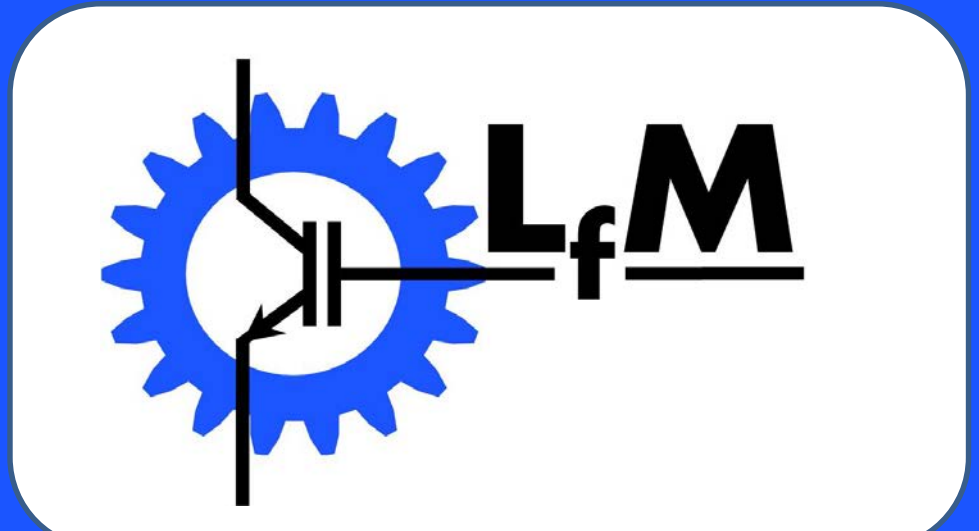




Dr.-Ing. Fabian Hohmann

„Effizienzerhöhung von Multilevel-basierten HVDC-Übertragungen“

Promotionsprüfung am 14.12.2021



Motivation

Durch den wachsenden Energiebedarf und die räumliche Entfernung von Energieerzeugung und Energieverbrauch ergibt sich eine Nachfrage zum Ausbau der elektrischen Versorgungsnetze. Gerade bei kabelgebundenen, langen Übertragungsstrecken ergeben sich Vorteile bei der Nutzung der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) im Vergleich zur etablierten Wechselstromtechnik. Die parasitäre Kapazität des Kabels muss im Wechselspannungsnetz kontinuierlich umgeladen werden, was zu höheren Verlusten im Vergleich zur HGÜ führt. In zukünftigen Netzen wird die HGÜ daher eine zentrale Rolle spielen. Auch bei der Verwendung der HGÜ ist die Effizienz ein entscheidendes Merkmal und daher Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit.

Der Modulare Multilevel Konverter

Als Schnittstelle zwischen Gleich- und Wechselspannungsnetz kommt vermehrt der Modulare Multilevel Konverter (engl. MMC) zum Einsatz, der in der rechten Abbildung dargestellt ist. Im Gegensatz zu netzgeführten Umrichtern ermöglicht der MMC diverse Vorteile, wie z. B. die Bereitstellung von Blindleistung oder eine Möglichkeit zum Schwarzstart. Es handelt sich hierbei um einen selbstgeführten Umrichter, der aus mehreren seriell verschalteten Submodulen besteht. In dieser Arbeit wurde dabei hauptsächlich die Effizienzerhöhung des Halbbrücken MMC untersucht, welcher sich durch den geringen Chipflächeneinsatz und geringe elektrische Verluste auszeichnet.

