Abschlussbericht

Zum Projekt:
Analyse und Optimierung eines Kleinwindkraftanlagensystems (AOKWK)

Berichtzeitraum: 01.05.2014 - 31.12.2015

Förderung: EKSH Nr. 8/12-2

Projektlaufzeit: 01.05.2013-31.12.2015

Autor: Kristina Buchert

Datum: 6. Juni 2016 Bericht-Nr.: 01/16

Zusammenfassung:
In diesem Bericht werden die Ergebnisse des Projektes zusammengefasst. Er enthält sie die Analysen von drei Kleinwindkraftanalagensystemen, die aus einem Permanenterregten Synchrongenerator jeweils in Kombination mit einem Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller, einem Halbbrückengleichrichter und einem Zwei-Level-Wechselrichter bestehen. Hierbei werden Vergleiche bezüglich der Bemessungsleistung des Generators bei den verschiedenen Gleichrichtern, bezüglich der Bauleistung der Leistungshalbleiter der einzelnen Gleichrichter und bezüglich des Wirkungsgrades der Gleichrichter dargestellt.

Zusätzlich wird auf die in Kooperation mit Reese und Thies Industrieelektronik GmbH und ESCD GmbH entwickelte Platine des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller sowie auf eine Untersuchung bei unterschiedlich hohen Induktivitäten eingegangen.

Außerdem wird der geplante und tatsächlich zeitliche Ablauf gegenübergestellt, die in dem Projekt entstandenen Veröffentlichungen genannt und die Industriekooperation beschrieben.

Verteiler:

- EKSH - Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein
- Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Lehrstuhl für Leistungselektronik

Erstellung: K. Buchert

Genehmigung: F.W. Fuchs

F.W. Fuchs

Lehrstuhl für Leistungselektronik
Prof. Dr.-Ing. Friedrich W. Fuchs
Kaiserstr. 2, D-24143 Kiel (Gaarden), Tel. +49 431 880-6108, Fax +49 880-6103
E-Mail: fwf@tf.uni-kiel.de internet: http://www.tf.uni-kiel.de/etech/LEA/ 24143 Kiel

1. Einleitung

Ziel dieses Projektes ist die Analyse und Optimierung eines Generator-Umrichter-Systems für den Einsatz in Kleinwindenergieanlagen (KWEA). Kleine Windenergieanlagen sind in der IEC-Norm 61400-2 definiert. Dabei charakterisieren sie sich anhand ihrer Nennleistung von weniger als 70 kW, ihrer überstrichenen Rotorfläche, die kleiner als 200 m^2 ist, und ihrer Turmhöhe, die weniger als 20 m beträgt. Aufgrund der geringen Turmhöhen sind im Jahresdurchschnitt kleine Windgeschwindigkeiten zu erwarten. Zusätzlich treten häufig Verwirbelungen des Windes, verursacht durch Gebäude oder Bäume, auf.

KWEA müssen bis zu einer Leistung von weniger als 10 kW in Deutschland bisher keine Zertifizierung aufweisen. Daher ist ein Großteil der KWEA im Bereich von weniger als 10 kW auf dem Markt vorhanden. Dabei eignen sie sich beispielsweise für die Produktion in privaten Haushalten für den eigenen Verbrauch, als Inselsysteme in strukturschwachen Gebieten, in landwirtschaftlichen Betrieben oder in Gewerbegebieten.

2. Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse und Optimierung von Generator-Umrichter-Konzepten für KWEA mit einer Anschlussleistung von 10 kW im Hinblick auf die Kosten, die Verluste, den Wirkungsgrad und die Leistungsausbeute. Das Ziel sollte es sein, mit einer KWEA verschiedene vom Wind abhängige Drehzahlen, bei denen die Leistung maximal ist, wie sie beispielsweise in Abb. 2.1 dargestellt ist, anzufahren. Dies ist nur bei generatorseitigen Umrichtern, die in der Lage sind, die Drehzahl zu regeln, möglich, wodurch ausschließlich schaltende Umrichter-Konzepte in Frage kommen.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einem Konzept mit einer permanenterregten Synchronmaschine als Generatoreinheit, welche sich aufgrund ihrer Effizienz und ihres Volumens als Standardgenerator in KWEA bewährt hat. Das daraus folgende eingesetzte Umrichterkonzept besteht aus einem Gleich- und einem Wechselrichter, das Rotor und Generator mit dem Netz verbindet. Als typische Wechselrichtertopologie, die für die Konstanthaltung der Zwischenkreisspannung und die Netzeinspeisung eingesetzt wird, wird der Zwei-Level-Wechselrichter verwendet. Als Gleichrichtertopologie werden drei verschiedene Konzepte analysiert, welche in Abb.

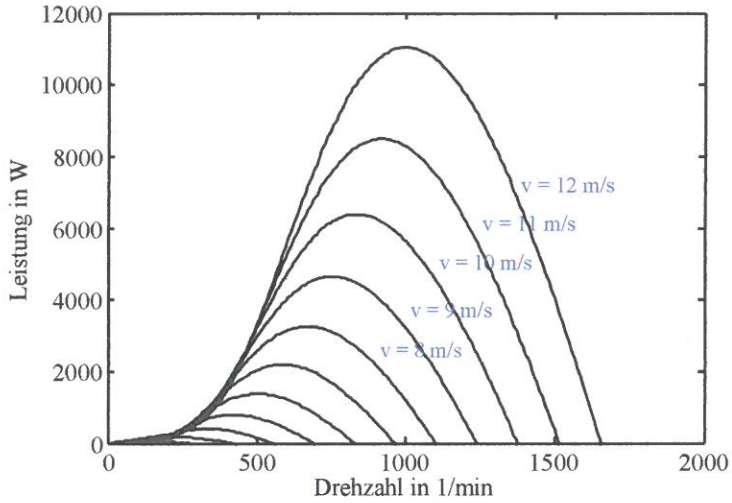


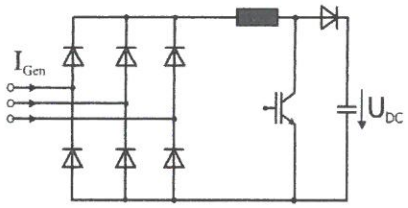
Abb. 2.1: Leistungskurven einer Windenergieanlage (Beispiel)

2.2 dargestellt sind. Hierbei handelt es sich um das Konzept des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller (HSS), des Halbbrückengleichrichters (HBR) und des Zwei-Level-Wechselrichters (VBR).

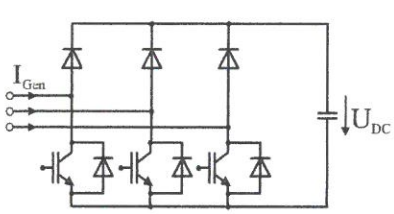
Die dargestellten Gleichrichter jeweils in Kombination mit einem Permanenterregten Synchrongenerator werden im Folgenden simulativ und labortechnisch untersucht.

3. Ergebnisse

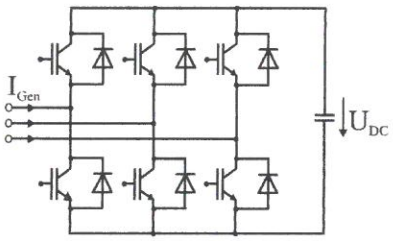
Im Folgenden wird ein Ausschnitt der Ergebnisse der Analysen der Generator-Umrichter-Konzepte dargestellt. Zunächst wird hierbei auf die optimale Auslegung des Generators in Kombination mit den zu untersuchenden Gleichrichten und anschließend auf die Auslegung der Leistungshalbleiter der einzelnen Gleichrichter eingegangen. Anschließend erfolgt eine kurze Darstellung des verwendeten Maximum-Power-Point-Tracking-Verfahrens, sowie die Darstellung der Laborergebnisse. Abschließend wird in diesem Kapitel eine Zusammenfassung und ein Fazit der gezeigten Analysen und Messergebnisse gegeben.



