

## **Abschlussbericht zum EKSH-Promotionsstipendium Projekt-Nr. 14/12-7, Johannes Falck**

Arbeitstitel des Promotionsvorhabens: Aktive thermische Regelung von Leistungshalbleitermodulen zur Erhöhung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit

### **1. Einleitung**

Ziel dieses Projektes ist es, die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer von Leistungshalbleitermodulen in Umrichtern durch aktive thermische Regelung zu erhöhen, ohne dabei das Verhalten der Anwendung zu beeinträchtigen. Dazu wird die thermische Belastung der Leistungshalbleiter im Betrieb ermittelt und es werden Methoden entworfen, die die Leistungshalbleiter vor Zerstörung und beschleunigter Alterung schützen.

In diesem Abschlussbericht wird das gesamte Promotionsprojekt kurz beschrieben und in Hinblick auf Erfolge und Fehler bewertet. Zum Schluss werden eine Zusammenfassung und eine kurze persönliche Schlussbemerkung gegeben.

### **2. Projektdurchführung**

Die drei wichtigsten Säulen des Projektes sind die Modellierung des thermischen Verhaltens von Leistungshalbleitermodulen, die Detektion der thermisch basierten Alterungs- und Zerstörungsmechanismen der Module und der Entwurf einer geeigneten aktiven thermischen Regelung, um diesen Mechanismen entgegenzuwirken. Hinzu kommen die theoretische Grundlagenbetrachtung und die experimentelle Validierung dieser drei Hauptarbeitspakete.

Zu Beginn des Projektes standen all diese Bausteine noch unbearbeitet und teilweise mit anderen Schwerpunkten entweder in Stichpunkten auf zahlreichen Notizzetteln und vielen fast leeren Dateien. Mit der Zeit wurden diese Ideen soweit aufgearbeitet, dass sie den inhaltlichen und formellen Anforderungen von Veröffentlichungen im Rahmen von Fachkonferenzen und später auch Journalen genügten. Auf diese Weise konnte das große zunächst gar nicht fassbare Projekt in viele kleinere Abschnitte unterteilt werden und jeder erfolgreich veröffentlichte Teil hat durch die damit verbundene Qualitätssicherung eine Bestätigung und weitere hilfreiche Ideen des Fachpublikums erhalten.

Die Konferenzbesuche spielten auch für die Motivation während des Projektes eine ganz entscheidende Rolle: Zunächst ist jede Veröffentlichung ein Erfolgserlebnis und Erfolge machen Spaß. Weiterhin erfordert jede Konferenzveröffentlichung die Präsentation der Ideen auf den Konferenzen und diese finden über den Globus verteilt in vielen spannenden Städten statt. Um also die Stadt besuchen zu können, muss der geschriebene Artikel zum jeweiligen Zeitpunkt der Deadline so gut sein, dass es akzeptiert wird – eine starke Motivation zur zügigen Weiterarbeit.

Nach knapp drei Jahren wurden auf diese Weise genug Artikel veröffentlicht, um das inhaltliche Grundgerüst für die eigentliche Doktorarbeit zu bilden. Diese wurde in dem letzten halben Jahr weitestgehend ausformuliert.

Parallel zum Promotionsprojekt fand über den gesamten Zeitraum die Arbeit am Lehrstuhl für Leistungselektronik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel statt. Durch Anleitung und Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern dort wurde gleich zu Anfang das wissenschaftliche

Arbeiten vermittelt, welches im (sinnvollerweise) praxisbezogenen Ingenieursstudium nur partiell vermittelt wird. Im Laufe der Zeit gab es immer wieder kritische Rückmeldungen, wie man mit den erarbeiteten Ideen und Ergebnissen taktisch am sinnvollsten umgehen kann – also wann, wo und im welchen Umfang sie veröffentlicht werden sollten. Projekte mit anderen Universitäten und Unternehmen haben die Sichtweise auf die Ergebnisse der Forschung stark erweitert. Nicht zuletzt hat die Lehrtätigkeit dabei geholfen zu lernen wie komplexe Inhalte vermittelt werden können.

### 3. Ergebnisse

Das grundsätzliche Konzept der aktiven thermischen Regelung von Leistungshalbleitern war schon zum Projektbeginn bekannt und bildet die Basis des Promotionsprojektes. Die zentralen Ergebnisse des Projektes umfassen:

- Entwurf und Validierung eines sensorlosen Echtzeit-Temperaturschätzverfahrens für die Halbleiter in einem Modul
- Verfahren zur direkten Ansteuerung der Halbleiter um Temperatur gezielt in je einem spezifischen Halbleiter beeinflussen zu können
- Modellbasiertes prädiktives Regelverfahren erlaubt Multiparameteroptimierung von Effizienz, Lebensdauer und Regelabweichung vor jedem Schaltvorgang
- Regelung der magnetischen Durchflutung von Induktionsmaschinen zur Glättung der Halbleitertemperaturen des speisenden Inverters
- Durchführung und Auswertung einer europaweiten Industrienumfrage. Diese zeigt die Nachfrage an Methoden, die die Zuverlässigkeit von Leistungselektronik verbessern

Die Ergebnisse wurden durch Simulationen und Laborexperimente gestützt. Insgesamt konnten Methoden entwickelt werden, mit denen die thermische Belastung von leistungselektronischen Modulen bei gleichbleibendem Anwendungsprofil reduziert wird und sich somit deren Lebensdauer erhöhen lässt. Nachteilige Effekte, wie die Verringerung der Effizienz oder die Erhöhung des Stromoberschwingungsgehalts wurden durch die gezielte Ansteuerung minimiert. Ein Optimierungsalgorithmus sorgt dafür, dass die Effizienz nur dann verringert wird, wenn der Nutzen der Lebensdauererhöhung überwiegt. Die Bewertungskriterien hierfür können bedarfsgerecht eingestellt werden, z.B. gemäß ökologischen oder ökonomischen Erfordernissen.

