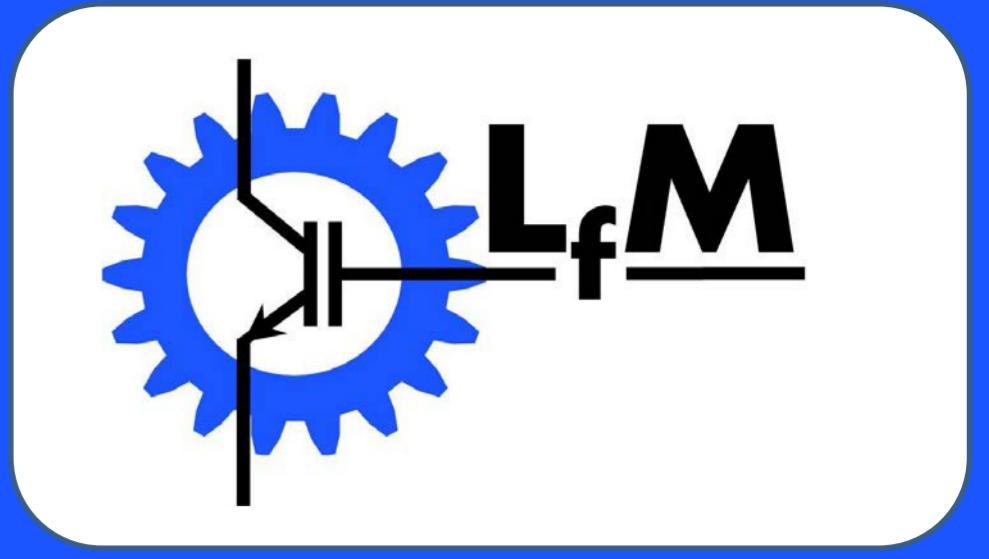




Dr.-Ing. Robert Maier

„Einfluss des Klemmenverhaltens schnell schaltender Umrichter auf die elektrische Last und Ansteuerbedingungen“

Promotionsprüfung am 03.08.2023



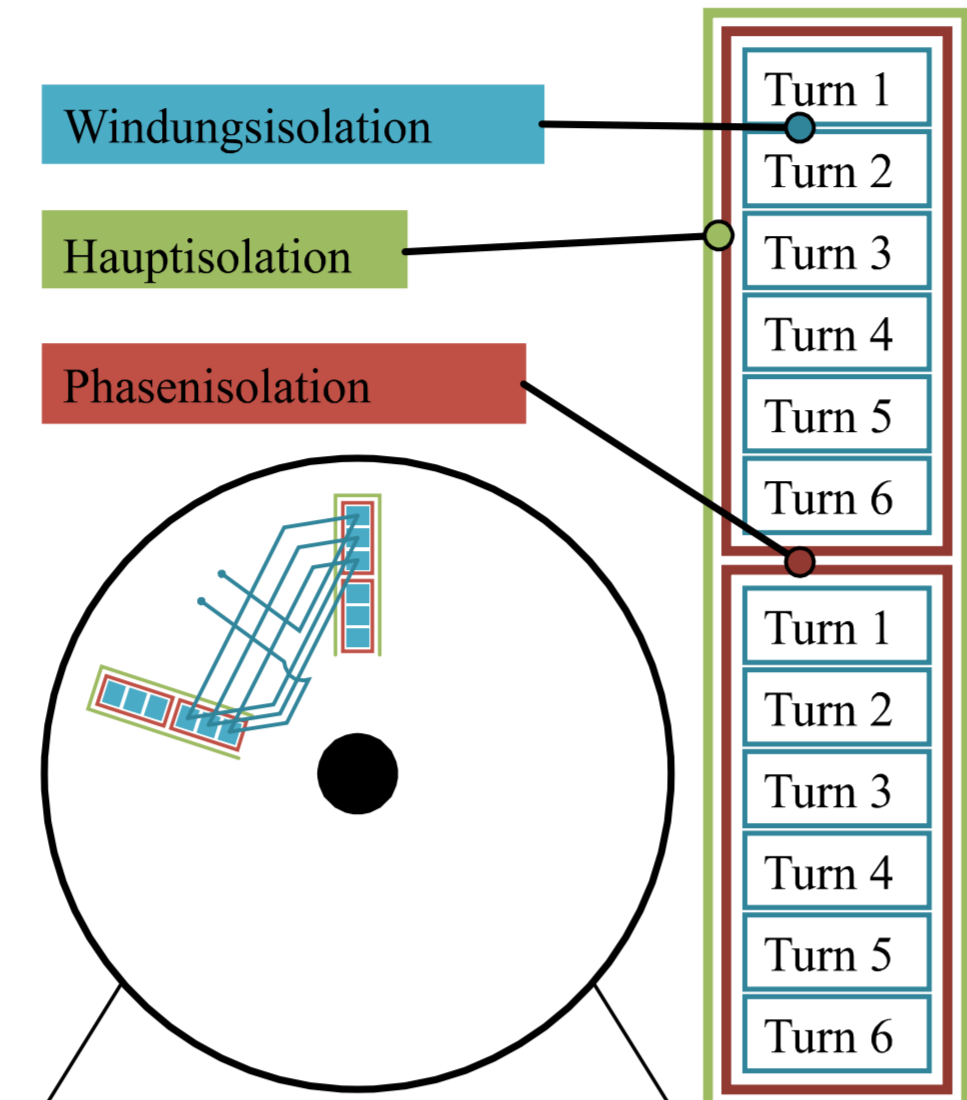
Einleitung

Der SiC-MOSFET als leistungselektronisches Bauelement erhält zunehmend Aufmerksamkeit in Forschung und Industrie, unter anderem aufgrund der hohen erreichbaren Effizienz dieser Bauteile. Die Möglichkeit des schnelleren Schaltens mit geringerer Verlustenergie eröffnet einen weiteren Optimierungsbereich. Es ist im System sicherzustellen, dass die erhöhte Schaltgeschwindigkeit bei allen Komponenten zulässig ist.