Diodengleichrichter + Hochsetzsteller



Halbbrückengleichrichter



Zwei-Level-Wechselrichter

Abb. 2.2: Gleichrichtertopologien

3.1 Optimale Auslegung der Systeme

Für das optimale Generator-Umrichter-Konzept müssen zum einen der Generator und zum anderen die Leistungshalbleiter der zu untersuchenden Gleichrichtertopologien optimal ausgelegt werden. Ziel der Auslegung ist es, die Kosten des Gesamtsystems zu minimieren.

3.1.1 Auslegung des Generators

Ziel bei der Auslegung des Generators ist es, mit dem eingesetzten Gleichrichter die geforderte elektrische Leistung von 10 kVA erzeugen zu können. Die Bemessungsleistung des Generators muss folglich, um die durch den eingesetzten Gleichrichter verursachten Verluste, größer sein als die geforderte elektrische Leistung. In dieser Arbeit werden die Verluste des Generators anhand der durch die Gleichrichter verursachten Grundschwingung und Harmonischen in den Generatorphasenströmen ermittelt. Die mechanischen Verluste werden vernachlässigt. Die Verluste, verursacht durch die Gleichrichter, können in Eisen- und Kupferverluste zusammengefasst werden und berechnen sich wie folgt [1, 2]:

$$P_{\mathrm{Fe}} = K_{\mathrm{Ed}} \sum_{n} (\omega_{gen})^2 I_{\mathrm{n}}^2 + K_{\mathrm{Hys}} \sum_{n} (\omega_{gen}) I_{\mathrm{n}}^2 \tag{3.1}$$

$$P_{\mathrm{cu}} = I_{\mathrm{rms}}^2 \cdot R_{\mathrm{cu}} \tag{3.2}$$

Hierbei wird angenommen, dass der Generator, unabhängig vom eingesetzten Gleichrichter, die gleiche Materialkonstanten für die Wirbelstromverluste K_{Ed} und Hystereseverluste K_{Hys} aufweist.

Die Generatorbemessungsleistung bezogen auf die Nennleistung, berechnet sich wie folgt:

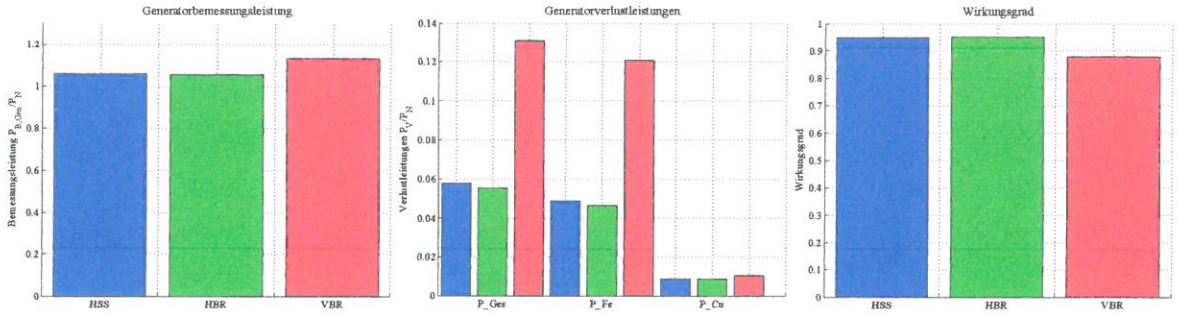
$$P_{\mathrm{Verluste,gen}} = P_{\mathrm{Fe}} + P_{\mathrm{cu}} \tag{3.3}$$

$$\frac{P_{\mathrm{Gen,B}}}{P_{\mathrm{N}}} = \frac{P_{\mathrm{N}} + P_{\mathrm{Verluste,Gen}}}{P_{\mathrm{N}}} \tag{3.4}$$

Um die durch die Gleichrichter verursachten Verluste zu ermitteln, werden die Harmonischen des Generatorphasenströme der einzelnen Gleichrichtertopologien im Nennbetriebspunkt mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) berechnet.

Abb. 3.1 zeigt die Generatorbemessungsleistungen, die Generatorverlustleistungen und den Wirkungsgrad eines Generator-Umrichter-Konzeptes mit einem PMSG in Kombination mit einem Hochsetzsteller (HSS), einem PMSG in Kombination mit einem Halbbrückengleichrichter (HBR) und einem Permanent erregten Synchrongenerator in Kombination mit einem Vollbrückengleichrichter (VBR).

Der Vergleich der aufzubringenden Generatorbemessungsleistung zeigt, dass ein Permanent erregter Synchrongenerator, eingesetzt mit einem Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller und einem Halbbrückengleichrichter, eine kleinere Bemessungsleistung aufweisen muss, als ein Permanent erregten Synchrongenerator mit einem Vollbrückengleichrichter, um, unter Berücksichtigung der Verluste verursacht durch die Grundschwingung und die Harmonischen der Generatorphasenströme, die gleiche Nennleistung am Generatorausgang zu erreichen. Werden die Verluste näher betrachtet, so ist zu erkennen, dass die Eisenverluste den größten Anteil an den Verlusten ausmachen. Zudem ist zu erkennen, dass das Konzept mit einem Vollbrückengleichrichter die größten Verluste aufweist und folglich den geringsten Wirkungsgrad hat.



(a) Generatorbemessungsleistung (b) Generatorverlustleistung (c) Wirkungsrgad

Abb. 3.1: Generatorbemessungsleistung, Generatorverluste aufgeteilt in Gesamt-, Eisen- und Kupferverluste, Oberschwingungen der Generatorphasenströme und Wirkungsgrad des Generators in Kombination mit einem Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller (HSS) (blau), einem Halbbrückengleichrichter (HBR) (grün) und einem Zwei-Level-Wechselrichter (VBR) (rot)

3.1.2 Halbleiterbauleistung

Bei der Auslegung der Leistungshalbleiter ist es das Ziel, die Kosten für die verwendeten Leistungshalbleiter bei möglichst gleichen Systembedingungen zu vergleichen. Die Vergleichsbasis stellt die virtuelle Chipfläche, die proportional zu einem virtuellen Strom ist, für die maximale Junction-Temperatur dar. Es wird angenommen, dass die Kosten und das Volumen der Leistungshalbleiter mit größerer Chipfläche und folglich der höheren Stromtragfähigkeit steigen. Bei den eingesetzten Leistungshalbleitern ist der begrenzende Faktor die maximale thermische Belastbarkeit. Die Sperrschichttemperatur darf nicht überschritten werden. Bei gleicher Bemessungsleistung werden im Folgenden die Leistungshalbleiter auf die gleiche Junction-Temperatur von 125 °C in Bemessungspunkt von 10 kVA ausgelegt. Dafür wird ein virtueller Leistungshalbleiter an Anlehnung an [3] auf Basis des in der Abb. 3.2 dargestellten Algorithmus ausgelegt.

Die installierte Bauleistung, welche im Folgenden für die einzelnen Gleichrichter miteinander verglichen wird, ist durch die auf die Gesamtleistung des jeweiligen Gleichrichters bezogene Halbleiterbauleistung, wie die Gleichung 3.5 zeigt, definiert [4]. Unter der Annahme, dass die Diode im Vergleich zum Leistungshalbleiter die halbe Chipfläche benötigt, fließt die Bauleis-