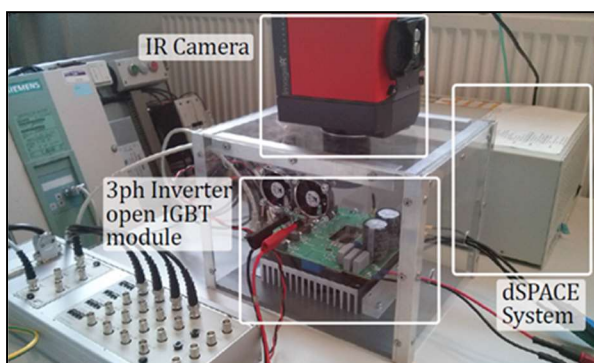


Abb. 1: Laboraufbau zur Messung der Halbleitertemperaturen in einem Modul.

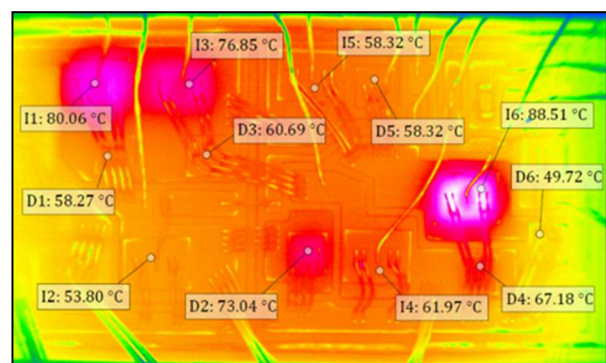


Abb. 2: Die Messung des Moduls zeigt Temperaturen von 50°C bis 90°C im Betrieb.

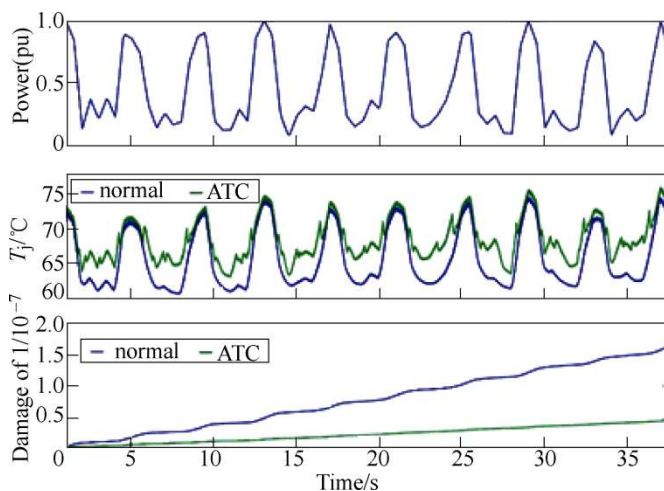


Abb. 3: Mit der Temperaturregelung lässt sich die thermische Belastung der Module verringern.

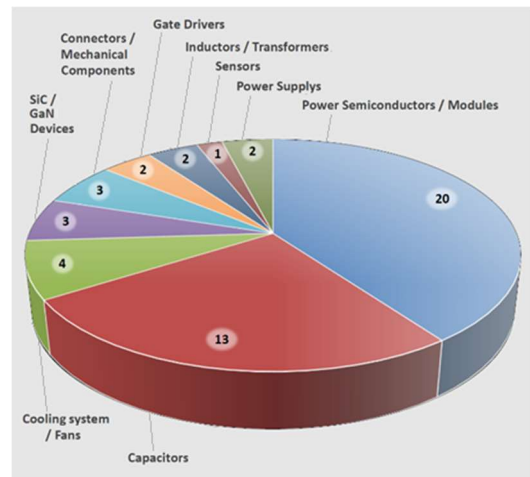


Abb. 4: Defekte Module sind häufigster Grund für Ausfälle von Umrichtern.

#### 4. Persönliches Resümee

Nach drei spannenden Jahren ist das Promotionsprojekt fast abgeschlossen. Es war nicht immer ganz einfach, aber im Nachhinein war es die richtige Entscheidung, diese drei Jahre in der Wissenschaft zu arbeiten. Ich habe mich fachlich sehr stark weiterentwickelt und merke schon jetzt, dass ich die gelernten Arbeitsweisen universell einsetzen kann. Hinzu kommen die vielen menschlichen und kulturellen Erfahrungen in dem internationalen Arbeitsumfeld.

Die Ergebnisse des Projektes sind in sechs eigenen Artikeln und drei weiteren Artikeln als Ko-Autor bereits weitestgehend publiziert. Die Doktorarbeit ist noch nicht ganz fertig, wird es aber noch in diesem Jahr.

Für mich ist der Ausflug in die Welt der Wissenschaft damit höchstwahrscheinlich beendet und ich widme mich bereits jetzt den Aufgaben als Ingenieur in der Industrie. Ich möchte mich an dieser Stelle für das von der EKSH entgegengebrachte Vertrauen bedanken, welches mir die Durchführung des Promotionsprojektes erlaubt hat.

Hamburg, den 05.09.2018,  
 Johannes Falck (ehemaliger EKSH-Promotionsstudent)