In der Arbeit werden an einem Demonstrator einer elektrischen Maschine die Spannungsbelastung der relevanten Isolationschnittstellen in Abhängigkeit der Schaltgeschwindigkeit ermittelt. Messtechnisch werden Möglichkeiten und Grenzen der Schaltgeschwindigkeit im Umfeld der Hochleistungsmodule erkundet. Die Kombination der Ergebnisse aus beiden Untersuchungen weisen das Optimierungspotential dieses Bauteils in Hochleistungsanwendungen aus.

Die Entwicklung eines Werkzeuges zur Berechnung optimaler Schaltverluste, welche mit dem unipolaren Bauelement gut angenähert werden können rundet die Untersuchung ab.

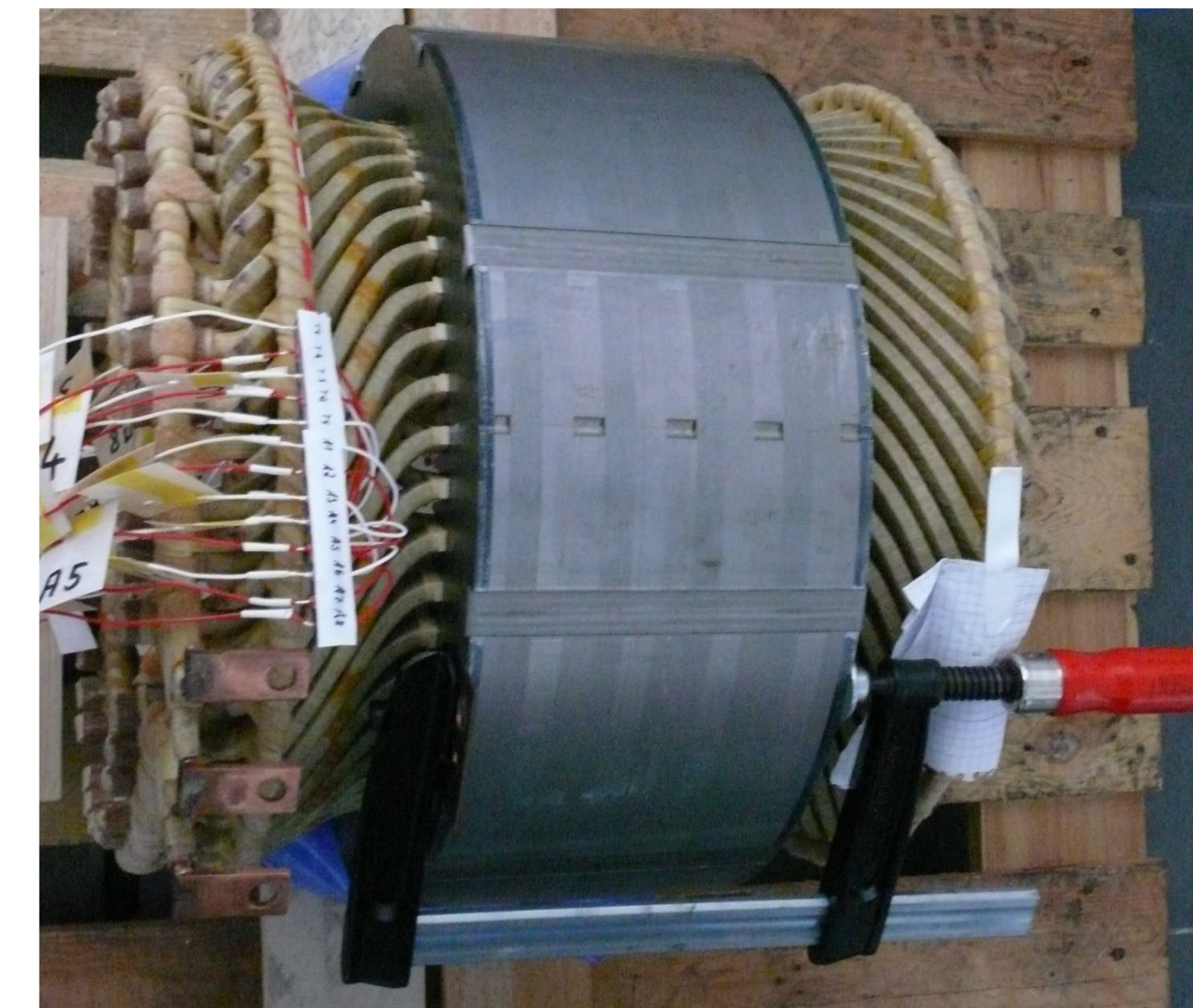
Das Isolationssystem des Stators einer elektrischen Maschine



Schematische Darstellung des Isolationssystems einer elektrischen Maschine. Diese ist als Zweischicht-Wicklung realisiert. Es sind jeweils zwei Spulen in einer Nut.

Das Wicklungssystem einer elektrischen Maschine lässt sich in mehrere Funktionselemente untergliedern. Hauptaugenmerk liegt bei der Untersuchung auf dem Isolationssystem.