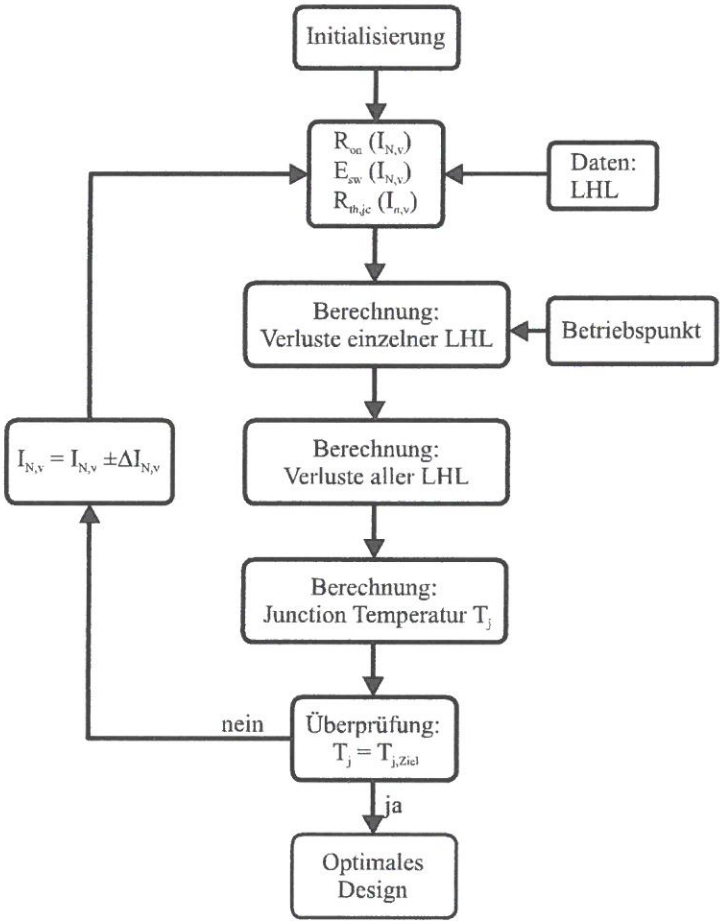
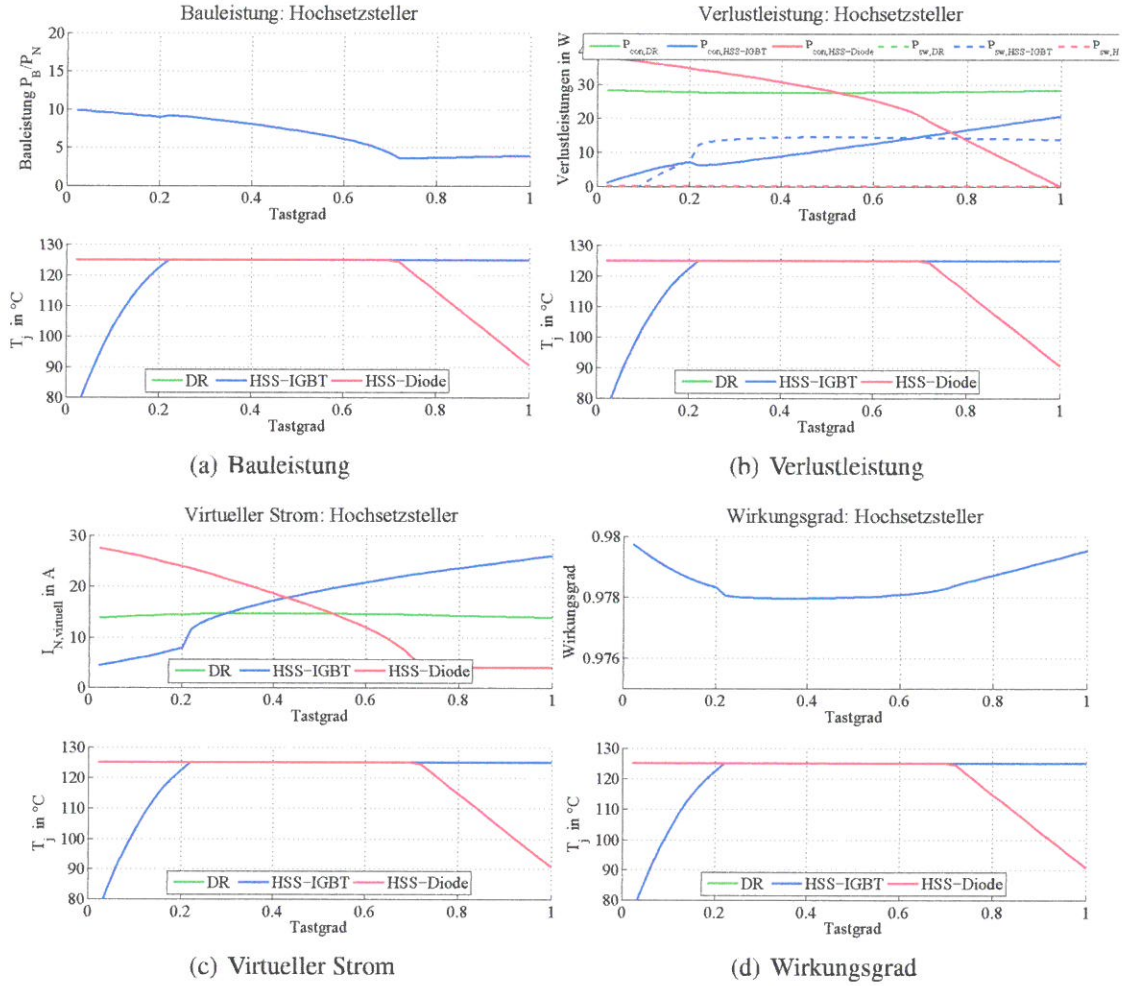


Abb. 3.2: Algorithmus zur Berechnung eines virtuellen Leistungshalbleiters in Anlehnung an [3]

tung der Diode zur Hälfte in die Gesamtbauleistung ein [3].

$$P_{\mathrm{HL,norm}} = \frac{P_{\mathrm{HL}}}{P_{\mathrm{GL}}} = \frac{\sum P_{\mathrm{IGBT}} + \frac{1}{2}\sum P_{\mathrm{Diode}}}{P_{\mathrm{GL}}} \tag{3.5}$$

Abb. 3.3 zeigt die Bauleistung, die Verlustleistung, den virtuellen Strom und den Wirkungsgrad des Hochsetzstellers aufgeteilt in den Diodengleichrichter, den IGBT des Hochsetzstellers und die Diode des Hochsetzstellers bei verschiedenen Tastgraden. Die in der Simulation angenommen Parameter sind in Tabelle 7.1 im Anhang dargestellt. Bei höheren Tastgraden steigen die Schalt- und Leitverluste des IGBT des Hochsetzstellers an, während die Leitverluste der Hochsetzstellerdiode sinken. Die Temperatur des Leistungshalbleiters des Hochsetzstellers steigt bis zur maximalen Junction-Temperatur. Um die maximale Junction-Temperatur nicht zu überschreiten, muss folglich die virtuelle Stromtragfähigkeit steigen. Analog verhält sich die Hochsetzstellerdiode. Die Bauleistung sinkt mit höheren Tastgraden, was auf die am stärker fallende virtuelle Stromtragfähigkeit der Hochsetzstellerdiode zurückzuführen ist. Die virtuelle Stromtragfähigkeit ist auf minimal 4 A begrenzt, welche bei einem Tastgrad von $a < 0{,}25$ für den IGBT und $a > 0{,}73$ bei der Diode erreicht wird. Die Temperatur erreicht folglich ihr Maximum in diesem Betriebsbereichen nicht.