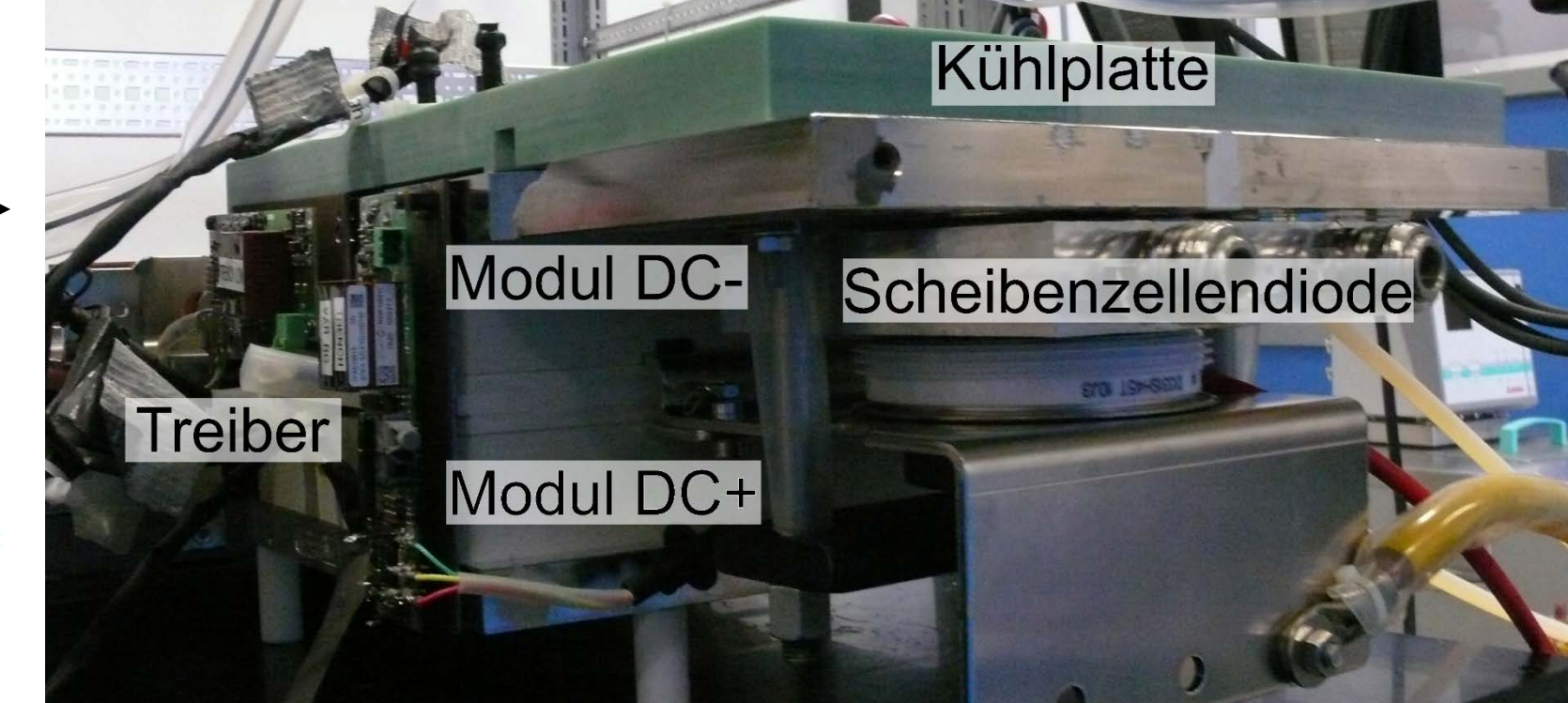
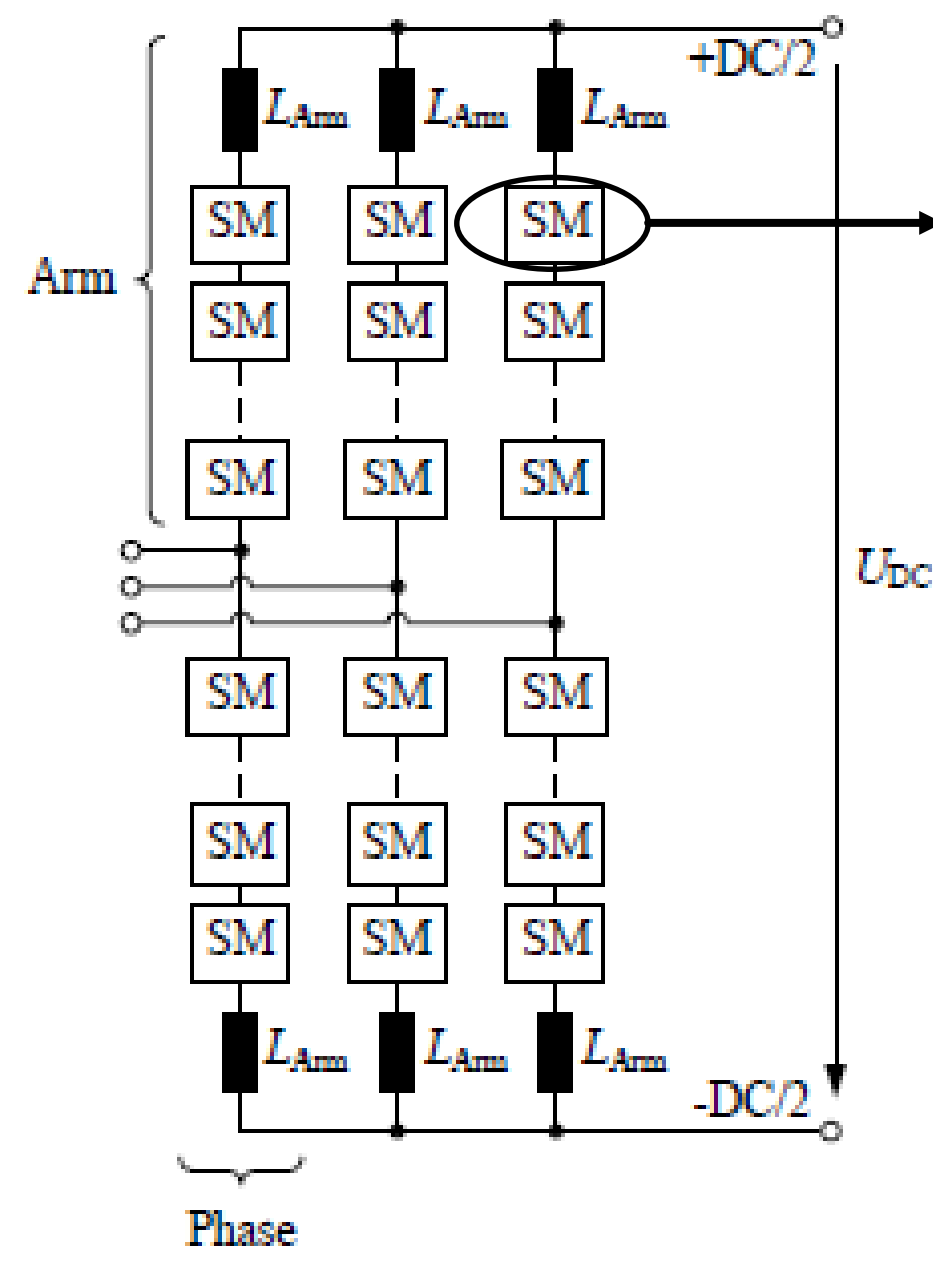
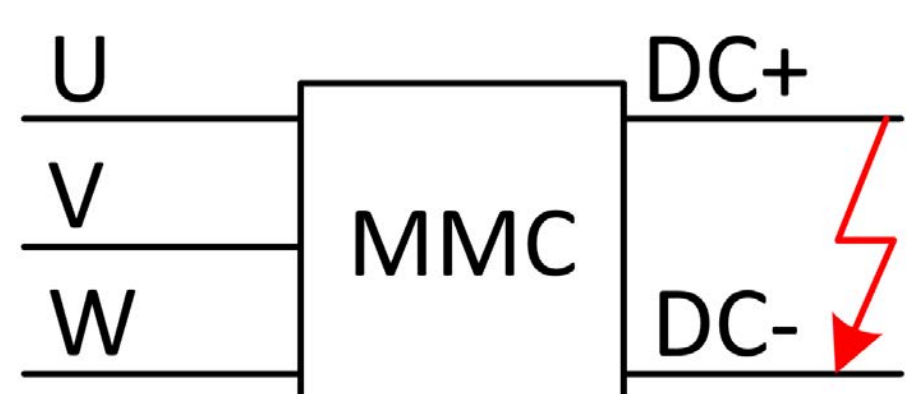