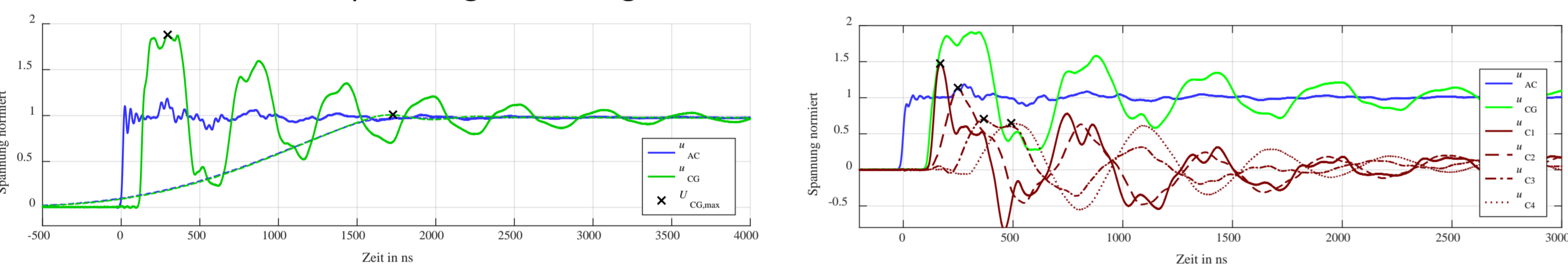
Die **Hauptisolation** stellt die sicherheitsrelevante Trennung zwischen stromführenden Teilen und Maschinengehäuse dar. Eine Maschinenphase erstreckt sich von der Eingangsklemme bis zum Sternpunkt. Die Phase ist aus mehreren Spulen zusammengesetzt, welche seriell im Strompfad angeordnet sind. Diese Spulen sind durch die **Phasenisolation** voneinander getrennt. Bei der untersuchten Maschine treffen sich jeweils zwei Spulen in einer Nut. Dies ist bei der Bewertung der Spannungsbelastung relevant. Eine Spule besteht weiterhin aus mehreren Windungen, welche durch die **Windungsisolation** voneinander isoliert sind. Die Windung stellt das kleinste geometrische Element des Wicklungssystems dar. Durch Spannungsabgriffe, welche bei der Fertigung des betrachteten Maschinenprüflings an verschiedenen Stellen angebracht wurden, lassen sich die Spannungsausbreitung und die Spannungsbelastung der jeweiligen Isolationsschnittstellen messtechnisch ermitteln.



Fotografie des untersuchten Demonstrators einer elektrischen Maschine. Dieser wurde ohne Rotor und Maschinengehäuse hergestellt.

Zuleitung und Ausbreitung der Spannung

Die Anbindung der Maschine erfolgt durch geschirmte Maschinenkabel. Der Impedanzsprung an der Maschinenklemme kann mit einer schnellen Spannungsflanke durch Reflexion zu einer Spannungsüberhöhung führen und stellt die Belastung der **Hauptisolation** dar. Bei der Verteilung der Eingangsspannung auf die Spulen der Phase führt eine starke Asymmetrie (abhängig von der Schaltgeschwindigkeit) zu überhöhtem Spannungsabfall über der Eingangsspule. Dies alleine ist jedoch kein Indiz für eine erhöhte Spannungsbelastung einer Isolationsschnittstelle.

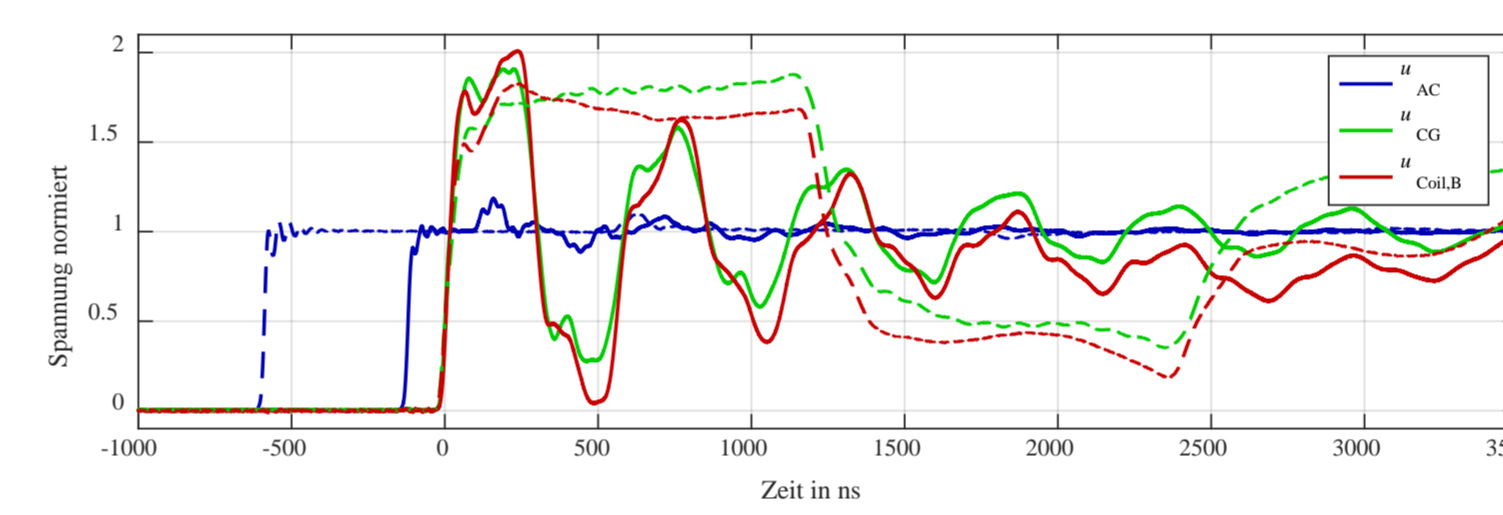


Klemmenspannung an Umrichter (u_{AC}) und Maschine (u_{CG}) bei schneller (durchgezogen) und langsamer (gestrichelt) Schaltflanke. Reflexionsfaktor bei Totalreflexion ca. 0,9