(a) Bauleistung

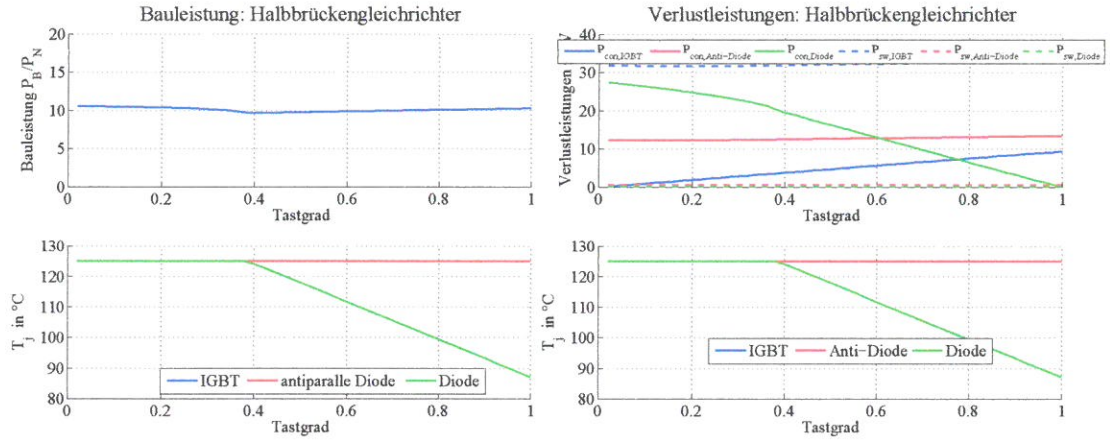
(b) Verlustleistung

(c) Virtueller Strom

(d) Wirkungsgrad

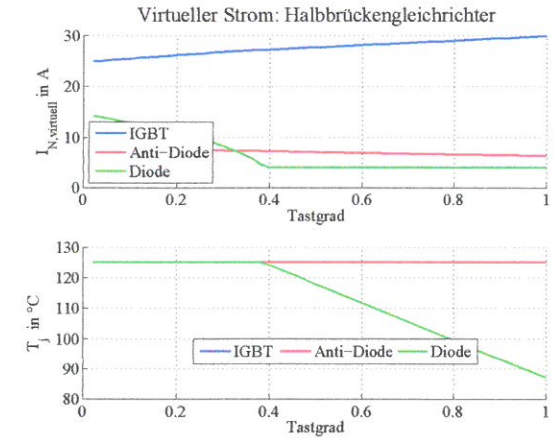
Abb. 3.3: Auslegung der Leistungshalbleiter des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller bei einer Bemessungsleistung von $P_B = 10\,\text{kVA}$ und $\cos(\phi) = 1$

Abb. 3.4 zeigt die Bauleistung, die Verlustleistung, die virtuelle Stromtragfähigkeit und den Wirkungsgrad des Halbbrückengleichrichters aufgeteilt in seine Leistungshalbleiter, dessen antiparallele Diode und seine Diode. Damit der Leistungshalbleiter die maximale Junction-Temperatur nicht überschreitet, steigt die virtuelle Stromtragfähigkeit bei höherem Tastgrad an. Die virtuelle Stromtragfähigkeit der Diode sinkt mit steigendem Tastgrad bis zur minimalen virtuellen Stromtragfähigkeit von 4 A, wodurch die Junction-Temperatur der Diode sinkt. Aufgrund der sinkenden Leitverluste der Diode, bei gleichzeitig schwächerem Steigen der Leitverluste des Leistungshalbleiters, steigt bei höheren Tastgraden der Wirkungsgrad.

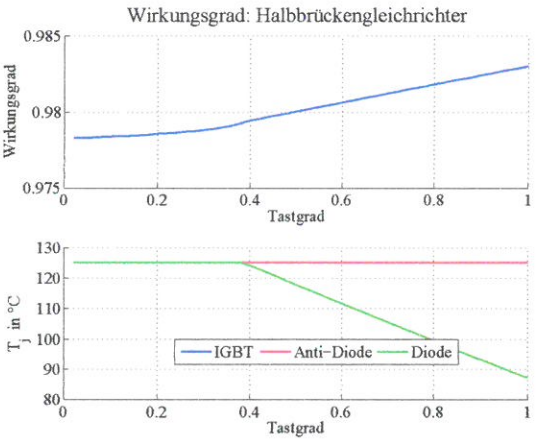


(a) Bauleistung

(b) Verlustleistung



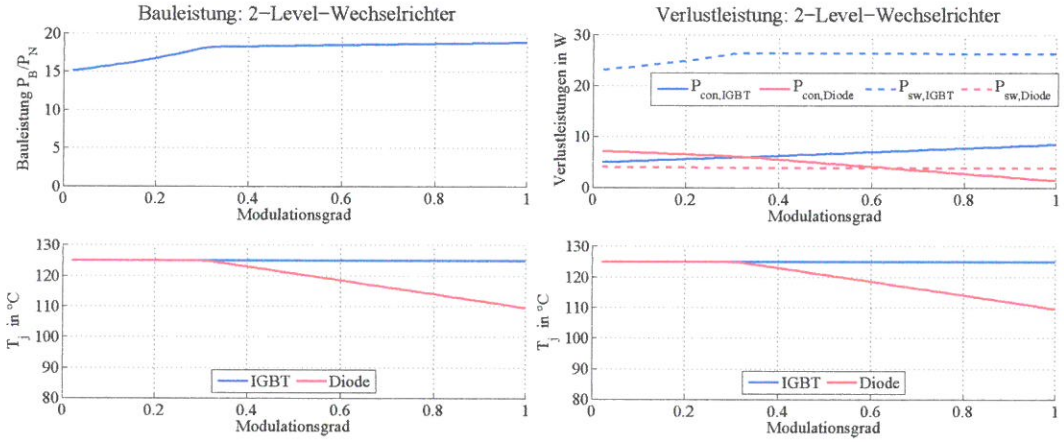
(c) Virtueller Strom



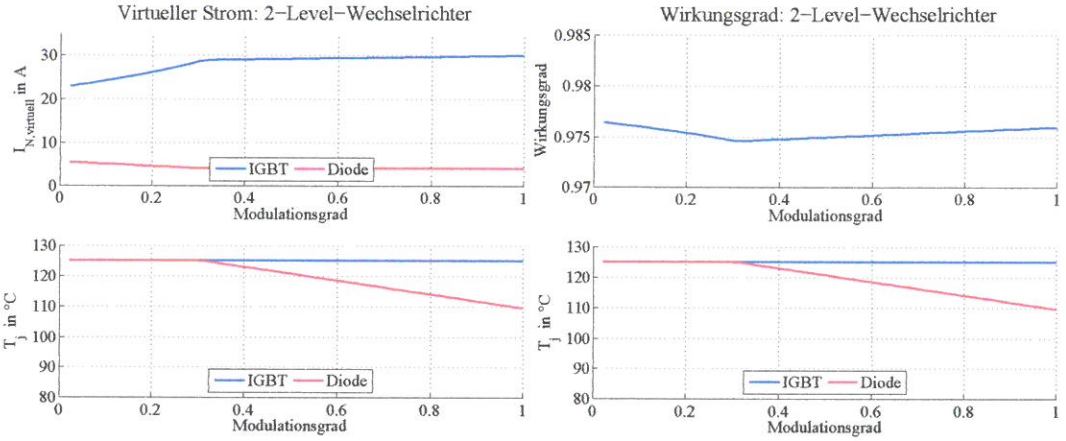
(d) Wirkungsgrad

Abb. 3.4: Auslegung der Leistungshalbleiter des Halbbrückengleichrichters bei einer Bemessungsleistung von $P_B = 10\,\text{kVA}$ und $\cos(\phi) = 1$

Abb. 3.5 zeigt die Bauleistung, die Verlustleistung, die virtuelle Stromtragfähigkeit und den Wirkungsgrad des Zwei-Level-Wechselrichters aufgeteilt in seinen Leistungshalbleiter und dessen antiparallele Diode. Um die maximale Junction-Temperatur des Leistungshalbleiters nicht zu überschreiten, steigt die virtuelle Stromtragfähigkeit und folglich die Bauleistung mit höherem Modulationsgrad. Die antiparallele Diode erreicht die minimale virtuelle Stromtragfähigkeit von 4 A, sodass die Junction-Temperatur der Diode sinkt. Die Leitverluste der Dioden nehmen stärker ab als die Leitverluste des schaltenden Leistungshalbleiters zunehmen, sodass sich der Wirkungsgrad mit steigendem Modulationsgrad erhöht.



(a) Bauleistung (b) Verlustleistung



(c) Virtueller Strom (d) Wirkungsgrad

Abb. 3.5: Auslegung der Leistungshalbleiter des Zwei-Level-Wechselrichters bei einer Bemessungsleistung von $P_B = 10\,\text{kVA}$ und $\cos(\phi) = 1$

Abb. 3.6 stellt die Bauleistung und den Wirkungsgrad der einzelnen Gleichrichter gegenüber. Es zeigt sich, dass die Bauleistung des Zwei-Level-Wechselrichters (VBR) am größten ist, die des Halbbrückengleichrichters (HBR) mit einem kleinem Abstand am zweitgrößten und die des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller (HSS) am geringsten. Folglich ist das System mit den geringsten Kosten der Hochsetzsteller. Werden die Wirkungsgrade der einzelnen Gleichrichter miteinander verglichen, so zeigt sich, dass der Halbbrückengleichrichter den höchsten Wirkungsgrad aufweist.