Foto eines Halbbrücken-Submoduls mit paralleler Scheibenzellendiode an der Unterseite. Die Leistungs-module befinden sich innerhalb des grauen Gehäuses. Links sind die zur Ansteuerung nötigen Treiber zu sehen.

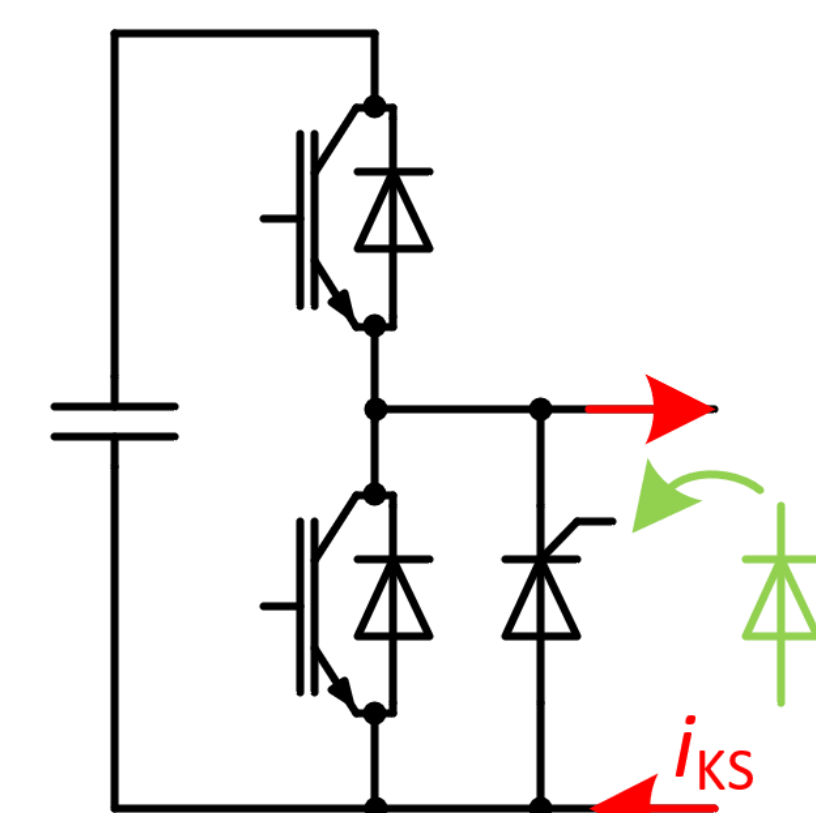
HVDC-Übertragungen transferieren die Leistung zwischen zwei festen Punkten und werden daher auch als Punkt-zu-Punkt-Verbindung bezeichnet. Am Start der Übertragungsstrecke transformiert der MMC die Wechselspannung in Gleichspannung, am Ort der Lastzentren wird die Gleichspannung zurück in die Wechselspannung transformiert. Es sind daher immer zwei MMCs nötig, die in unterschiedlichen Arbeitspunkten operieren. Für die Effizienz der gesamten Übertragungsstrecke ist daher der kombinierte Betrieb interessant, in welchem die Verluste von Gleich- und Wechselrichter zu je 50 % in die Gesamtverluste eingehen.