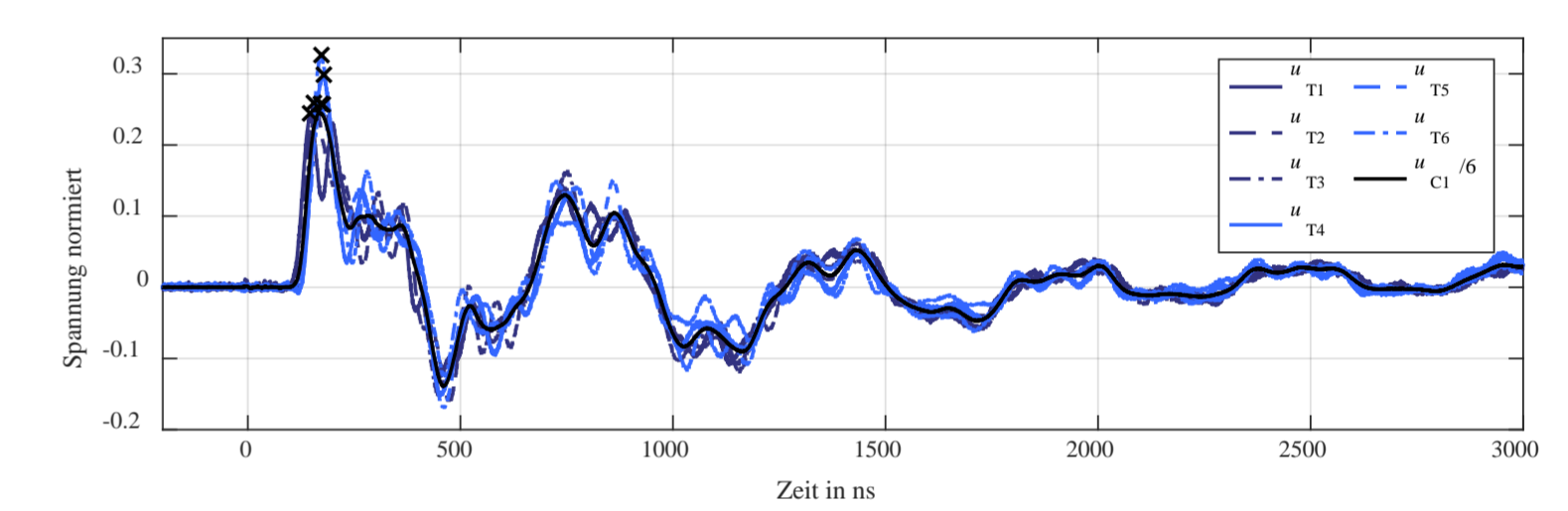
Spannungsausbreitung der Klemmenspannung (u_{CG}) der Maschine mit schneller Schaltflanke auf die ersten vier Spulen (u_{C1} bis u_{C4}) der Phase

Spannungsbelastung der Maschinenisolation

Die **Phasenisolation** wird von dem Spannungsabfall zwischen zwei Phasen belastet. Nach dem Wicklungsschema der untersuchten Maschine treffen sich an einer kritischen Stelle zwei seriell weit entfernte Spulen innerhalb einer Nut. Somit ergibt sich, dass die Spannungsbelastung der Spannung $u_{coil,B}$ jener der Hauptisolation gleicht. Die Verteilung der Spannung der Eingangsspule auf ihre Windungen geschieht sehr gleichmäßig. Es wirkt sich die Fehlverteilung der Spulenspannung auf die Spannungsbelastung der **Windungsisolation** aus.



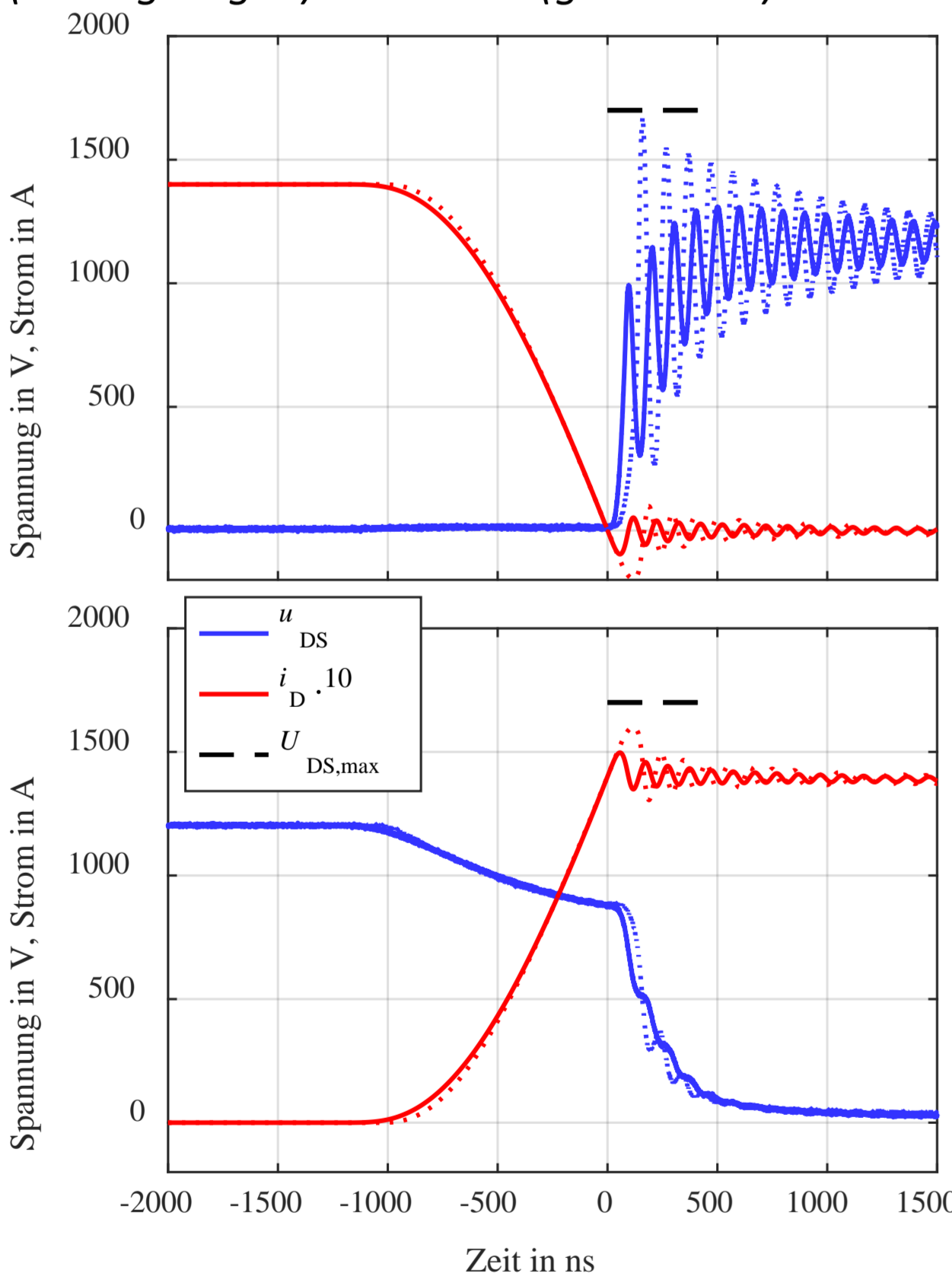
Spannungsbelastung der Phasenisolation ($u_{coil,B}$) an einer Schnittstelle in der Nut. Die Klemmenspannung am Umrichter u_{AC} trifft verzögert an der Maschinenklemme (u_{CG}) ein



