen durchführen. Die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Anlage können hierdurch gesteigert und gleichzeitig Wartungs- und Reparaturkosten gesenkt werden.

Während des Einsatzes wird in keinem Fall direkt in die Programmierung der Frequenzrichter zur Ansteuerung der Windenergiegeneratoren eingegriffen. Das DyNaLab stellt dabei die Antriebsmaschine (Windnachbildung) und das Netz zur Verfügung. Prüflinge (WEA Gondeln) kommen von externen Firmen.

AP4: Aufbau eines Versuchsstands für thermisch-elektrische Lastprüfungen

Im Projekt wird ein Teststand zur Prüfung vollständiger Baugruppen bzw. Großkomponenten von Leitungselektroniksystemen benötigt und für Langzeittests ausgelegt. Das Klima wird in einer Klimakammer mit einem Prüfvolumen von 1 m³ simuliert und mit diversen Sensoren überwacht. Wird der Prüfling innerhalb der Kammer betrieben, wird die Verlustleistung zu einer Störung des Klimas führen. Bei der Auslegung der Anlage wurde daher eingeplant, dass bei Klimaprüfungen eine Verlustleistung von bis zu 1.5 kW von der Kammer kompensiert werden kann.

Zur Klimakammer gehört weiterhin eine Belastungs- und Messanlage, um verschiedene elektrische Profile aufprägen und überwachen zu können. Zwei verschiedene Ansätze wurden verfolgt und aufgebaut:

- Mittelspannungsanlage mit Sicherheitsbeschaltung & herstellereitiger Steuerung
- „Power-in-the-loop“-System mit Hilfsumrichter für Modul- und Wechselrichterbelastung



Abbildung 16: Mittelspannungsanlage (Bild rechts), Hilfsumrichter (Bild links)

Im Projekt HLE konnte ein Leistungsblock bestehend aus Leistungsmodulen, Ansteuerung und Busbars im Mittelspannungssystem getestet werden. Der Hersteller hat für diesen Test eine Steuerungseinheit bereitgestellt; das am IALB entwickelte System dient zur Sicherung bzw. Überwachung des Prüflings in der Kammer. Es können sowohl Testspannungen als auch die Ströme zum Prüfling überwacht und im Fehlerfall eine Sicherheitsabschaltung ausgelöst werden. In diesem Fall, wird die Spannung vom Prüfling mittels einer externen Halbbrücke abgeschaltet und der Prüfling mit Relais (Schwerkraftrelais) geerdet, um Schäden zu vermeiden. Es sind verschiedene Fehlerfälle zu berücksichtigen:

- Außerplanmäßige Spannungsänderungen
- Stromänderungen
- Fehlerfälle der gelieferten Steuerung
- Klimaänderungen

Die Steuerung des Versuchsstands ist mit einem FPGA basierendem Echtzeitsystem realisiert, um jederzeit sichere Zustände gewährleisten zu können.

AP5: Entwicklung einer universellen Experimentierplattform

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde eine universelle Experimentierplattform für Leistungs- und im Speziellen für SKiiP-Module entwickelt. In Windenergieanlagen werden vermehrt Leistungshalbleiter der Firma Semikron verwendet und daher SKiiP-Module in großer Zahl verbaut. Diese Module werden werkseitig mit integrierter Ansteuerung und einem Kühlkörper geliefert. Für AP6 konnten gebrauchte SkiiP3-Module akquiriert werden, die aus WEA im Feld stammen und aufgrund eines Fehlerfalls ausgebaut wurden. Zur Feststellung möglicher Abweichungen von Nominalwerten, wurde ein Testzyklus für diese Bauelemente konzipiert und bestehende Messeinrichtungen modifiziert bzw. neu entwickelt. Im Einzelnen werden folgende Prüfungen am Bauteil durchgeführt:

- Niederspannungsmessung der Gate-Unit und des Halbleiters
- Durchgangs- und Blockierkennlinie
- Thermische Vermessung der Gate-Unit
- Dynamische Messung im Doppelpuls-Messplatz



Abbildung 17: Niederspannungsscharakterisierung eines SKiiP3-Moduls

In Abbildung 17 ist beispielhaft die erste Prüfung eines SKiiP3-Moduls abgebildet. Das Modul wird mit einem Tester für solche Module verbunden und verschiedene Daten abgefragt. In dieser Prüfung wird die Gate-Unit charakterisiert, um Fehler in einzelnen Komponenten der Leiterplatte zu lokalisieren. Weiterhin kann eine Vermessung der Halbleiter bei niedriger Leistung erfolgen, wobei jeder Schalter einzeln betrachtet wird.

Besteht ein Modul die Vorprüfung, kann es in zerstörenden Prüfverfahren getestet werden, um die Restlebensdauer zu berechnen. Hierfür stehen verschiedene Abläufe zur Verfügung:

- Klimatische Prüfung unter Hochspannung (elektrochemisch)
- Thermische-/klimatische Prüfung unter Last (schaltend, mit Hilfsumrichter AP4)
- Thermo-mechanische-Prüfung durch Lastwechsel

Die Prüfungen in AP5 sind mit Anpassungen bei der Ansteuerung für alle Arten von Leistungshalbleitermodulen anwendbar.