Kurzschluss der DC-Seite



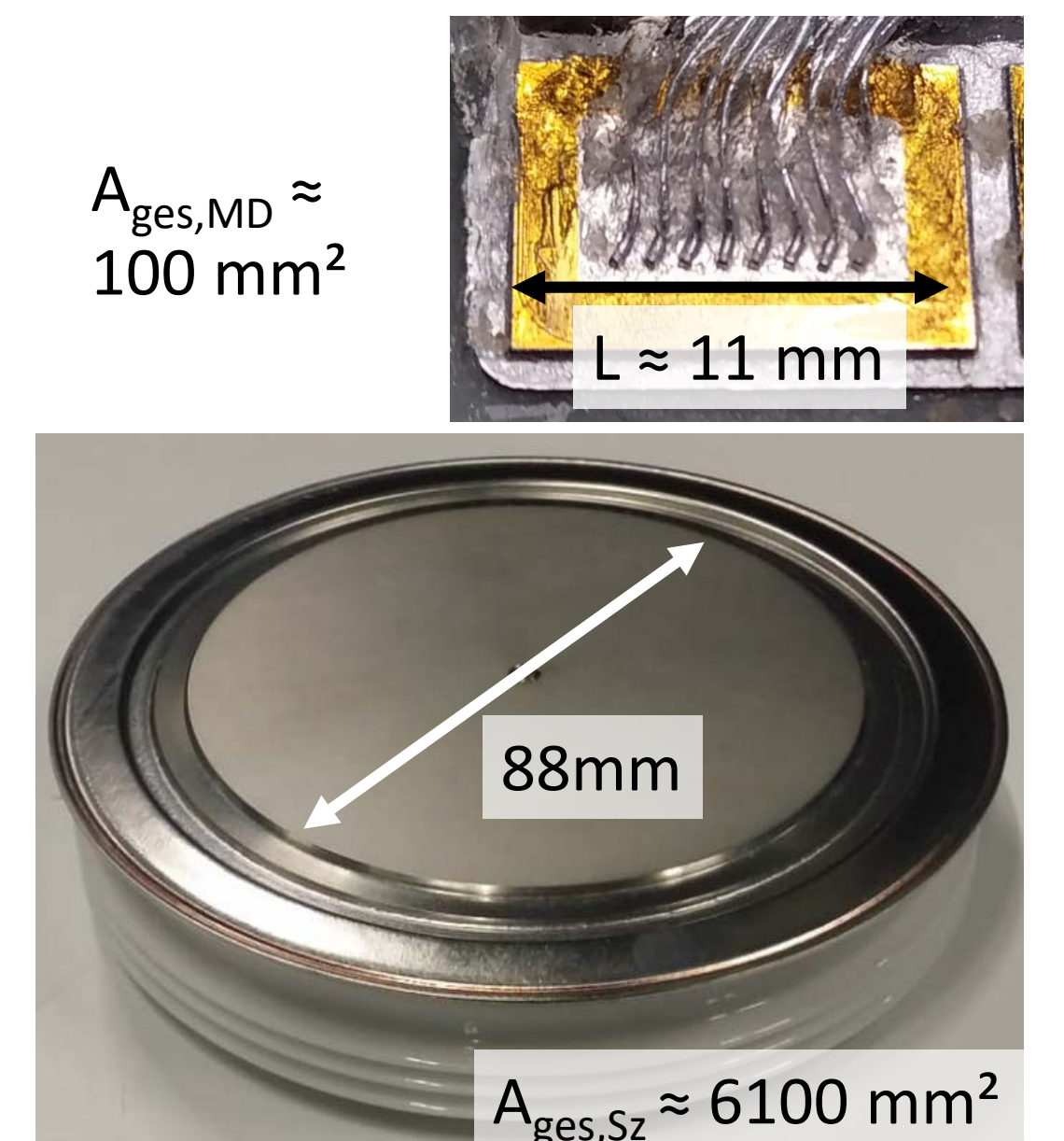
Ein Kurzschluss der DC-Seite ist mit einem Halbbrücken MMC nicht beherrschbar. Wird die DC-Seite kurzgeschlossen, geht die Steuerbarkeit des Halbbrücken MMC verloren und der MMC arbeitet als Diodengleichrichter. Die AC-Seite wird damit kurzgeschlossen, wodurch sich ein hoher Fehlerstrom einstellt.

Der Fehlerstrom fließt dabei durch die untere Diode der Halbbrücke und würde diese zerstören. Ein zusätzlicher paralleler Thyristor ermöglicht eine Entlastung, ist jedoch nicht im Normalbetrieb verwendbar und benötigt eine Detektion des Fehlerstroms sowie eine dedizierte Ansteuerung. Die verbaute Chipfläche des Halbbrücken-Submoduls erhöht sich. Um die für Fehlerfälle notwendige zusätzliche Chipfläche auch im Normalbetrieb nutzen zu können, wird anstelle des Thyristors die Verwendung einer Diode untersucht, die sowohl den Fehlerstrom führen, als auch den Normalbetrieb abbilden kann. Dadurch entfällt auch die nötige Ansteuerung des Thyristors. Die Halbleiterfläche und damit die Kosten des Submoduls sind gleich.