Spannungsbelastung der Windungsisolation bei schneller Schaltflanke. Die Spulenspannung u_{C1} teilt sich gleichmäßig auf die Windungen (Spannungen u_{T1} bis u_{T6})

Schaltverhalten und Optimierung durch Ansteuerung

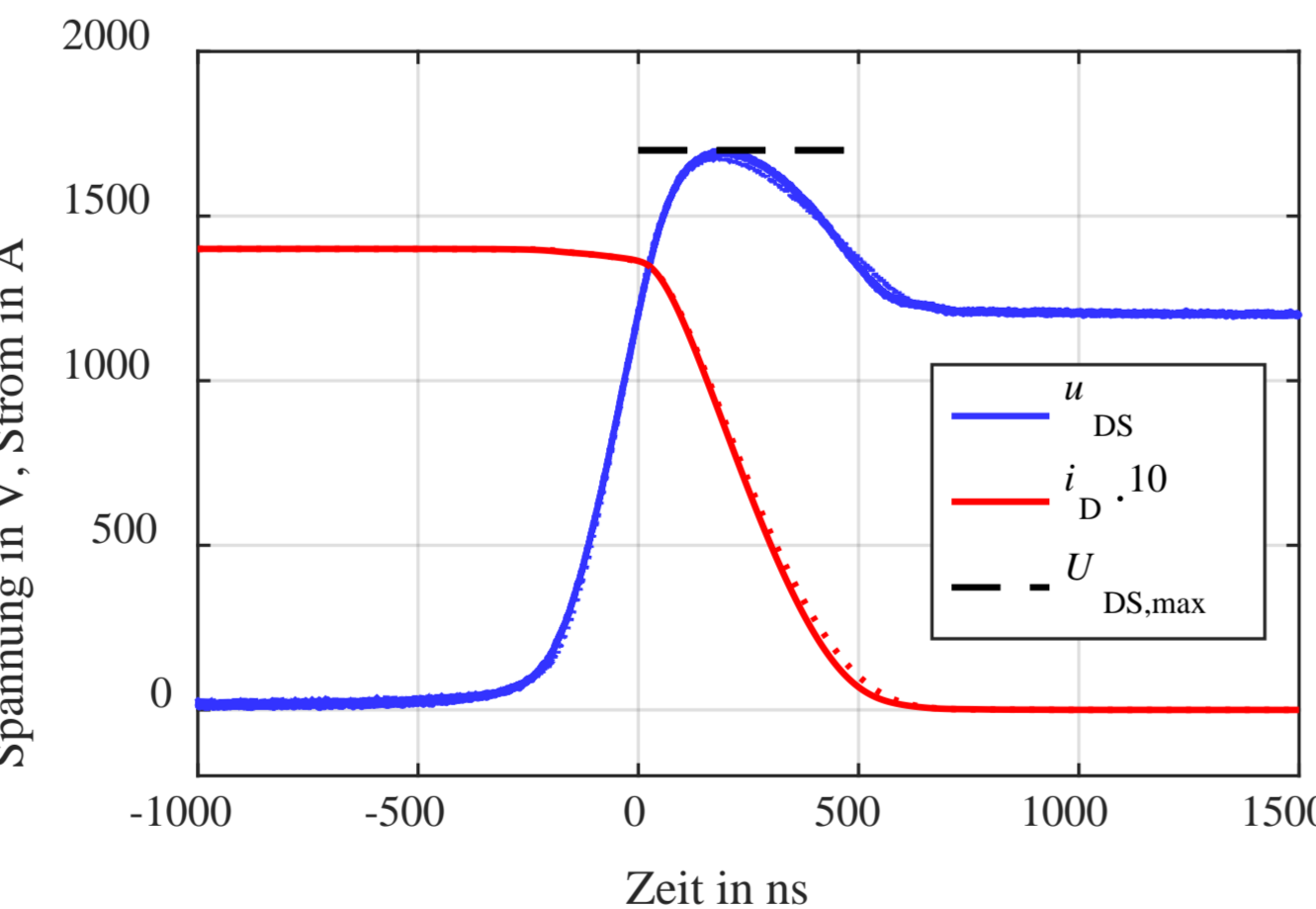
Einschalten des aktiven Schalters mit Abkummutierung der Freilaufdiode bei 20°C (durchgezogen) und 125°C (gestrichelt)