AP6: Experimentelle Untersuchungen leistungselektronischer Komponenten unter realitätsnahen Belastungen

Die Untersuchung von leistungselektronischen Komponenten im Arbeitspaket 6 wurde zum Teil mit der Hardware aus AP4 und AP5, als auch mit bestehenden Systemen aus dem Labor des IALB durchgeführt.

Auf Basis der universellen Experimentierplattform wurde eine Reihe von SKiiP3-Modulen vermessen und charakterisiert. Dabei stellte sich heraus, dass bereits ein Großteil der Fehler mit der Niederspannungsvermessung erfasst werden kann. Daraus ergibt sich ein sicheres Verfahren, um schnell und kostengünstig Aussagen zum Zustand des Bauteils treffen zu können.

Tabelle 3: Ergebnisse zur Vermessung der Gate-Unit der SKiiP3-Module

DUT →	New	DUT01			DUT02			DUT03			DUT04			DUT05			DUT06		DUT07		DUT08		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	B	C	B	C	A	B	C
Measurement ↓	Standby and switching mode power consumption																						
Standby consumption at +24V	30	32	29	71	31	30	31	30	30	29	30	29	30	31	31	30	29	30	29	29	116	30	
Standby consumption at 15V into +24V	45	48	44	114	46	45	46	46	45	45	45	45	46	46	47	46	44	46	45	45	44	186	45
Switching consumption_TOP	45	47	45	71	46	46	46	47	46	45	45	45	45	46	46	46	46	47	47	46	46	117	46
Switching consumption_BOT	44	32	44	71	45	45	45	46	45	44	44	44	44	45	45	45	45	46	46	45	45	137	45
	Sensors offset analogue data at no load and RT																						
I_HB1_ana	-5	-3	-4	-3	-1	-2	-4	-8	-1	-7	0	-5	0	-5	-4	-4	-5	-5	-3	-5	-3	-4	-6
I_HB2_ana	These two current sensors are not associated with GB type SKiiP module																						
I_HB3_ana	These two current sensors are not associated with GB type SKiiP module																						
Udc_ana	20	-22	7	5	-15	16	6	-8	10	-22	7	-1	7	0	9	12	15	7	2	8	-11	1	-16
Temp_ana	559	585	579	591	580	575	572	590	577	566	581	566	555	572	579	573	560	577	583	585	584	586	584

Bei DUT01 und 08 konnten so bereits Abweichungen zu den Nominalwerten festgestellt werden. DUT01 wurde daraufhin näher untersucht und thermisch mit einer Wärmekamera im Betrieb vermessen. Dabei wurden defekte Kondensatoren auf der Gate-Unit lokalisiert. In Abbildung 18 ist die Platine mit den fehlerhaften Kondensatoren zu sehen. Die Kondensatoren zeigten zum Teil Risse und Delamination des Isolationslackes auf. Durch zunehmende Degradation verlieren Kondensatoren ihre Kapazität und werden im Laufe der Zeit thermisch zerstört.

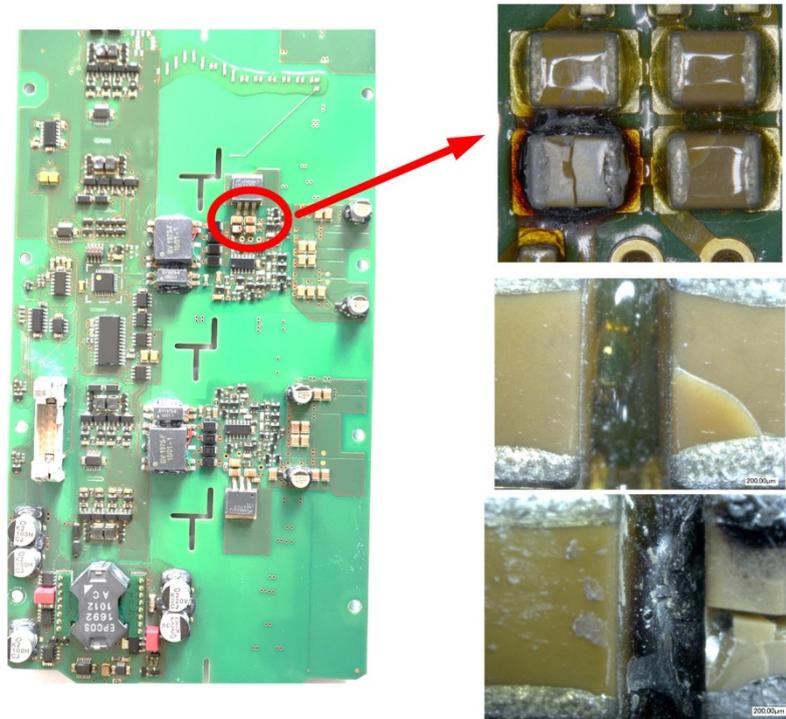


Abbildung 18: Gate-Unit mit defekten Kondensatoren

Auffällige Bauteile aus diesem Vortest wurden danach hinsichtlich der Durchlass- und Blockierfähigkeit charakterisiert und zeigten dort ebenfalls Abweichungen im Verhalten. Damit sind diese Bauteile nicht mehr innerhalb der Spezifikation und müssen aussortiert werden. Im Falle der anderen Module konnte lediglich eine spezifische Alterung festgestellt werden; ein weiterer Einsatz dieser Module in einer Anlage ist vorstellbar.