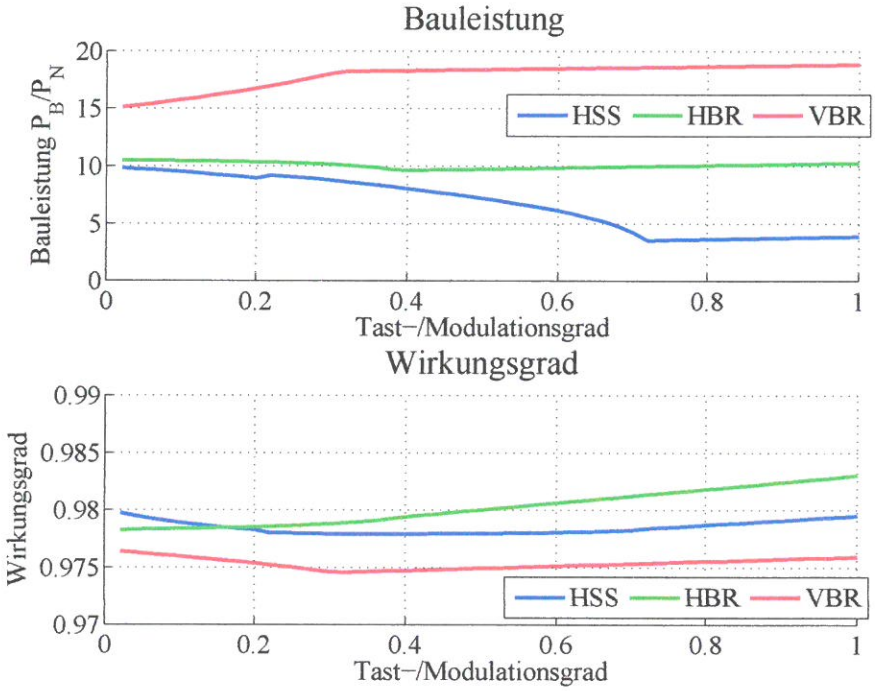


Abb. 3.6: Vergleich der Bauleistungen der einzelnen Gleichrichtertopologien

Aufgrund der geringen Bauleistung des Hochsetzstellers und den höchsten Wirkungsgrad des Halbbrückengleichrichters werden beide Topologien ausgewählt und tiefergehend im Labor untersucht. Hierbei werden für den Laboraufbau die in der Tab. 3.1 gezeigten realen Leistungshalbleiter verwendet.

3.2 Analyse der Maximum-Power-Point-Tracking-Verfahren

Als Optimierungsverfahren werden die Maximum-Power-Point-Tracking-Verfahren betrachtet, welche die Leistungen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten maximieren. Für den Ein-

	Diodengleichrichter	Diode	Leistungshalbleiter
Hochsetzsteller	*IDW20G120*	*IDW30G120*	*IKW30T120*
Halbbrückengleichrichter	-	*IDW20G120*	*IKW30T120*
Zwei-Level-Wechselrichter	-	-	*IKW40T120*

Tab. 3.1: Übersicht über die im Aufbau verwendeten Leistungshalbleiter

satz in Kleinwindenergieanlagen eignet sich das Hill-Climbing-Search, welches sich durch seine einfach Umsetzbarkeit, da kein Anemomenter verwendet werden muss und die Systemparameter der Windenergieanlage nicht bekannt sein müssen, auszeichnet. Tiefergehenden Untersuchungen der einzelnen Verfahren bei verschiedenen Windprofilen, die durchgeführt wurden, werden in der in Bearbeitung befindlichen Dissertation dargestellt.

3.3 Laborergebnisse der Gleichrichtertopologien

Abb. 3.7 zeigt den prinzipiellen Laboraufbau. Der permanenterregte Synchrongenerator (PMSG) wird durch eine Gleichstrommaschine (GM) angetrieben. Als Gleichrichter werden der Diodengleichrichter in Kombination mit einem Hochsetzsteller und der Halbbrückengleichrichter eingesetzt. Als netzseitiger Umrichter wird ein zweistufiger Wechselrichter, welche die Zwischenkreisspannung konstant hält, eingesetzt. Die verwendeten Parameter für den Laboraufbau sind in Tabelle 7.1 im Anhang dargestellt.

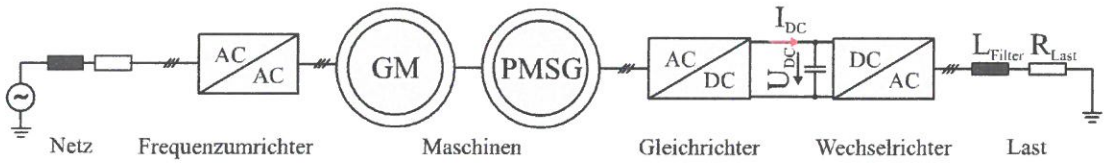


Abb. 3.7: Laboraufbau

Abb. 3.8 zeigt die mechanisch erzeugte Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl für den Gleichrichter mit einem Hochsetzsteller und den Halbbrückengleichrichter. Bei kleinen Drehzahlen kann keine Leistung erzeugt werden, während die Leistung bei höheren Drehzahlen steigt.

Der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl des Diodengleichrichters mit einem Hochsetzsteller und des Halbbrückengleichrichters ist in Abb. 3.9 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad, insbesondere bei kleineren Drehzahlen, beim Halbbrückengleichrichter höher ist.

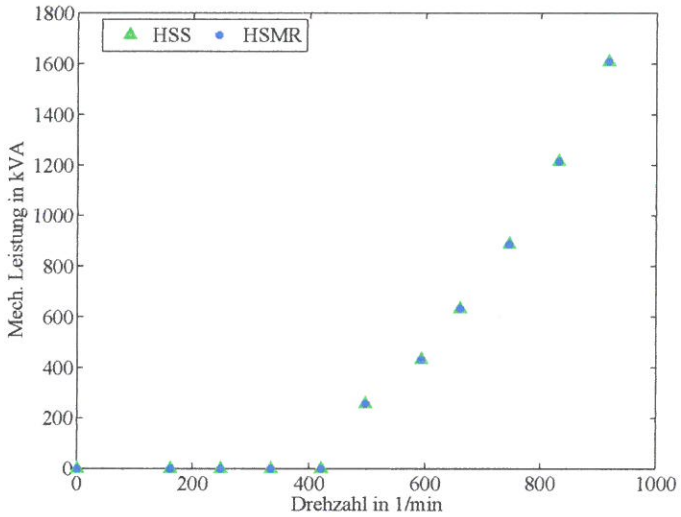


Abb. 3.8: Mechanische Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl

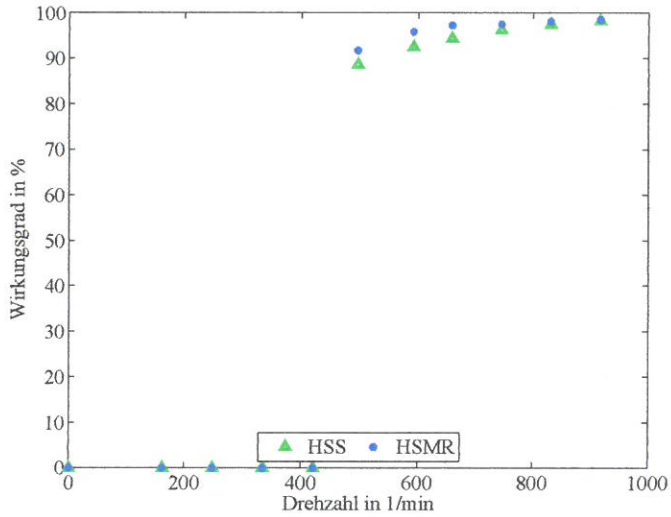


Abb. 3.9: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl

3.4 Laborergebnisse mit Industriekooperation

Da der Diodengleichrichter mit einem Hochsetzsteller die geringste Bauleistung aufweist, wird dieses System ausgewählt und in Kooperation mit der Reese und Thies Industrieelektronik GmbH und ESCD GmbH als industrielles Muster umgesetzt und dieses im Labor getestet. Dabei wird eine Elektronikflachbraugruppe, die den Diodengleichrichter, die Induktivität, den Leistungshalbleiter und die Diode, den DC-Zwischenkreis, den Treiber zur Ansteuerung des Leistungshalbleiters, die Strom- und Spannungsmessungen für die Regelung und die Schnittstelle zur Kommunikation zum DSpace-System beinhaltet, entworfen und in Itzehoe bei Reese und Thies optimal ausgelegt. Nach Erstellung des Layouts, fertigt und bestückt die ESCD GmbH die Platine. Im Labor der CAU wird diese schließlich in Betrieb genommen. Die Untersuchungen umfassen, neben der allgemeinen Funktionsfähigkeit, die Auswirkungen der Höhe der Induktivität der Spule auf den THD-Wert der Generatorphasenströme und auf den Wirkungsgrad des Hochsetzstellersystems. Die bestückte Platine ist in Abb. 3.10 dargestellt.