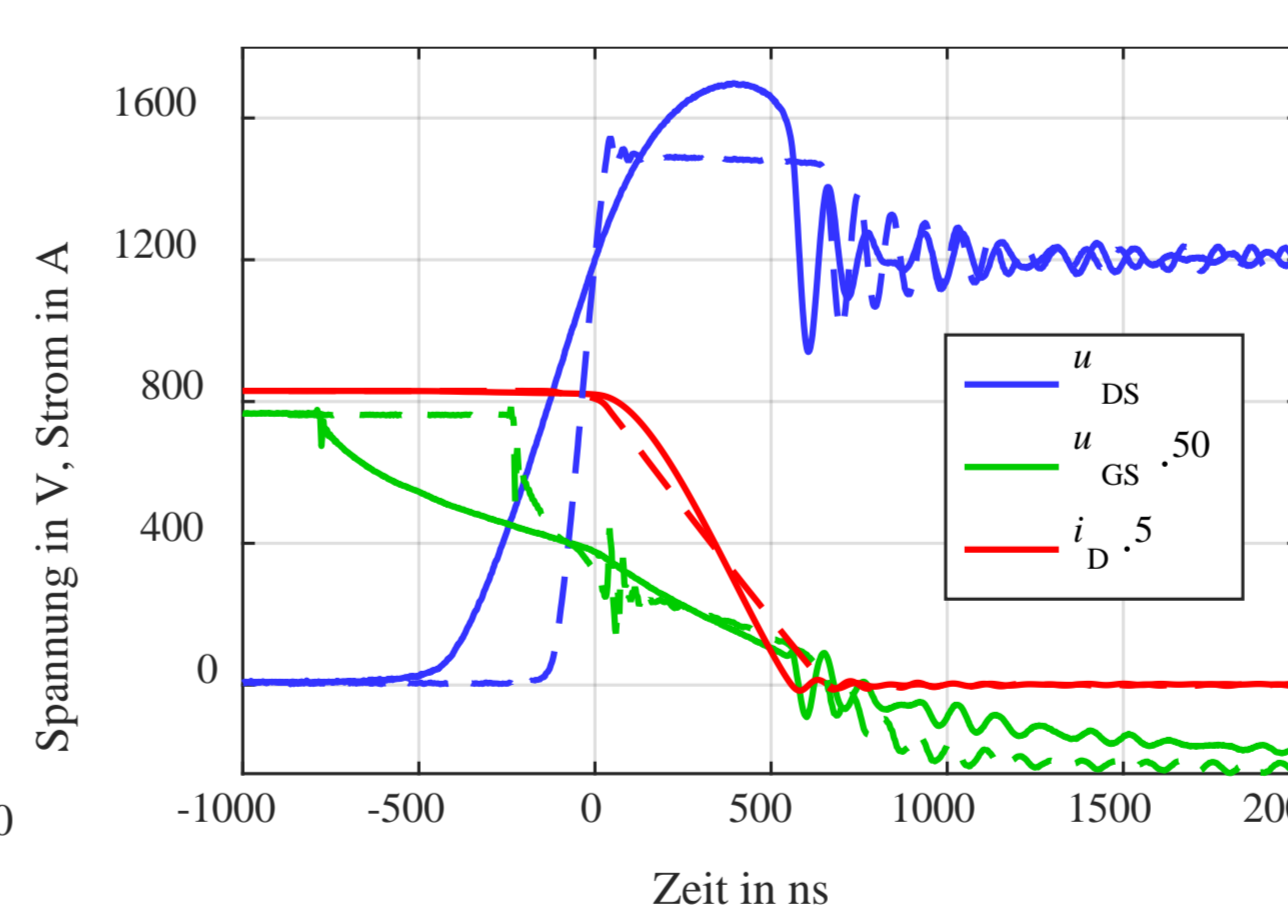
Durch die hohe Schaltleistung ist die Schaltgeschwindigkeit des SiC-MOSFET durch die transiente Überspannung begrenzt. Die Einschaltgeschwindigkeit ist begrenzt durch die stark temperaturabhängige Abkummutierung der Body-Diode.

Der Ausschaltvorgang ist dominiert durch das hohe Produkt aus Streuinduktivität und Schaltstrom. Aufgrund der starken Einschränkung durch die transiente Überspannung eignet sich beim SiC-MOSFET in Umgebung hoher Schaltleistung die Methode des Active Clamping als Optimierung des Ausschaltvorganges deutlich. Bei der Untersuchung wurde gezeigt, dass ausgehend von einer Spannungsflanke von 3 V/ns eine Beschleunigung auf 10 V/ns durch Active Clamping erreichbar und lohnend ist.

Ausschalten des aktiven Schalters, 20°C (durchgezogen) und 125°C (gestrichelt) sind nahezu identisch