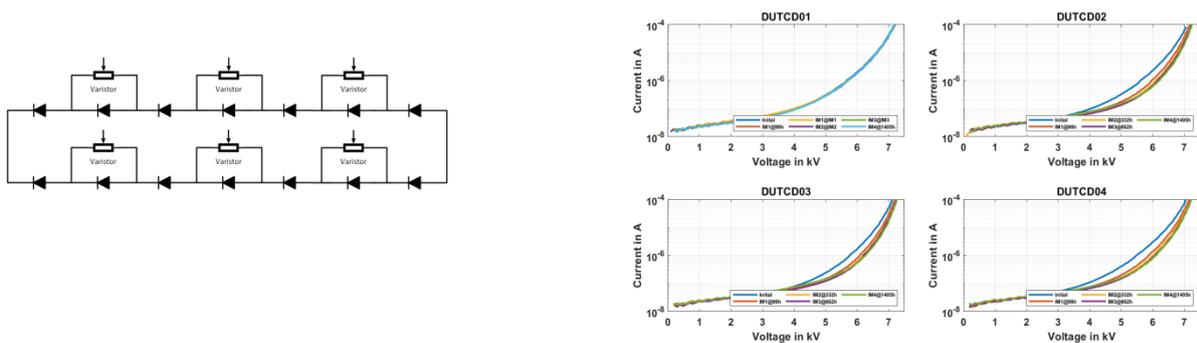


Abbildung 19: Im Test Hersteller A (links) und B (rechts)

Weitere Ergebnisse wurden an handelsüblichen IGBT-Modulen im Rahmen eines Temperatur-Feuchte-Tests gewonnen. Zwei verschiedene Hersteller mit Bauteilen in identischer Baugröße und Leistungsklasse wurden in einem Test unter 85 °C/85 % rel. F und 2.640 V getestet. In Abbildung 19 sind die Verläufe des Leckstroms während des Tests zu sehen, welcher als Indikator für zunehmende Degradation dient. Der Test lief deutlich über 1.000 h und am Ende der 1.400 h konnte Hersteller B mit einer deutlich besseren Zuverlässigkeit ermittelt werden.

Im zeitlichen Rahmen von AP6 wurde nicht nur Silizium-Technik vermessen, sondern auch neue Halbleiter wie Siliziumkarbid betrachtet. Unter anderem wurden 1.700 V SiC-MOSFETs als diskrete Bauelemente im TO247-Gehäuse getestet. Bei diesen Versuchsreihen wird der Fokus auf den Chip und nicht auf die Aufbau- und Verbindungstechnik gelegt. Vorherige Testreihen am IALB zeigten eine deutlich erhöhte Lebensdauer bei 1.200 V SiC-MOSFETs, dieses Ergebnis konnte bei den 1.700 V Bauteilen nicht bestätigt werden. Die gelieferten Halbleiter blieben deutlich hinter den Erwartungen und konnten (noch) nicht überzeugen. Für Windenergieanlagen ist der Spannungsbereich um 1.200 V eher nicht von Interesse, sodass SiC noch keine Alternative für Si-IGBTs ist. Zusätzlich zu den Einzelkomponententests wurde eine Testreihe mit einem leistungselektronischen System bestehend aus Halbbrückenmodulen und Ansteuerung durchgeführt.

Das Testobjekt ist eine Stufe eines Mittelspannungsumrichters und besteht aus folgenden Komponenten:

- Leistungsmodule mit Busbars, montiert auf Kühlkörper
- Ansteuerung mit Kommunikationseinheit und Gate-Unit
- Snubberschaltung aus Hochspannungsdiode und Kondensator

Im Vorfeld wurde die Snubberdiode in einem separaten Test auf ihre Zuverlässigkeit überprüft und analysiert. Die verwendete Hochspannungsdiode besteht aus mehreren 1.200 V-Si-Dioden, die parallel und in Reihe verschaltet wurden. Die Grundidee besteht darin, die maximale Spannung der Diode zu erhöhen, indem viele Dioden in Reihe geschaltet werden und die Potentiale dazwischen mit Varistoren abzusichern (siehe Abbildung 20 links). Verschaltet werden die Dioden auf einer Leiterplatte. So kann eine kostengünstige Alternative zu einer Hochspannungsdiode ermöglicht werden. Im Temperatur-Feuchte-Test konnte nur eine minimale Degradation über die Testzeit von 1.400 h festgestellt werden; betroffen waren ausschließlich die Dioden.