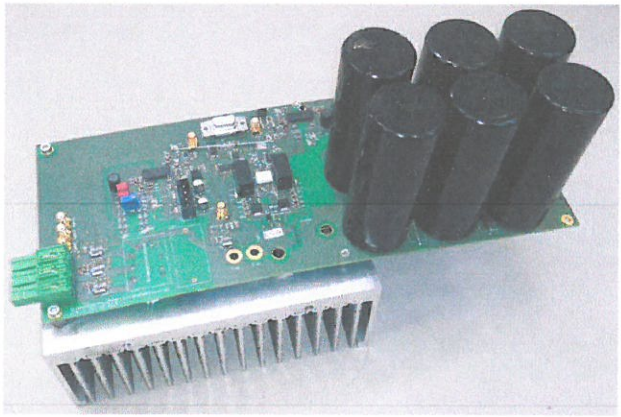
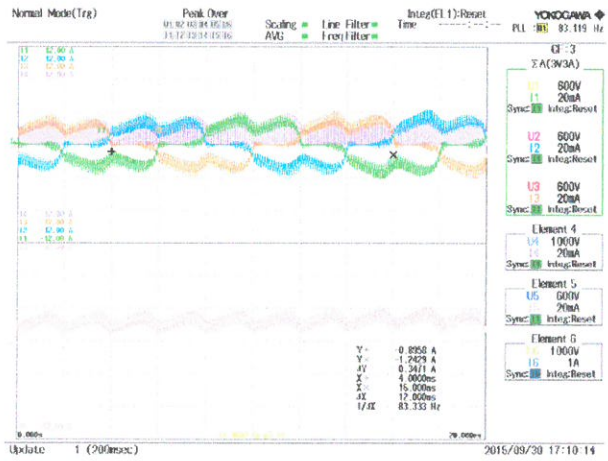
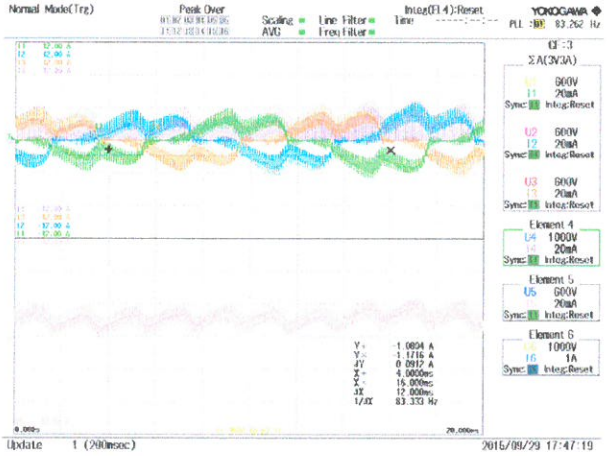


Abb. 3.10: Industrielles Musster des Hochsetzstellers Entwurf mit Reese und Thies, gefertigt mithilfe von ESCD

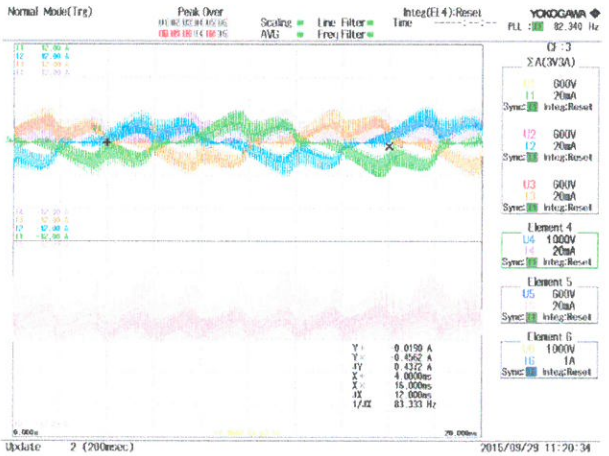
Abb. 3.11 zeigt die Phasen-, Zwischenkreis- und Induktivitätsströme des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller bei einer Induktivität von 2 mH und 0,51 mH sowie bei dem Einsatz ohne Induktivitäten bei einer Drehzahl von $831\,\mathrm{min}^{-1}$ und einer erzeugten Leistung von 1,2 kVA. Bei höherer Induktivität ist die Stromwelligkeit in den Phasen- und Zwischenkreisströmen geringer. Wird keine Induktivität eingesetzt, so weisen die Phasen- und Zwischenkreisströme einen lückenden Betrieb auf, welcher sich auf den THD-Wert auswirkt.



(a) 2 mH



(b) 0,51 mh



(c) Ohne Induktivität

Abb. 3.11: Stromverläufe des Hochsetzstellers bei verschiedenen Induktivitäten: Phasen (I_1,I_2,I_3)-, Zwischenkreis- (I_4) und Induktivitätsstrom (I_5)

Abb. 3.12 zeigt den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl für Induktivitäten von 0 – 2mH bei verschiedenen Drehzahlen. Der Wirkungsgrad ohne Einsatz einer Induktivität ist am höchsten. Wird der THD-Wert der Generatorphasenströme genauer untersucht, so zeigt sich in

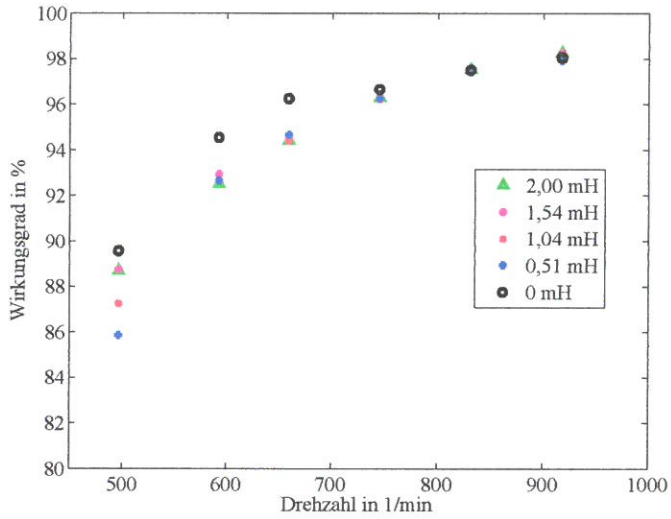


Abb. 3.12: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl bei verschiedenen Induktivitäten

Abb. 3.13, dass dieser ohne den Einsatz einer Induktivität am größten ist. Hohe THD-Werte wirken sich negativ auf die Verluste und Drehmomentwelligkeit des Generators auf, wodurch kleinere THD-Werte in den Generatorphasenströmen von Vorteil sind. Zwischen dem dritten und vierten Messpunkt ist eine Absenkung und anschließend eine Erhöhung der THD-Werte zu erkennen, das auf die Lückgrenze der Generatorphasenströme zurückgeführt wird, die das Messen der THD-Werte erschwert.

3.5 Zusammenfassung und Fazit der Analysen

In diesem Projekt: "Analyse und Optimierung eines Kleinwindkraftanlagensystems" sind drei verschiedene Generator-Umrichter-Konzepte hinsichtlich ihrer Bemessungsleistung des Generators, der Bauleistung der Leistungshalbleiter, der Verluste und dem Wirkungsgrad der einzelnen Gleichrichter untersucht worden. Weitere Analysen bezüglich der THD-Werte werden in einer entstehenden Dissertation vertieft.