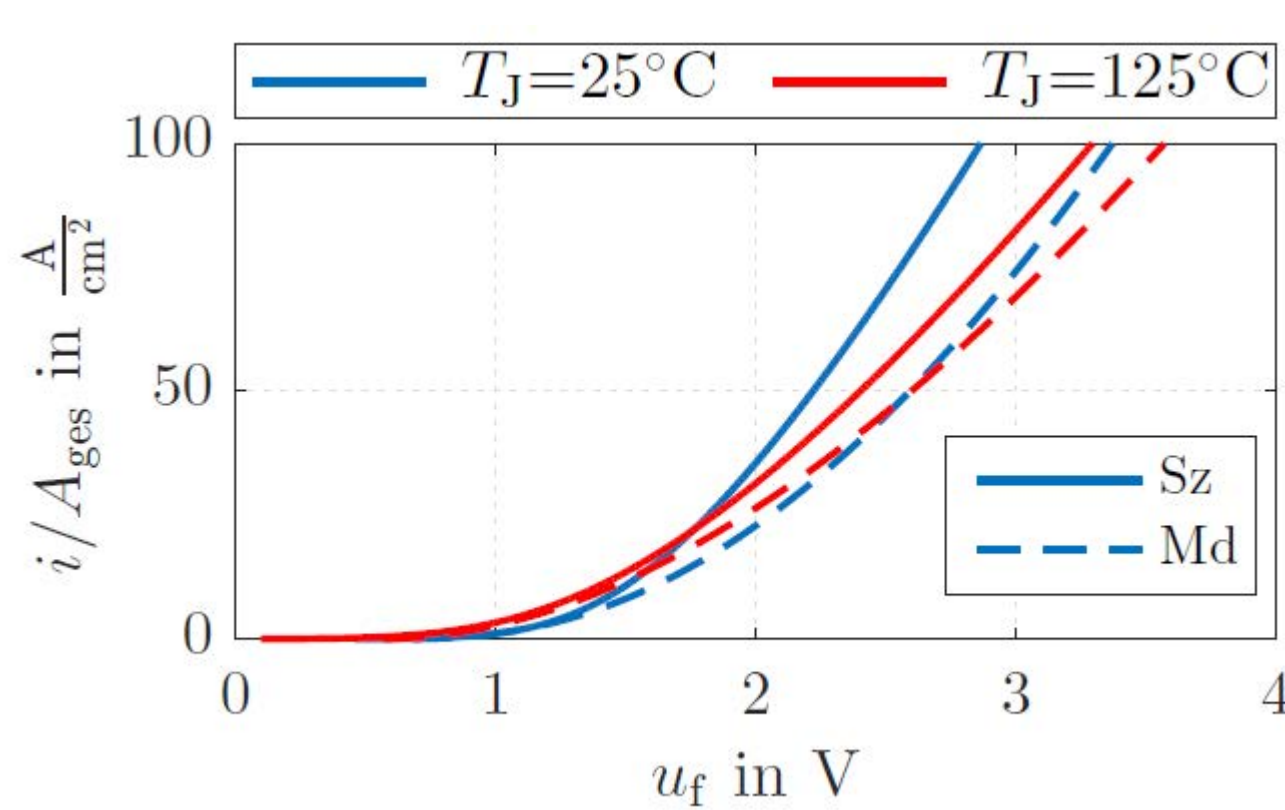
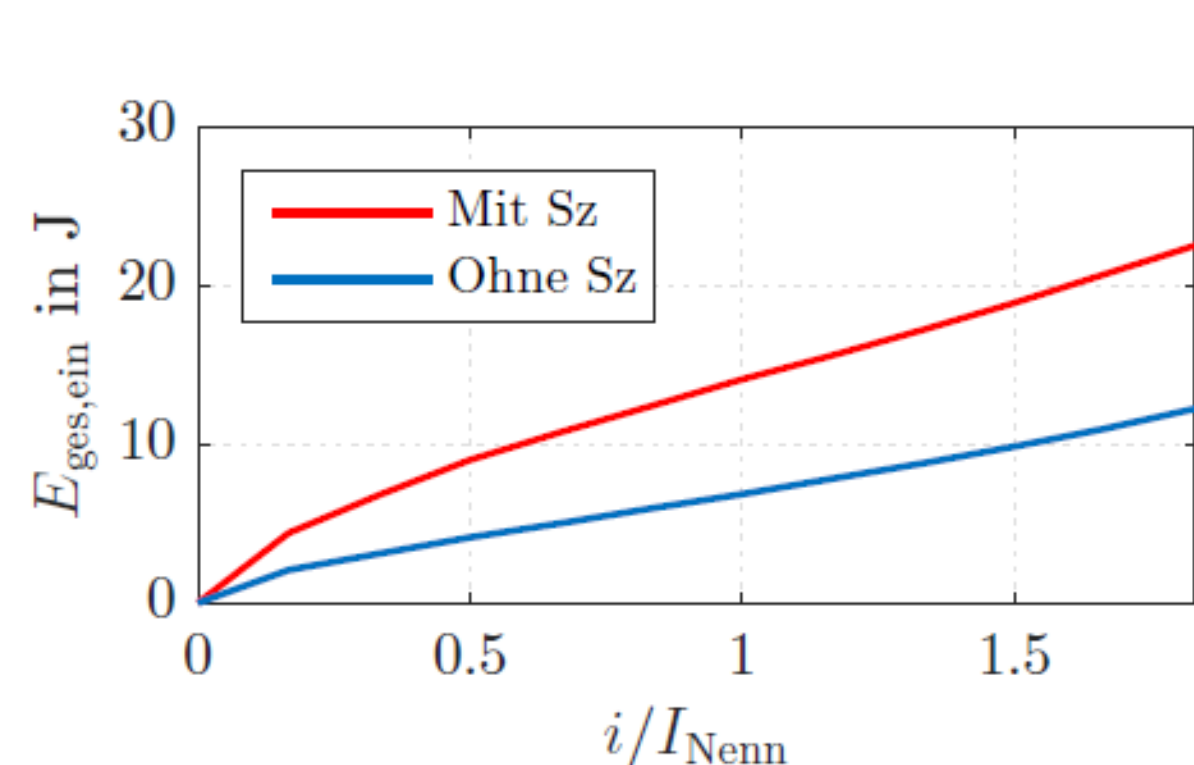