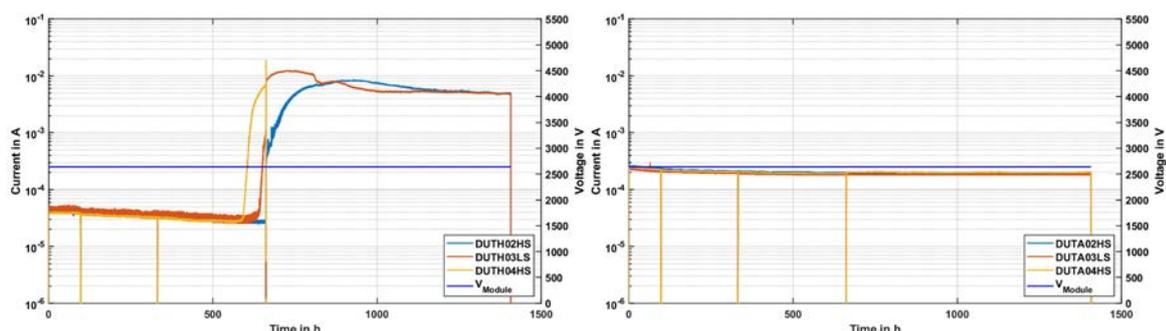


Abbildung 20: Diodenschaltung und Blockierkennlinien im Temperatur-Feuchte-Test

Der Rest der Leistungsstufe wurde in die Testanlage von AP4 integriert und im Betrieb getestet. Die Module werden ohne Last betrieben, bzw. werden im System kapazitiv umgeladen, um ein vollständiges Durchschalten der IGBTs zu ermöglichen.

Die Bauteile werden bei 85 °C und 85 % rel. F. innerhalb der Kammer angesteuert und takten bei einer Frequenz von ca. 500 Hz und 3.100 V.

Durch diese Konfiguration ergibt sich die Möglichkeit, bei Betrieb zu testen, ohne zu hohe Verluste innerhalb der Kammer zu erzeugen. Verursacht das Bauteil zu viel Abwärme, dann wird die Feuchtigkeit von den kritischen Stellen weggetrieben und richtet weniger Schaden an. Mittels dieses unbelasteten Schaltens kann der Einfluss von Spannungstransienten bei minimaler Erwärmung betrachtet werden. Aus den ersten Versuchen ergab sich bereits nach kurzer Zeit ein Schwachpunkt des Prüflings und eine kritische Komponente konnte identifiziert werden. Das Umladen erfolgt über eine Verschaltung von Folienkondensatoren und Widerständen. Die verwendeten Kondensatoren zeigten eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit bei den gegebenen Bedingungen. Bevor es zum Ausfall am Bauteil kommt, konnte der Fehler im entwickelten Überwachungssystem detektiert werden. Nach einigen hundert Stunden, verlor ein Kondensator die Kapazität und der mittlere Strom aus der Quelle sank ab, da weniger Kapazitäten umgeladen werden mussten. Dieser Fehlerfall konnte reproduziert und sogar beschleunigt werden. Ein Austausch der bestehenden Kondensatoren durch robustere, konnte dieses Problem lösen, ein längerer Betrieb des Bauteils war so möglich.

Aus den Testreihen im Projekt konnten Rückschlüsse auf Verbesserungen für leistungselektronische Komponenten getroffen werden. Die Untersuchung von gebrauchten SKiiP3-Modulen ergab eine erhöhte Fehlerquote in der Gate-Unit. Es ist daher anzunehmen, dass nicht zwangsläufig der Halbleiter ein Problem darstellt, sondern ein Augenmerk auf die Ansteuerung zu legen ist. Bestätigt wurde dies auch durch die Versuchsreihe am vollständigen System. Die Halbleiter haben keine Degradation gezeigt während die umliegende Beschaltung fehleranfällig ist.

Weiterhin verhielten sich Bauelemente mit Epoxid-Hartverguss als stabiler unter feuchten Bedingungen als Bauteile mit Si-Gel-Weichverguss. Es gibt auf dem Markt bereits einige wenige Hochleistungsmodule mit Hartverguss, welche eine verbesserte Leistung im Temperatur-Feuchte-Test erzielen könnten.

Ein weiterer, entscheidender Punkt ist die Vorkonditionierung der Komponenten bei kritischem Klima. Der Fehlerfall der Folienkondensatoren konnte beschleunigt werden, wenn der Betrieb des Prüflings ausgesetzt wurde. In diesem Zustand konnte die Feuchtigkeit ins Bauelement einziehen und wurde weniger durch die Abwärme verdrängt. Hierdurch konnte die Zeit bis zum Fehler deutlich verkürzt werden. Es ist daher ratsam eine Vortemperierung in den Windenergieanlagen vorzusehen, falls die Anlage bei feuchtem Wetter über längere Zeit steht.

AP7: Entwicklung von Dienstleistungsangeboten und Forschungsprojekten

Mit Blick auf das BCM-Partnernetzwerk „Mechatronik“ wurden bereits verschiedene neue Projektideen, auch insbesondere in Zusammenarbeit mit dem ForWind - Zentrum für Windenergieforschung geplant bzw. beantragt. Bis heute konnten drei aufbauende BMWi-Verbundvorhaben im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung beantragt werden.