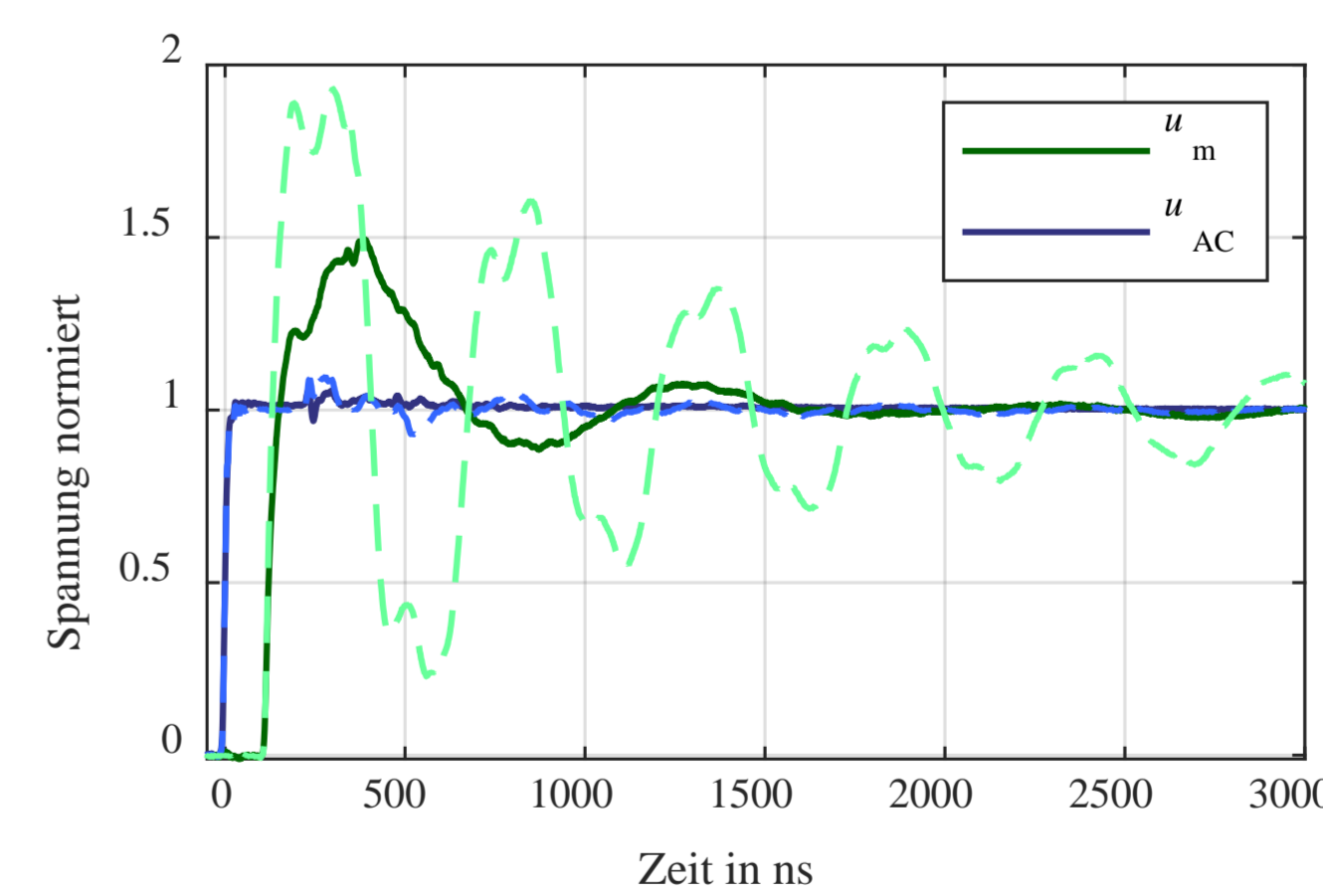
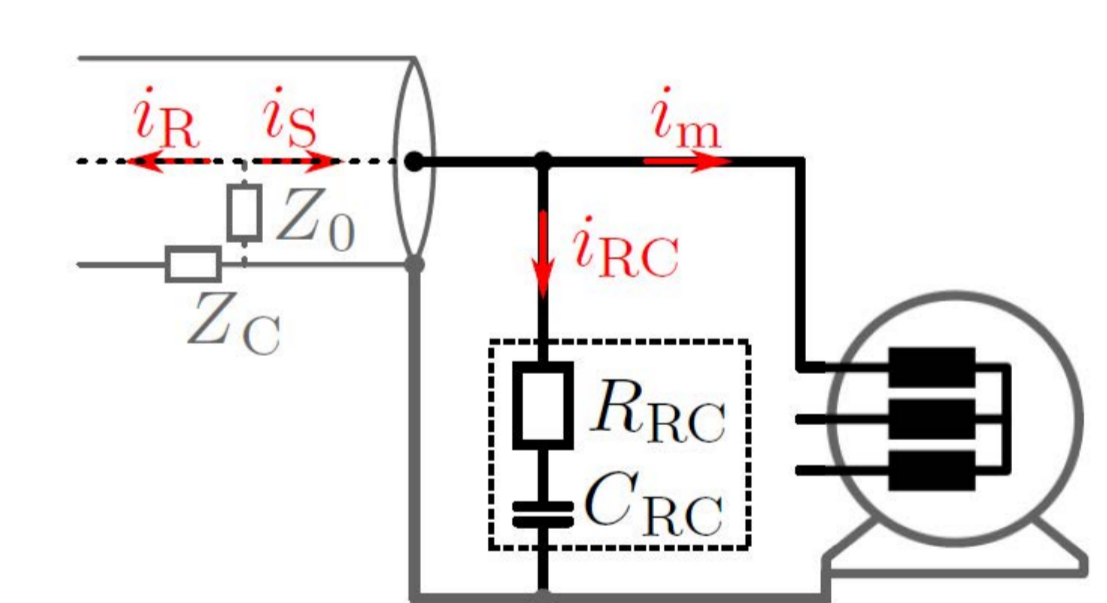
Vergleich normales Schalten (durchgezogen) mit Active Clamping (gestrichelt) als Optimierung des Ausschaltvorganges