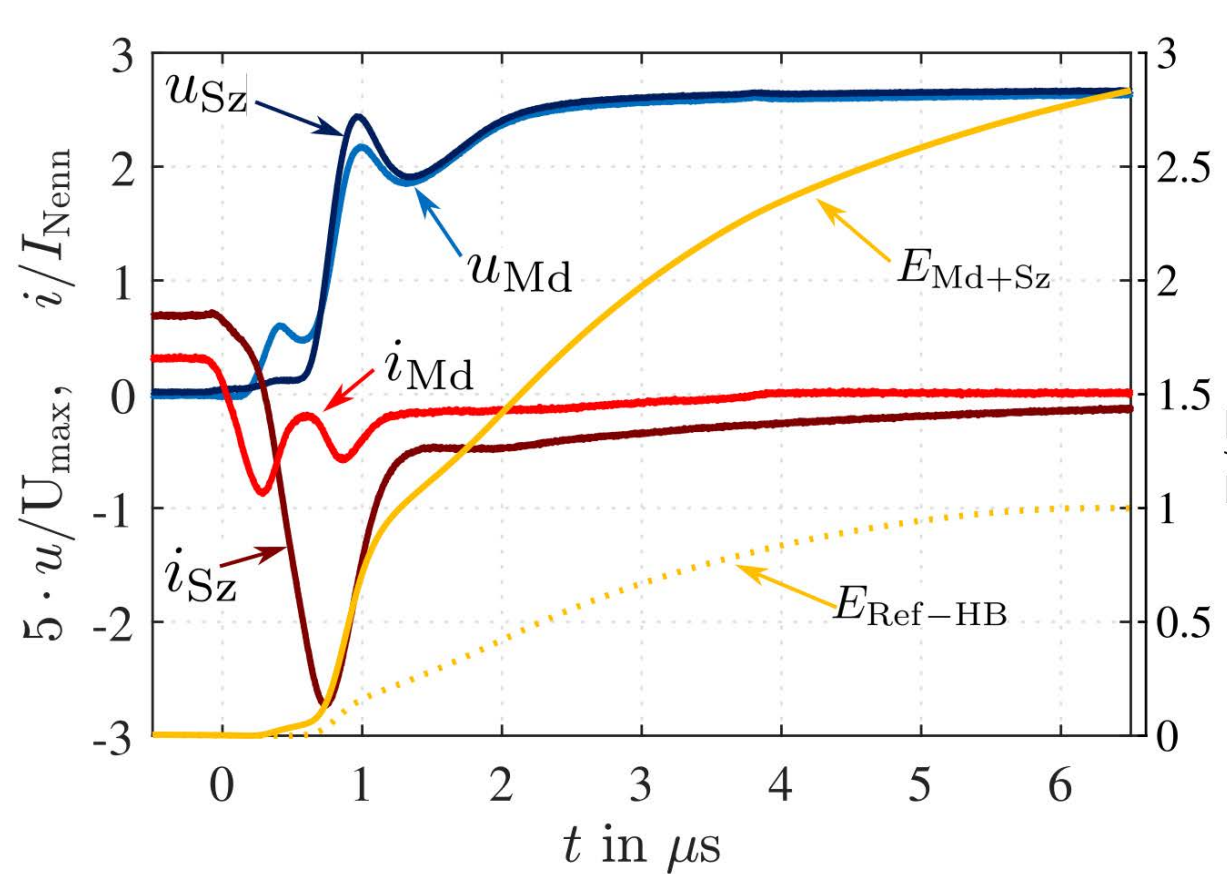