Zwei BMWi-Vorhaben wurden innerhalb der HLE Projektlaufzeit bewilligt:

- Das Vorhaben „*Abgesicherte Verfahren zur herstellerunabhängigen Parametrierung und Nachrüstung der Regelung von Windenergieanlagen*“ (Akronym ConUp) startete im Oktober 2019. Ziel der Kooperation ist die Implementierung eines zusätzlichen temporären oder ständigen Systems zur Überwachung kritischer Betriebsparameter und die Entwicklung eines technisch-organisatorischen Verfahrens zum Nachweis der Standsicherheit von WEA, die mit dem Überwachungs- oder einem neuen Regelungssystem nachgerüstet wurden. Im Projekt „ConUp“ wird die Realisierung eines solchen Systems systematisch durch Simulationen, Windkanalversuche und Hardwaretests erforscht und exemplarisch an einer realen WEA demonstriert. Hierzu greift das Überwachungssystem auch auf ein neu entwickeltes Sensorsystem zur Echtzeitüberwachung der Blattdurchbiegung zurück. Ermöglicht werden diese im Rahmen einer Verwertung für Windparkbetreiber anzubietende Verfahren und Systeme durch die Kooperation der beiden ForWind-Universitäten Oldenburg und Bremen mit vier Unternehmen. Das Förderkennzeichen lautet: 03EE2012B.
- Das Vorhaben „*Konzept und Aufbau eines cyberphysischen Systems zur ganzheitlichen Entwicklung von Windenergieanlagen*“ (Akronym Wind I/O) startete im Juni 2020 mit sieben Partnern und einer Laufzeit von drei Jahren. Ziel der Kooperation ist ein ökologisch und ökonomisch optimierter Betrieb von Windrädern mithilfe eines Digitalen Zwillings. Material soll geschont, die Wartung unterstützt und die Windausbeute gesteigert werden. Auf der Webpage <https://www.bremestestturbine.science/> lässt sich der Fortschritt des Vorhabens verfolgen. Das Förderkennzeichen lautet: 03EE2015A.

Eine wichtige Aufgabe der transferorientierten Forschergruppe „Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen“ betrifft die Formulierung von weiterführenden Forschungen. Mit dem Vorhaben „*Netzwiederaufbau mit Windenergie und Wasserstoff*“ (Akronym: wind2grid) innerhalb des erweiterten Förderprogramm für Angewandte Umweltforschung (AUF) „Mehr Energieeffizienz und erneuerbare Energien – weniger CO₂-Emissionen“ wurde aufbauend auf den Erkenntnissen aus der HLE-Forscherguppe ein neues Forschungsprojekt im Januar 2020 bewilligt. Damit wird das HLE-Team um zwei weitere Doktoranden erfolgreich erweitert. Ziele des Forschungsvorhabens sind, Windenergieanlagen mittels einer neu zu entwickelnden Methodik zur Schwarzstartfähigkeit eigenständig in die Lage zu versetzen, aus dem Stillstand den Betrieb aufzunehmen und ggfs. segmentiert das Stromnetz wieder aufzubauen sowie innovative Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoffspeichern in räumlicher Nähe von erneuerbaren Erzeugungsanlagen zu erforschen. Dabei bildet auch die Nutzung des Simulations-Rechner-Clusters am IALB große Vorteile.

Während der Projektlaufzeit entwickelte die Forschergruppe am BCM ein Dienstleistungsangebot, um insbesondere den Wissenstransfer in Wirtschaft und Industrie zu vereinfachen. Das Dienstleistungsangebot wurde nach Art der Anwendung und dem Entwicklungsgrad strukturiert und gliedert sich in zwei wesentliche Bereiche:

- Bereich 1: Simulative Dienstleistungen
- Bereich 2: Test- und Messdienstleistungen für Komponenten

Innerhalb der Bereiche erfolgt eine weitere Gliederung nach verwendeter Methode und somit nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Zusammenfassend sind die einzelnen Dienstleistungsangebote je nach Bereich dargestellt. Die Definition des Leistungsumfangs jeder Dienstleistung wurde im Rahmen des Projekts ausgearbeitet.

Bereich 1:

- 1.1. Elektromagnetische Feldsimulationen basierend auf der Finiten-Elemente-Methode (FEM)
- 1.2. Simulation der Feuchteimpedanz von Einzelkomponenten
- 1.3. Thermische Simulation

Im Bereich der simulativen Dienstleistungen arbeitet das BCM als Dienstleister im gesamten Entwicklungsprozess wie in Abbildung 21 veranschaulicht. Auf Grundlage der Anforderungen wird in enger Abstimmung ein Lösungsansatz ausgewählt sowie ein Referenzdesign erstellt und ausgelegt.

