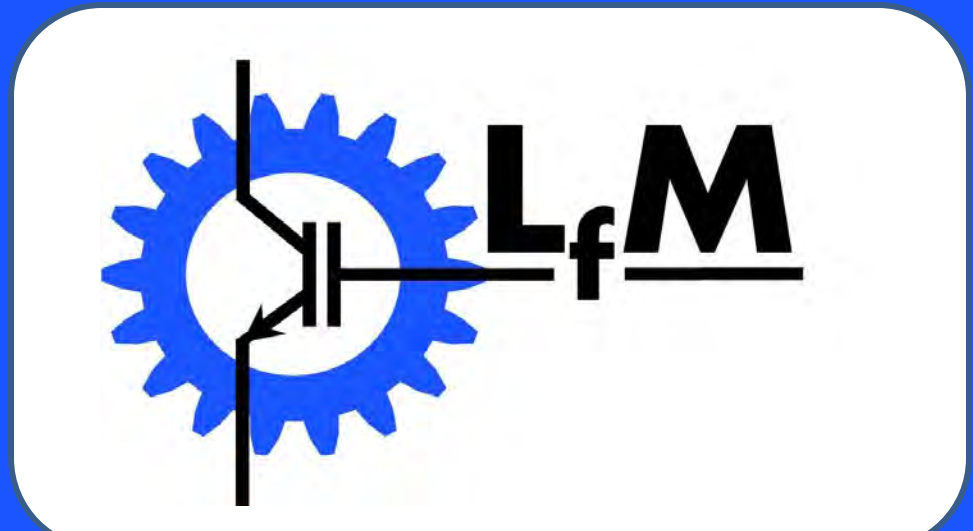




Dr.-Ing. Viktor Hofmann

„Hochausnutzung leistungselektronischer Stellglieder mit Sonderfunktionen in der Hochspannungsgleichstromübertragung“ Promotionsprüfung am 03.12.2019