Es zeigt sich, dass ein Generator mit einem Zwei-Level-Wechselrichter die geringsten Verluste, verursacht durch die Harmonischen in den Generatorphasenströmen bei jeweils gleichen Ma-

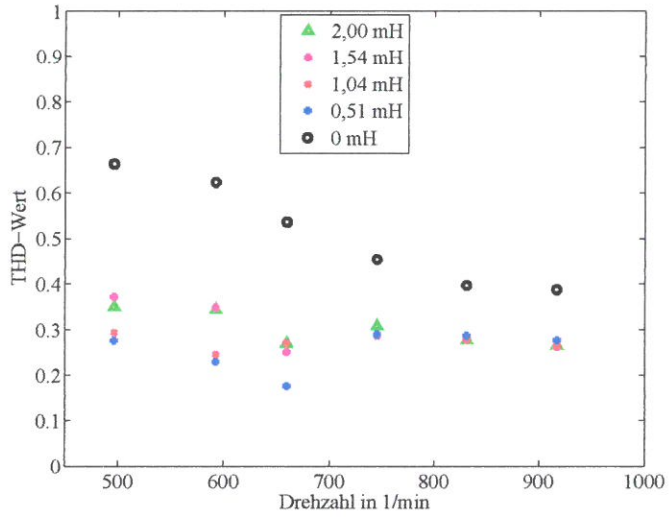


Abb. 3.13: THD-Wert in Abhängigkeit der Drehzahl für verschiedene Induktivitäten

terialkonstanten für die einzelnen Gleichrichter und unter Vernachlässigung mechanischer Verluste, aufweist. Dadurch kann der Generator eingesetzt mit einem Zwei-Level-Wechselrichter kleiner ausgelegt werden.

Wird die Bauleistung der Leistungshalbleiter für die einzelnen Gleichrichter betrachtet, so zeigt sich, dass der Hochsetzsteller im Nennbetriebspunkt die kleinste, während der Zwei-Level-Wechselrichter die größte Bauleistung aufweist. Dadurch wird der Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller in Kooperation ausgewählt und mit Reese und Thies Industrieelektronik GmbH und ESCD GmbH im Labor aufgebaut und tiefergehend untersucht. Der Wirkungsgrad des Halbbrückengleichrichters ist am größten, wodurch dieser ebenso tiefergehend im Labor untersucht wird.

Der Vergleich des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller und Halbbrückengleichrichter im Labor zeigen, dass die gleiche mechanische Leistung erzeugt werden kann. Der Wirkungsgrad des Halbbrückengleichrichters ist höher als der des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller. Wird der Einfluss der Induktivität des Hochsetzstellers auf die Generatorphasen- und Zwischenkreisströme untersucht, so zeigt sich, dass der Wirkungsgrad ohne Induktivität am höchsten ist. Jedoch ist ohne Einsatz einer Induktivität der THD-Wert am größten.

Für eine objektivere Bewertung der einzelnen Systeme und einer nachfolgenden Szenarienanalyse werden die Vergleichskritierien "Bemessungsleistung des Generators", "Bauleistung der

Leistungshalbleiter" und "Wirkungsgrad" der einzelnen Gleichrichtertopologien Noten vergeben, welche in Tab. 3.2 dargestellt sind.

	HSS	HBR	VBR
Bemessungsleistung Generator	2	3	1
Bauleistung Leistungshalbleiter	1	2	3
Wirkungsgrad	3	2	1

Tab. 3.2: Übersicht über die Bewertung des Diodengleichrichters mit Hochsetzsteller (HSS), den Halbbrückengleichrichter (HBR) und des Zwei-Level-Wechselrichters (VBR) hinsichtlich der Bemessungsleistung des Generators, der Bauleistung der Leistungshalbleiter und des Wirkungsgrades

Um unterschiedliche Prioritäten der Vergleichskriterien darzustellen, werden die Kriterien in drei verschiedenen Szenarien zum einen gleich und zum anderen der Wirkungsgrad bzw. die Bauleistung stärker gewichtet und mit den vergebenen Noten multipliziert. Abb. 3.14 zeigt die Ergebnisse dieser Szenarienanalyse. Bei Gleichgewichtung sind alle drei Systeme für den Einsatz in einer Kleinwindenergieanlage optimal. Ist die höchste Priorität ein maximaler Wirkungsgrad zu erreichen, so ist das optimale System der Halbbrückengleichrichter. Ist die höchste Priorität eine geringe Bauleistung aufzuweisen, so ist der Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller das optimale System.

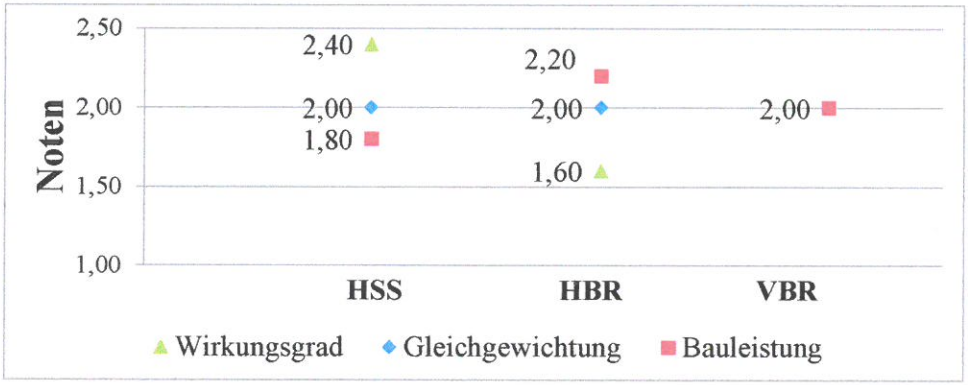


Abb. 3.14: Überblick der Bewertungen

Weitere Analysen bezüglich weiterer Vergleichskritieren, wie beispielsweise der THD-Wert, und unterschiedliche Szenarien, wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Schwach- und Starkwindregionen, werden in der entstehenden Dissertation tiefer untersucht.

4. Inhaltlicher und Zeitlicher Ablauf

Die in dem Projektantrag gezeigte Zeitplanung ist in Abb. 4.1 a) zu erkennen. Abb. 4.1 b) zeigt den Zeitplan mit den inhaltlichen und zeitlichen Änderungen. Die Arbeitspakte wurden im Wesentlichen erfüllt, jedoch sind zum einen der Kooperationspartner *CEwind* und *Easy-Wind*, aufgrund des Ausstiegs aus dem Kleinwindmarkt, nicht im Projekt vertreten. Dafür aber wie geplant *Reese + Thies* und zusätzlich die *ESCD GmbH*.
Die wesentlich vorgenommenen Ziele sind mit einer zeitlichen Verzögerung erreicht worden. Die Auswertung der finalen Messergebnisse stehen zum Teil noch aus und werden in einer Dissertation vertieft. Nicht erreicht werden konnte die Installation des optimalen Systems in einer KWEA und der Testbetrieb in realer Umgebung. Dies ist zum einen den langsamen Projektfortschritt geschuldet und zum anderen wurde der mit CE Wind geplante Testwindpark für KWEA nicht errichtet.

5. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes sind Veröffentlichungen auf der EPE 2014 und der PCIM 2015 entstanden, die den Vergleich und die Verlustberechnungen für Gleichrichter in Kleinwindenergieanlagen beinhalten.

BUCHERT, K. und F. W. FUCHS: *Comparison of Three Phase Rectifier Topologies in Small Wind Turbines*. In: *16th Conference on Power Electronics and Applications, EPE' 14-ECCE Europe*, 2014.

BUCHERT, K. und F. W. FUCHS: *Power Losses of Three Phase Rectifier Topologies in Small Wind Turbines*. In: *PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, Seiten 1–8, May 2015.