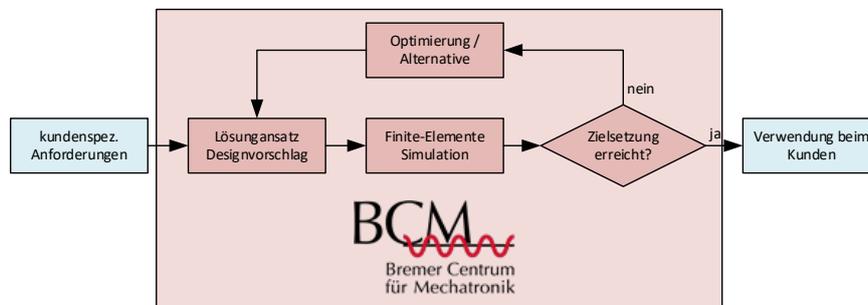


Abbildung 21: BCM als Dienstleister

Besondere Kompetenz hat sich das BCM bei der Entwicklung von neuartigen Lösungsansätzen für Sondermaschinen sowie neuartigen Antrieben und Bauteilen aufgebaut. Im Einzelnen sind dies:

- Klassische Asynchron- und Synchronmaschinen
- Synchronmaschinen in Sonderbauformen (z. B. Direktantriebe in Antriebswalzen)
- Rotierende Transversalfflussmaschinen bis 120 kW
- (Transversalffluss-) Linearmaschinen
- Reluktanzmaschinen
- Magnetlager
- Transformatoren und Drosseln

Bereich 2:

- 1.1 Spannungszyklen in Kombination mit H³TRB-Tests
- 1.2 Betrieb in der Klimakammer
- 1.3 Zuverlässigkeitstests für Kondensatoren

Der Bereich der Test- und Messdienstleistungen setzt zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess an. Im Gegensatz zu den simulativen Dienstleistungen liegt bereits ein evaluierbares Produkt oder ein Prototyp vor, dessen Verhalten spezifiziert wird.

Je nach vorliegender Fragestellung wird die Methodik gewählt. Einheitlich gilt für alle Methodiken, dass mögliche Ausfallmechanismen bzw. Ausfallszeitpunkte unter erhöhtem Bauteilstress identifiziert werden sollen und/oder die Komponentenparameter im Betrieb zu bestimmen sind.

Im Anschluss an die Test- und Messdienstleistungen kann direkt in einen iterativen Prozess übergegangen werden, um die Ursache der festgestellten - ggf. parasitären - Eigenschaften oder Fehlercharakteristik simulativ zu überprüfen und im Rahmen eines Re-Designs zu optimieren.

Im Rahmen des Projekts wurde das Dienstleistungsangebot strukturiert und für Wirtschaft und Industrie verwertbar ausgebaut. Das BCM unterstützt somit in seinem Dienstleistungsangebot im gesamten Entwicklungsprozess von dem Entwurf, über die Auslegung bis zum anschließenden Test und ggf. einer iterativen Optimierungsschleife.

Der im Vorhaben HLE angeschaffte Klimaschrank wurde neben weiteren, etwas kleineren Ausführungen im neuen universitären HiPE-LAB Testlabor für multimodale Lebensdaueruntersuchungen an Leistungselektronik bis 10 MVA in Betrieb genommen. Derzeit sind dort alle Kapazitäten an Prüfmöglichkeiten im Testbetrieb. Verschiedene Weltmarktführer im Leistungshalbeiterbereich wie ABB, ALSTOM, GE, Mitsubishi, Semikron, Siemens vergeben regelmäßig Aufträge an das IALB, so dass aus heutiger Sicht der Bereich der Klimaschränke auch langfristig vollständig ausgelastet sein wird. Die Erkenntnisse aus den Tests der Einzelkomponenten werden im Rahmen des HiPE-LAB auf ganze und von Firmen neuentwickelte Umrichtersysteme übertragen. Die mehrwöchigen Prüfungen von Frequenzumrichter im großen Klimaraum des HiPE-LABs werden aktuell von ENERCON und ConverTec nachgefragt.

Nach Bildung der Forschergruppe für Hochleistungselektronik ist das ausgebildete Personal in anschließende Projekte und in die Aktivitäten des HiPE-LAB überführt worden. Durch die permanente Projektakquirierung des BCM sind 2022 weiterführende Forschungsaufgaben auf dem Gebiet der Wide-Band-Gap Technik aufgenommen worden, beispielsweise wird ein neuartiger Frequenzumrichter mit SiC-Mosfets zur Ladung von Batteriespeichern erforscht. Die Führung der Forschergruppe ist in die Bereiche der Hochschullehrer des IALB übertragen worden. Die Bewerbung der Dienstleistungen und Messangebote wird durch die Flyer, Booklets und Roll-Up sowie Konferenz- und Messeauftritte (z. B. EPE 2022) des HiPE-LABs durchgeführt.

AP8: Veranstaltung von themenbezogenen Workshops



Nachdem die Grundlage zur Schaffung der Forschergruppe am BCM durch den Personalaufbau durch die Bündelung von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen aus dem BCM-Mitgliedsinstitut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) erzielt wurde, ist ein Programm zur öffentlichen Bekanntmachung und zur Vorbereitung von Workshops aufgesetzt worden. Die Maßnahmen umfassten eine ausführliche Pressemitteilung der Universität Bremen (veröffentlicht am 8. November 2017) und die Planung von Beiträgen und Workshops auf dem 7. Bremer Mechatronik-Tag.