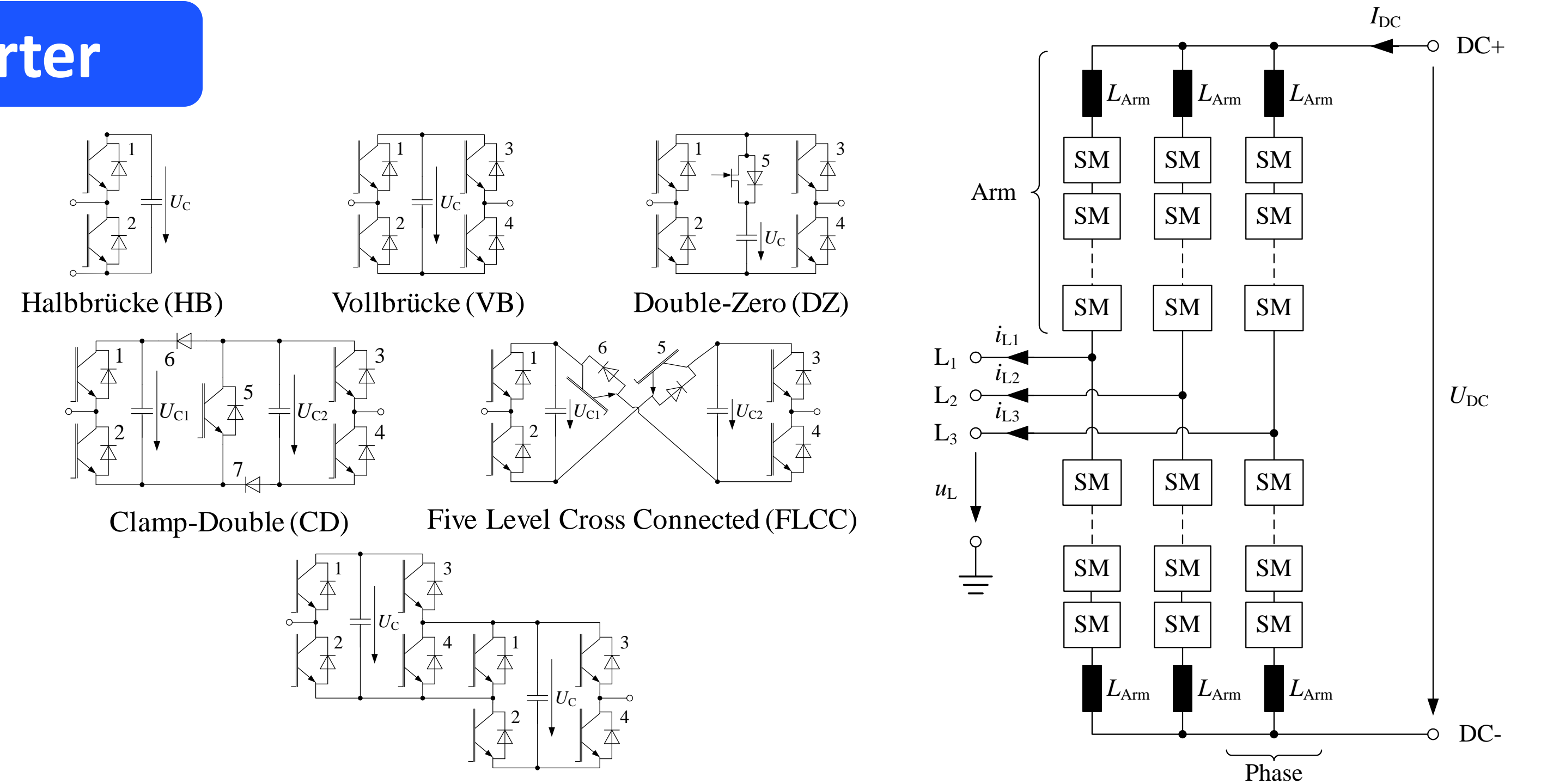


Motivation

Der wachsende Energiebedarf und der zunehmende Anteil regenerativer Energien begünstigen einen Wandel der Erzeugerstruktur. Die damit einhergehenden, neuen technischen Herausforderungen können durch die bestehende Hochspannungsgleichstromübertragung ermöglicht werden. Die Hochspannungsgleichstromübertragung ermöglicht einen verlustarmen Energietransport über weite Strecken sowie eine hocheffiziente Energieumwandlung durch die eingesetzten Konverter. Weiterhin trägt die Verwendung der Gleichstromtechnik erheblich zur Stabilisierung der Wechselstromnetze bei, wobei zusätzliche Funktionen von den genutzten leistungselektronischen Stellgliedern gefordert werden.

Modularer Multilevel Konverter

Der Modulare Multilevel Konverter (MMC) zeichnet sich als eine Schlüsseltechnologie in der Hochspannungsgleichstromübertragung ab und bietet vielerlei Vorteile für zukünftige HVDC-Netze. Er besteht aus drei Phasen, wobei jede Phase aus zwei Konverterarmen aufgebaut ist. Jeder Konverterarm ist dabei mit einer Vielzahl in Serie geschalteter Submodule (SM) bestückt. Ein Submodul bildet den Grundbaustein eines MMC und ermöglicht eine gute Skalierbarkeit über die Serienanzahl. Es existieren zahlreiche Ausführungsvarianten, die sich sowohl im Aufbau als auch in den funktionalen Eigenschaften stark unterscheiden. Die eingesetzten Submodule sind maßgebend für die Effizienz und Leistungsfähigkeit eines Modulares Multilevel Konverters.



Submodulbewertung und -vergleich

In dieser Dissertation wurden die gängigsten und vielversprechendsten Submodule (Abb. 2) analysiert und miteinander verglichen. Als technische Kennwerte zum Vergleich leistungselektronischer Schaltungen eignen sich u.a. die Effizienz, die Ausnutzung der installierten Schalterleistung und der thermisch max. DC-Armstrom. Die Bestimmung dieser Kennwerte basiert überwiegend auf der Verlustleistungsrechnung und thermischen Modellierung der eingesetzten Halbleiter. Neben dem gewählten Betriebspunkt, sind die Kennwerte zusätzlich von der eingesetzten Modulationsstrategie und der Modulationsart abhängig. Unter Berücksichtigung dieser zahlreichen Einflussfaktoren wurde für jedes Submodul der auslegungsrelevante Betriebspunkt identifiziert und der bewertende Vergleich durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Halbbrücke die effizienteste und die Vollbrücke die leistungsfähigste, einsetzbare Zelle darstellt. Im Hinblick auf die Hochausnutzung des MMC bietet sich die kombinierte Nutzung dieser beiden Submodulvarianten an, woraus jedoch neben den möglichen Nutzen auch einige Betriebs-einschränkungen resultieren.