Scheibenzellendioden im Halbbrücken MMC

Scheibenzellendioden zeichnen sich durch ihre große zusammenhängende Chipfläche aus. Die beiden Abbildungen auf der rechten Seite zeigen das Größenverhältnis einer Moduldiode zu einer Scheibenzellendiode. Da auch die Scheibenzellendiode nur am Rand passiviert werden muss, bietet diese ein großes Verhältnis von aktiver Fläche zur Gesamtfläche. Scheibenzellendioden werden nicht wie herkömmliche Dioden durch Bonddrähte kontaktiert, sondern zwischen zwei Molybdänscheiben zur Kontaktierung gepresst. Sie bieten damit eine beidseitige Kühlmöglichkeit und können mit hohen Stoßströmen beaufschlagt werden. Dadurch ist die Scheibenzellendiode eine optimale Alternative zum Thyristor.



Schalt- und Durchlasscharakteristik von Scheibenzellendioden

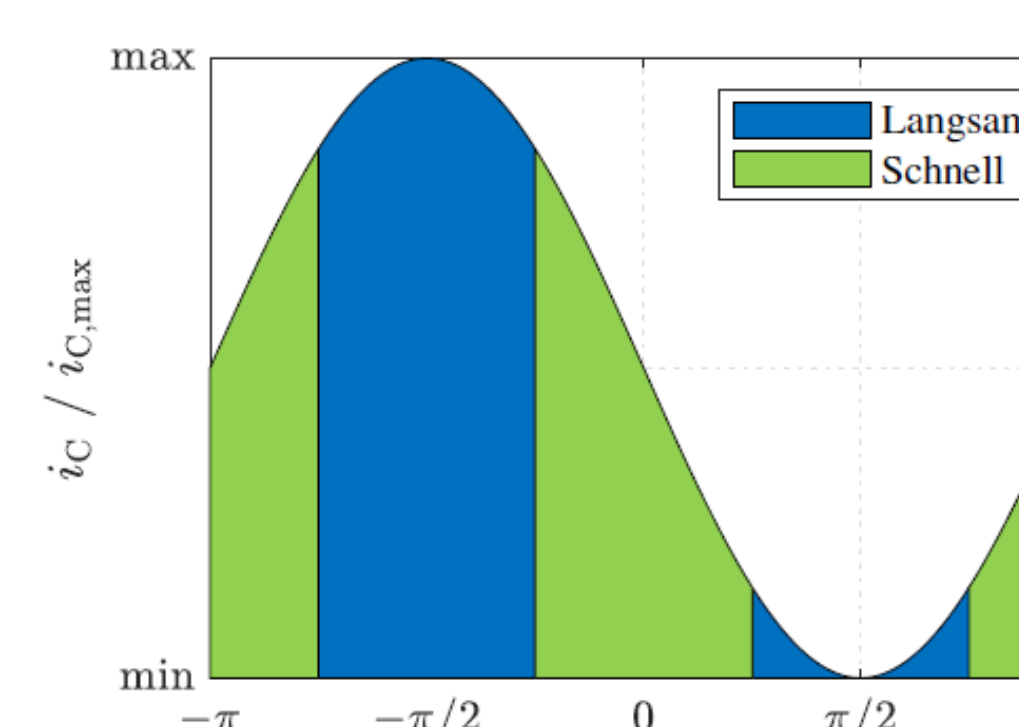


Der Ausschaltvorgang der Diodenparallelschaltung ist im oberen Bild dargestellt. Die niederinduktiv angebundene Moduldiode beginnt zuerst mit dem Ausräumen der Speicherladung und nimmt einen Teil der Zwischenkreisspannung auf. Nach etwa 0.5 μs wird der Vorgang allerdings durch den Rückwärtserholvorgang der Scheibenzellendiode unterbrochen. Nach Erreichen von dessen Rückstromspitze kommutiert die komplette Zwischenkreisspannung. Durch das Einfügen der Scheibenzellendiode liegt eine höhere Sperrverzögerungsladung vor, was die Ausschaltverlustenergie im Vergleich zur Referenz-Halbbrücke (gestrichelt) steigert. Das Ausschalten der Diode geht mit dem Einschalten des IGBT einher (nicht dargestellt), welcher einen höheren Einschaltüberstrom führen muss. Im Vergleich zur Referenz-Halbbrücke verdoppelt sich damit die gesamte Einschaltverlustenergie. Diese Schaltverlustenergie fällt mit jedem Schaltvorgang des Submoduls an und ergibt durch Multiplikation mit der mittleren Schaltfrequenz des Submoduls dessen Schaltverluste.

Die Schaltfrequenz eines MMC-Submoduls ist mit 120 Hz jedoch gering, wodurch vor allem die Durchlassverluste im MMC von Bedeutung sind. Obige Abbildung zeigt die Durchlasskurvenlinien einer Scheibenzellen- und Moduldiode unter Normierung auf die Gesamtfläche. Die Scheibenzellendiode erreicht bei gleicher Stromdichte eine geringere Vorwärtsspannung als die Moduldiode. Spezielle Prototypen mit Feld-Stopp-Technologie können diese Performance noch steigern.