Abbildung 22: HLE Projekt-Poster

In der vierjährigen Projektlaufzeit nahm die Forschergruppe „Hochleistungselektronik in Windenergieanlagen“ an einer Vielzahl von Konferenzen, Tagungen und Workshops teil. Die entstandenen Veröffentlichungen (siehe Tabelle 4) sind am Ende des vorliegenden Berichtes genannt.

Der erste Workshop am Bremer Centrum für Mechatronik (BCM) mit seiner Forschergruppe wurde am 22. Februar 2018 in den Räumlichkeiten der Handelskammer Bremen, IHK für Bremen und Bremerhaven veranstaltet. Während des 7. Bremer Mechatronik-Tages präsentierte das BCM das EFRE Vorhaben der interessierten Öffentlichkeit, bestehend aus etwa 50 Vertretern der Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Am 28.02.2019 wurden die Fortschritte des Vorhabens auf der Windenergietagung des DFMR (Deutsche Forschungsvereinigung für Mess-, Regelungs- und Systemtechnik) in Bremen präsentiert. Mehr als 100 Teilnehmer besuchten am 5. und 6. Juni 2019 im Konferenzsaal im Bremer Swissotel den Workshop zur Umrichterzuverlässigkeit in WEA. In Zusammenarbeit mit dem Mitgliedsinstitut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) und dem European Center for Power Electronics (ECPE) wurde der Workshop „Humidity and Condensation in PE Systems – Degradation Mechanisms and Lifetime Modelling“ durchgeführt. Die Bremer Forscher diskutierten zusammen mit dem Fachpublikum über die feuchtegetriebenen Ausfallmechanismen leistungselektronischer Bauelemente und den einhergehenden Herausforderungen in der Anwendung. Die Veranstaltung war aufgrund des großen Interesses massiv überbucht und hatte 96 Teilnehmer.



Abbildung 23: 7. Bremer Mechatronik-Tag, ECPE-Workshop, DFMRS-Windenergietagung

Unterstützt wurden die Auftritte durch die Bremer Koordinierungsstelle ForWind – das Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen, die derzeit ebenfalls am BCM angegliedert ist. Dadurch konnte ständig ein großes Netzwerk zur Verbreitung neuester Forschungsergebnisse genutzt werden. Um weitere Sensibilisierung der Windenergiebranche für das Thema Hochleistungselektronik herbeizuführen und kontrovers unter Einbeziehung der Hersteller zu diskutieren, wurde ein Symposium zur Umrichterzuverlässigkeit mit dem Titel „Reliability of the converter system“ mit Beteiligung der Forschergruppe organisiert. In Kooperation mit der EAWE (European Academy of Wind Energy) wurde in Hannover vom 25. – 28. Mai 2021 zur WESC (Wind Energy Science Conference) eingeladen. In dem Bremer Beitrag „Towards advanced testing of power electronic components and systems“ wurden die Arbeiten aus der Forschergruppe vorgestellt. Der Arbeitskreis Digitale Transformation des WAB e. V., dem in Bremerhaven ansässigen Branchenverband der Windenergiebranche, unterstützte die Forschergruppe bei der Organisation und stellte in dem Fachbeitrag „Predictive Data-Analytics für Frequenzumrichter in Windturbinen“ die technische Umsetzung einer Prognosefähigkeit für die Elektroniklebensdauer in Windenergieanlagen vor.



Die Aktivitäten der Forschergruppe werden zukünftig nahtlos weitergeführt. Zwei Mitarbeiter wurden an der Universität Bremen entfristet und stehen als Führungskräfte (wissenschaftliche und technische Leitung) für den Betrieb des neuen HiPE-LAB zur Verfügung.

Die Ergebnisse aus der Forschergruppe liefern einen wichtigen Beitrag zur Modellierung von modernen WEA-Triebsträngen und Generatoren am Netz. Diese Modelle werden zur Emulation von Generatoren mit Hilfe von Frequenzumrichtern im HiPE-LAB verwendet. Überdies werden zur Bedienung des Multimegawatt-Testlabors ausgewählte Mitglieder der Forschergruppe eingeplant.

Das Multimegawatt-Testsystem berücksichtigt vielfältige Lastfunktionen und stellt ein Angebot an die Windenergiebranche dar. Das Prüffeld ist anpassbar an Leistung und Betriebsspannung. Ein konstanter Wechsel der Temperaturen und Luftfeuchtigkeit simuliert die starke Beanspruchung der Bauteile. Unter klimatisch verschiedenen Bedingungen und stetig wechselnden elektrischen Belastungen lässt sich in dem Hochleistungslabor HiPE-LAB am IALB der Uni Bremen eine 20-jährige Komponenten-Lebensdauer simulieren. Das gewonnene Know-how der Forschergruppe wird sowohl die Belastungstests von innovativen Marktprodukten unterstützen, als auch zukunftsorientierte Forschungsaufgaben formulieren und durchführen.