ARBEITSPAKETE	1. Projektjahr (2013)				2. Projektjahr (2014)				3. Projektjahr (2015)			
= Lehrstuhl für Leistungsel. und El. Antr. = CEwind = EasyWind = Reese + Thies = in Kooperation	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1. Voruntersuchung												
Stand der Technik zu Kleinwindkraftanlagen erweitern, Abstimmung der Anforderungen, Koordination												
Theoretische Untersuchungen, Recherchearbeit (Anforderungen für KWK, Maschinentopologien, Geometrie des Rotors des Generators, Umrichtersystem, Netzanschlussbedingungen)			1	0,5								
2. Simulation												
Erstellung von Simulationsmodellen für den elektrischen Teil der Kleinwindkraftanlage mittels Matlab/Simulink/Plecs				0,5	1/4							
Implementierung verschiedener Ansteuer-/Regelungsverfahren (Maximum-Power-Point-Tracking mit oder ohne Anemometer)					1/4	1/4						
Untersuchung des Einsatzes von verschiedenen Umrichtertopologien (Hochsetzsteller, Switched Mode Rectifier, Back-to-Back-Anwendung)					1/4	1/4						
Untersuchung neuer Topologien auf ihre Vor- und Nachteile und Effizienzsteigerungspotenziale					1/4	1/4						
3. Labortechnische Untersuchung												
Übertragung der simulativen Ergebnisse in die Praxis (geeignete Bauelemente, Geräte, Techniken etc.)						1/4	1/3					
Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme des Systems							1/3	1/3				
Implementierung von Ansteuerverfahren auf Mikroprozessor oder FPGA							1/3	1/3				
5. Praktische Erprobung (gewünscht)												
Installation des entwickelten Systems in einer Kleinwindkraftanlage								1/3				
Durchführung und Auswertung des Testbetriebs									1			
6. Auswertung												
Aufbereitung und Bewertung der finalen Messergebnisse, Aussage zur Zielerreichung, Abschätzung des verbleibenden Optimierungspotenzials, Fazit										1		

(a) Zeitplan des Projektantrages

ARBEITSPAKETE	1. Projektjahr (2013)				2. Projektjahr (2014)				3. Projektjahr (2015)			
= Lehrstuhl für Leistungsel. und El. Antr. ~~= CEwind~~ ~~= EasyWind~~ = Reese + Thies = ESCD GmbH = in Kooperation	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1. Voruntersuchung												
Stand der Technik zu Kleinwindkraftanlagen erweitern, Abstimmung der Anforderungen, Koordination												
Theoretische Untersuchungen, Recherchearbeit (Anforderungen für KWK, Maschinentopologien, Geometrie des Rotors des Generators, Umrichtersystem, Netzanschlussbedingungen)			1	0,5								
2. Simulation												
Erstellung von Simulationsmodellen für den elektrischen Teil der Kleinwindkraftanlage mittels Matlab/Simulink/Plecs				0,5	1/4							
Implementierung verschiedener Ansteuer-/Regelungsverfahren (Maximum-Power-Point-Tracking mit oder ohne Anemometer)					1/4	1/4						
Untersuchung des Einsatzes von verschiedenen Umrichtertopologien (Hochsetzsteller, Switched Mode Rectifier, Back-to-Back-Anwendung)					1/4	1/4						
Untersuchung neuer Topologien auf ihre Vor- und Nachteile und Effizienzsteigerungspotenziale					1/4	1/4						
3. Labortechnische Untersuchung												
Übertragung der simulativen Ergebnisse in die Praxis (geeignete Bauelemente, Geräte, Techniken etc.)						~~1/4~~	~~1/3~~			1	1/3	
Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme des Systems							~~1/3~~				1/3	1/2
Implementierung von Ansteuerverfahren auf Mikroprozessor oder FPGA							~~1/3~~	~~1/3~~			1/3	
5. Praktische Erprobung (gewünscht)												
~~Installation des entwickelten Systems in einer Kleinwindkraftanlage~~								~~1/3~~				
~~Durchführung und Auswertung des Testbetriebs~~									~~1~~			
6. Auswertung												
Aufbereitung und Bewertung der finalen Messergebnisse, Aussage zur Zielerreichung, Abschätzung des verbleibenden Optimierungspotenzials, Fazit										1		1/2

(b) Umgesetzter Zeitplan

Abb. 4.1: Gegenüberstellung der Zeitpläne

6. Industriekooperation

Im Rahmen der Industriekooperation mit Reese und Thies Industrieleketronik GmbH und ESCD GmbH haben die in Tab. 6.1 dargestellten Projekttreffen stattgefunden. Ein zusätzliches Projekttreffen fand mit Easy Wind GmbH statt, jedoch führte dies zu keiner weiteren Kooperation.

Datum	**Ort**	**Teilnehmer Industrie**	**Thema**
15.12.2014	Kiel	Hr. Reese, Hr. Thies, Reese und Thies	Vorstellung Ergebnisse, Kooperationsmöglichkeiten
18.02.2015	Kiel	Hr. Grimsmann, Hr. Schwensen ESDC GmbH	Vorstellung Ergebnisse, Kooperationsmöglichkeiten
31.03.2015	Kiel	Easy Wind GmbH	Vorstellung Ergebnisse, Kooperationsmöglichkeiten
27.05.2015	Kiel/Itzehoe	Reese und Thies	Abstimmung Platinenentwurf
12.06.2015	Kiel/Itzehoe	Reese und Thies	Baugruppenplatzierung
24.06.2015	Itzehoe	Reese und Thies	Platinenlayout
01.08.2015	Kiel/Brünsbüttel	Fr. Cicak, ESCD GmbH	Abstimmung Bauteilliste, Besprechung Layout
01.09.2015	Kiel/Brünsbüttel	Fr. Cicak, ESCD GmbH	Platinenerstellung
15.09.2015	Kiel/Brünsbüttel	Fr. Cicak, ESCD GmbH	Platinenbestückung
27.11.2015	Kiel	Hr. Reese, Hr. Thies Reese und Thies Hr. Schwensen, Hr. Grimsmann ESCD GmbH	Vorstellung der Messergebnisse Abschlusspräsentation

Tab. 6.1: Übersicht Industrietreffen

7. Anhang

Für das Gesamtsystem für die Simulationen und das im Labor aufgebaute System sind die Daten aus der Tab. 7.1 zugrunde gelegt.

Systemkomponente	Parameter	Wert
DC-Maschine	Bemessungsleistung $P_{DC,B}$	30 kVA
	Bemessungsmoment $M_{DC,B}$	20,9 Nm
	Bemessungsdrehzahl $n_{DC,B}$	2.000 min^{-1}
PMSG	Bemessungsleistung $P_{PMSG,B}$	11.04 kVA
	Bemessungsdrehzahl $n_{PMSG,B}$	1.000 min^{-1}
	Maximaldrehzahl n_{max}	1.600 min^{-1}
	Bemessungsspannung U_B	400 V
	Maxmimalspannung U_{max}	628 V
	Maximalleistung P_{max}	17720 W
	Bemessungsstrom I_B	16 A
	Polpaarzahl p	6
	Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	1
Gleichrichter	Bemessungsleistung $P_{Gr,B}$	10 kVA
	Schaltfrequenz f_s	10 kHz
	Induktivität Hochsetzsteller L_{Ind}	2 mH
	max. Sperrschichttemperatur T_j	125 °C
	Umgebungstemperatur T_A	20 °C
	Kühlkörpertemperatur T_C	80 °C

Tab. 7.1: Technischen Daten des Systems in der Simulation und im Labor

Literaturverzeichnis

[1] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors. ii. armature-reaction field," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 1, pp. 136–142, Jan 1993.

[2] W. Hassan and B. Wang, "Efficiency optimization of pmsm based drive system," in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, vol. 2, June 2012, pp. 1027–1033.

[3] S. Brueske, B. Benkendorff, R. Kulpe, and F. Fuchs, "Comparison of the power semiconductor design rating of different inverter topologies for the drive inverter of electric vehicles," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, Sept 2015, pp. 3643–3650.

[4] M. Mohr, "Stromrichtersysteme zur netzeinspeisung elektrischer energie aus brennstoffzellen," Ph.D. dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011.