Weitere Ansätze zur Verlustreduktion

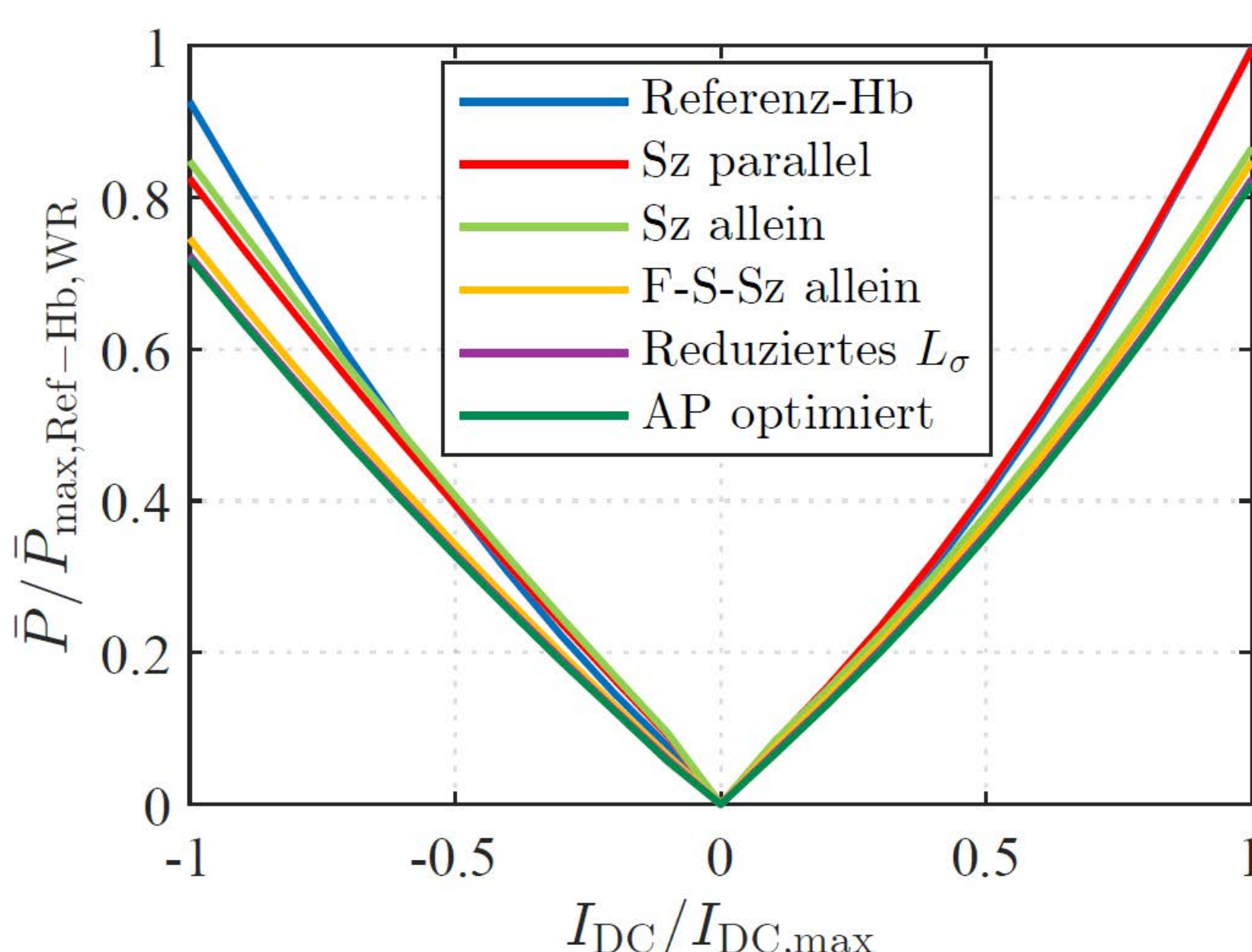
Da die Verluste mit Scheibenzellendiode nur im Gleichrichterbetrieb gesenkt werden können und die Moduldiode nur einen kleinen Teil des Gesamtstroms trägt, wurde deren Halbleiterfläche durch IGBT Chips ersetzt. Die verbaute Halbleiterfläche bleibt dabei gleich, allerdings können nun auch die Verluste im Wechselrichterbetrieb gesenkt werden. Um die Schaltgeschwindigkeit zu maximieren, wurde ein Aufbau mit geringerer Streuinduktivität untersucht. Durch die Anpassung der Gatewiderstände, konnte die Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit des IGBT erhöht und die Schaltverlustenergie gesenkt werden.



Da in einer MMC-Anlage eine kontinuierliche Strommessung erfolgt, wurde eine arbeitspunktabhängige Ansteuerung untersucht. Mit Hilfe der Strominformation wird über einem gewissen Schwellenwert der IGBT Ein- und Ausschaltwiderstand umgeschaltet, wie in der Grafik dargestellt.

Bei kleineren Strömen wird die Schaltgeschwindigkeit erhöht, um die Schaltverlustenergie zu senken. Zur Verhinderung einer Zerstörung des Bauteils liegt bei hohen Strömen ein größerer Gatewiderstand an.

Ergebnisse der Dissertation



Mittels eines Verlustmodells lassen sich die Auswirkungen der untersuchten Ansätze auf die Verluste darstellen. Die Verluste sind auf die Referenz-Halbbrücke im Wechselrichter normiert (blau) und für den Wechsel- und Gleichrichterbetrieb links und für den kombinierten Betrieb rechts dargestellt. Durch die parallele Scheibenzellendiode (rot) lässt sich vor allem im Gleichrichterbetrieb bei Vollast eine Verbesserung um 11 % erreichen. Durch die Substitution der Moduldiode durch IGBT-Chipfläche (hellgrün) steigen die Verluste im Gleichrichter minimal an, dafür können die Verluste im Wechselrichter um 14 % reduziert werden. Im kombinierten Betrieb können die Verluste mit paralleler Scheibenzellendiode um 5% reduziert werden. Wird die Scheibenzellendiode allein verwendet, und die Halbleiterfläche der Moduldiode durch IGBT Fläche substituiert, sinken die Verluste um 11 %. Mit Hilfe der auf den MMC-Betrieb optimierten Feld-Stopp Scheibenzellendiode (orange) kann die Einsparung auch im kombinierten Betrieb auf 18 % erhöht werden. Bei der Optimierung der Schaltverluste zeigt vor allem die Reduzierung der Kommutierungsinduktivität (lila) eine weitere Verbesserung, während die Reduzierung durch die arbeitspunktabhängige Ansteuerung (dunkelgrün) geringer ausfällt. Mit allen Optimierungen erreicht man im kombinierten Betrieb 20 % geringere Verluste bei Vollast.