Unser Dienstleistungsangebot

- Systemanalyse, Systemanalyse
- Erarbeitung und Auswahl von Testszenarien
- Modellbildung & Simulation
- Durchführung der Testszenarien
 - rein elektrische Belastung
 - klimatische Tests (Temperatur, Feuchte) sowie kombiniert mit elektrischer Belastung
- Einzelkomponententests/Bauteilcharakterisierung und Zwißelhemessung
- Sensorik und Messtechnik
 - Spannungsmessung, Strommessung
 - Temperaturmessung, Feuchtemessung und Störnungsmessung (Luft)
 - Hochdynamische Langzeitfassung und -speicherung der Messdaten
- Integration der Steuerung des Prüflings in den Prüfablauf zur Durchführung von vollautomatisierten Tests
- Analyse und Auswertung sowie Dokumentation der Messdaten und Ergebnisse

KONTAKT
 Universität Bremen
 Institut für elektrische Antriebstechnik, Leistungselektronik und Bauelemente
 Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlík
 Prof. Dr.-Ing. Rando Kaminiski

Telefon: 0421 / 218 - 626 81
 Fax: 0421 / 218 - 626 82
 eMail: ial@uni-bremen.de
 http://www.uni-bremen.de/IALB

HiPE-LAB
 Dr.-Ing. Wilfried Holzke
 Wissenschaftliche Leitung
 Universität Bremen / IALB
 Teichhof 0421 / 218 - 627 66
 eMail: holzke@lab.uni-bremen.de
 Klagenfurtstr. 3 | 28359 Bremen | http://www.uni-bremen.de/HiPE-LAB

Dipl.-Ing. Johannes Aßler
 Technische Leitung
 Universität Bremen / IALB
 Telefon 0421 / 218 - 626 75
 eMail: adler@lab.uni-bremen.de

Versuchslabor für multimodale Lebensdaueruntersuchungen an Leistungselektronik bis 10 MVA

Abbildung 24: HiPE-LAB Flyerentwurf

Überdies plant das IALB den Aufbau einer Anlage, mit der der Ausgleich dynamischer Leistungsschwankungen im Stromnetz erforscht werden kann. Dazu wird mit „grünem Wasserstoff“ Strom erzeugt, es handelt sich also um eine Versuchsanlage zur Rückverstromung von „grünem Wasserstoff“. Das Kraftwerk ist mobil und kann mit der Elektrolyse-Anlage für die Wasserstoffproduktion, die derzeit in Bremerhaven am Fraunhofer-Institut IWES aufgebaut wird, zusammengeschaltet werden. Finanziert werden soll die Anlage mit zwei Millionen Euro aus den Bremen zugesprochenen EFRE-Mitteln. Auch hier werden Forschende des abgelaufenen HLE-Vorhabens ihr Expertenwissen zur Untersuchung der grünen Schlüsseltechnologien einbringen und neue FuE-Projekte akquirieren und durchführen.

Die ständige Kompetenzgewinnung der Forschergruppe führte selbstverständlich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der angeschlossenen Arbeitsgruppen zu neuen wissenschaftlichen Einblicken im Bereich der Hochleistungselektronik. Coronabedingt wurden zwar ergänzend zum Bremer Mechatronik-Tag 2018 am BCM zu keinen weiteren Präsenzveranstaltungen eingeladen, allerdings konnte als herausragendes Highlight die ISPSD2024 nach Bremen geladen werden. Seit seiner ersten Durchführung 1988 hat sich das International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD) zur führenden Konferenz im Bereich der Leistungshalbleiterbauelemente entwickelt. Das Advisory Committee des ISPSD entschied im Nachgang der 2020er Konferenz in Wien, dass Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski vom IALB nächster europäischer General Chairman wird. Sein Konzept für das 36. ISPSD wurde bereits bestätigt, wonach die ISPSD mit ihren typisch 600-700 internationalen Teilnehmern in Bremen am Veranstaltungsort Glocke stattfinden wird.

Tabelle 4: Liste der Veröffentlichungen

Nr.	Titel der Veröffentlichung	Autor(en)	Konferenz
1	Wind Turbine Nacelle Test Bench Using an Optimized Torque Control and an Aerodynamic Real Time Model	Sören Behrens, Johannes Adler, Holger Raffel, Holger Schlöcker, Bernd Orlik	PCIM Europe 2018 
2	Distributed simulation of wind farm grids	Wilfried Holzke, David Matthies, Bernd Orlik	PCIM Europe 2019
3	Wind Energy Powered Electricity Grids	David Matthies, Alexander Ernst, Bernd Orlik	PCIM Europe digital days 2020
4	Real-Time Hardware-in-the-Loop Rotor for a Wind Turbine Nacelle Test Bench	Sören Behrens, Wilfried Holzke, Holger Raffel, Bernd Orlik	PCIM Europe digital days 2020
5	Dynamic Compensation Control with Adaptive Parameter Correction for Transverse Flux Machines	Sören Behrens, Holger Groke, Jannik Ulbrich, Bernd Orlik	ICEM 2020
6	Adaptive Reference Current Waveform Adjustment for the Torque Control of Transverse Flux Machines	Sören Behrens, Holger Groke, Bernd Orlik	PCIM Europe digital days 2021
7	Separation of Models for the Distributed Simulation of Electric Grids	Wilfried Holzke, Florian Redmann, Matthias Joost, Bernd Orlik	PCIM Europe digital days 2021