Reduktion der Spannungsbelastung durch Klemmenfilter

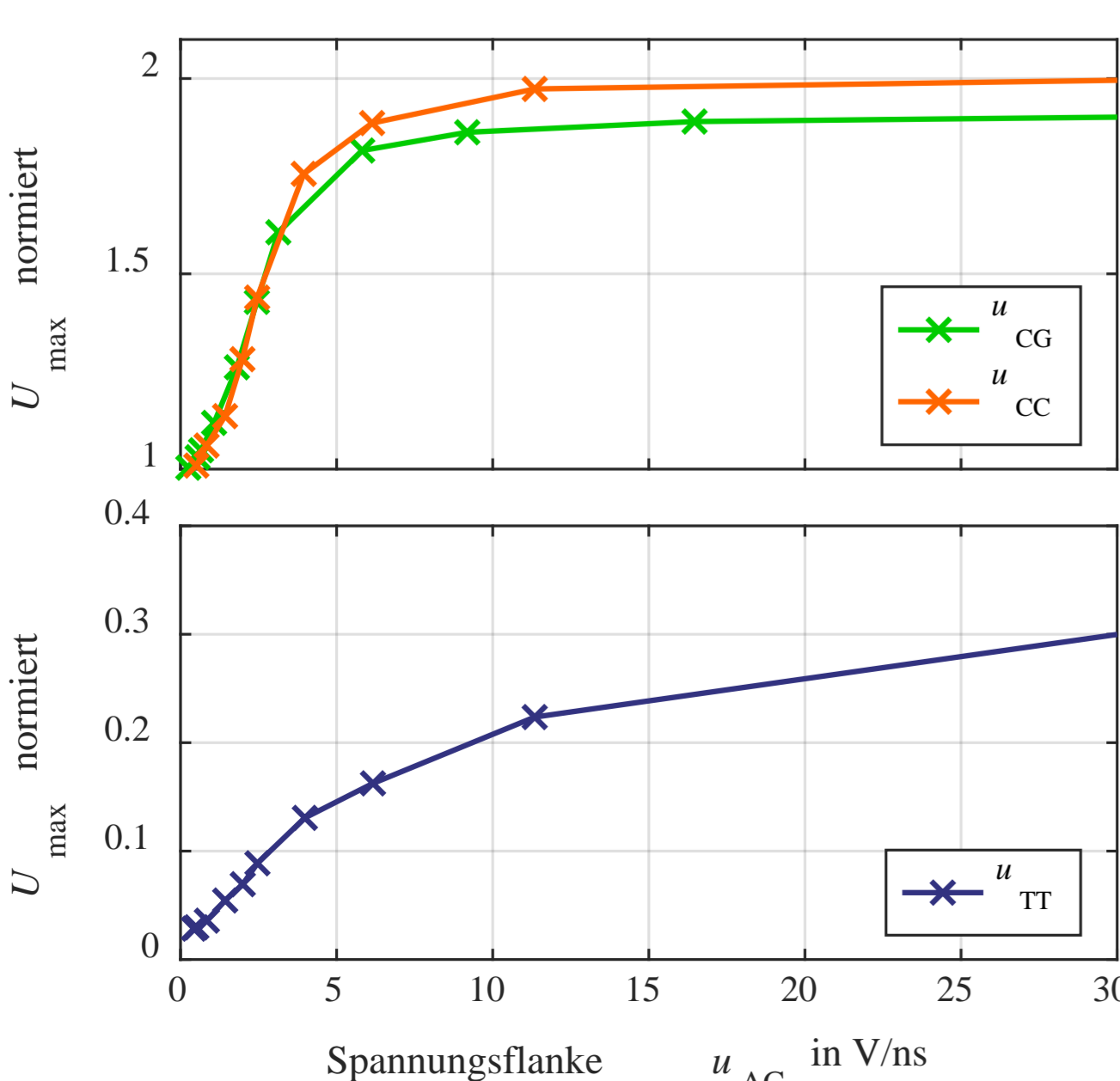
Ein Klemmenfilter reduziert die Maximalspannung an der Maschinenklemme. Bei geeigneter Auslegung des Filters ist die zusätzliche Verlustenergie gering. Bei gleichzeitiger Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit sind die Filterverluste gegenüber der eingesparten Schaltverlustenergie vernachlässigbar.

Schematische Darstellung des Klemmenfilters. Der Ladestrom des geschirmten Kabels i_S fließt zum Teil in die Maschine i_M über den Klemmenfilter i_{RC} und wird reflektiert i_R



Klemmenspannung der Maschine bei Anwendung des Klemmenfilters (durchgezogen) und ohne Filter (gestrichelt). u_{AC} und u_M sind die Klemmenspannungen an Umrichter und Maschine

Ergebnisse der Dissertation



Die Randbedingungen der Traktionsantriebe der urbanen Mobilität stellen für den Einsatz von SiC-MOSFET Halbleiterbauelementen ein spannendes und herausforderndes Umfeld dar. Durch die hohe Schaltleistung ist die Schaltgeschwindigkeit bei einfacher Ansteuerung stark eingeschränkt. Die diskutierte hohe Schaltgeschwindigkeit des SiC-MOSFET steht darüber hinaus im Verdacht, das Isolationssystem der elektrischen Maschine stärker zu belasten.

Die Spannungsbelastung der Isolation einer elektrischen Maschine ist bei der untersuchten Traktionsanwendung bereits im Referenzpunkt von 5 V/ns nahezu an einem Plateau angelangt. Eine Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit über diesen Wert hinaus führt bei der Hauptisolation u_{CG} und bei der Phasenisolation u_{CC} nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Spannungsbelastung. Die Spannungsbelastung der Windungsisolation u_{TT} ist hingegen stark abhängig von der Schaltgeschwindigkeit. Dies ist jedoch im betrachteten Fall nicht kritisch.

Durch geeignete Filtermethoden lässt sich bei Bedarf die Spannungsbelastung für alle Schnittstellen mit geringen zusätzlichen Filterverlusten begrenzen.

Eine Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit bedarf durch die Randbedingung der hohen Schaltleistung eine geeignete Gate Ansteuerung. Ist die Erhöhung zulässig, so lässt sich durch Active Clamping die Ausschaltenergie insbesondere im Teillastbereich um bis zu 70 % reduzieren.