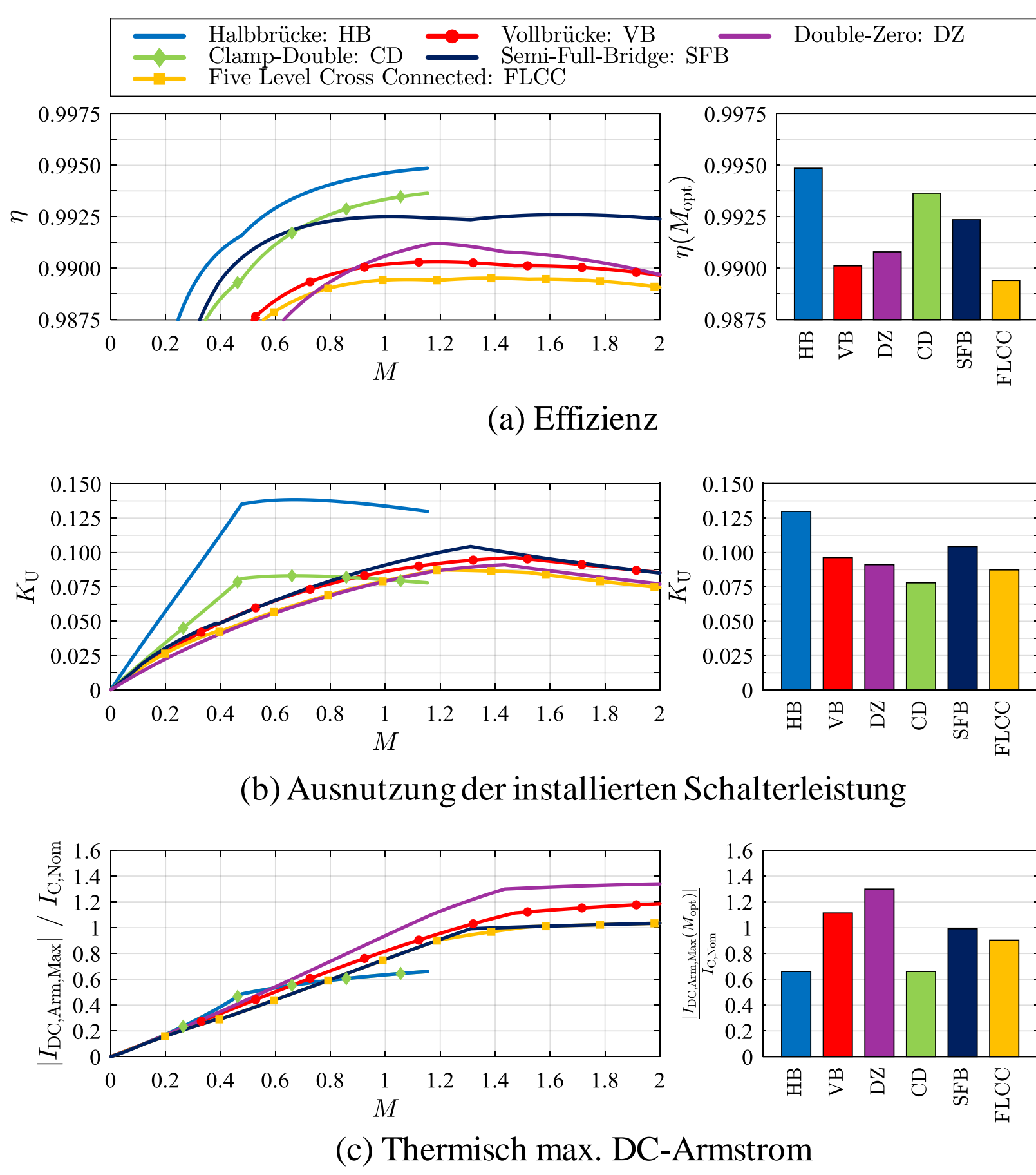


Abb. 3: Effizienz, Ausnutzung der installierten Schalterleistung und thermisch max. DC-Armstrom verschiedener Submodule in Abhängigkeit vom Modulationsindex bei reiner Wirkleistungsübertragung im Wechselrichterbetrieb.

Modulationsalgorithmus und entkoppelte f_s-Regelung

Die Modulmischbestückung eines MMC-Arms mit Halb- und Vollbrücken (Hybrid-MMC) ermöglicht ein vorteilhaftes Gesamtverhalten des MMC. Die Halbbrücken werden genutzt, um die Kosten und Halbleiterverluste zu reduzieren und die Vollbrücken ermöglichen eine Übermodulation und erhöhte Leistungsfähigkeit. Weiterhin erlauben die Vollbrücken zusätzliche Sonderfunktionen wie das Blockieren eines DC-Fehlers oder das stabile Durchfahren eines DC-Fehlers bei zusätzlicher Blindleistungsbereitstellung. Bei einem solchen Hybrid-MMC wirkt eine Submodulvariante stets leistungsbegrenzend. Weiterhin weisen die Halbbrücken bei Nutzung der Übermodulation energetische Beschränkungen auf. Hierfür wurde ein neuartiger Modulationsalgorithmus entwickelt, der den sicheren Betrieb eines Hybrid-MMC mit unterschiedlichen Submodulvarianten bei verschiedenen Kondensator-nennspannungen erlaubt. Es handelt sich dabei um ein Online-Verfahren, das keinerlei Vor-berechnungen möglicher Spannungsverläufe der unterschiedlichen Submodulvarianten erfordert. Weiterhin wurde eine Schaltfrequenzregelung der verschiedenen Modulgruppen realisiert. Dadurch wird ein definierter Konverterbetrieb mit einem Hybrid-MMC erst möglich und erlaubt eine gezielte Be- oder Entlastung einzelner Submodulvarianten. Die entwickelten Funktionalitäten werden dabei auf Zellenebene innerhalb des Modulators implementiert und erfordern keinerlei Eingriff in die übergeordnete Strom- oder Energieregulierung.

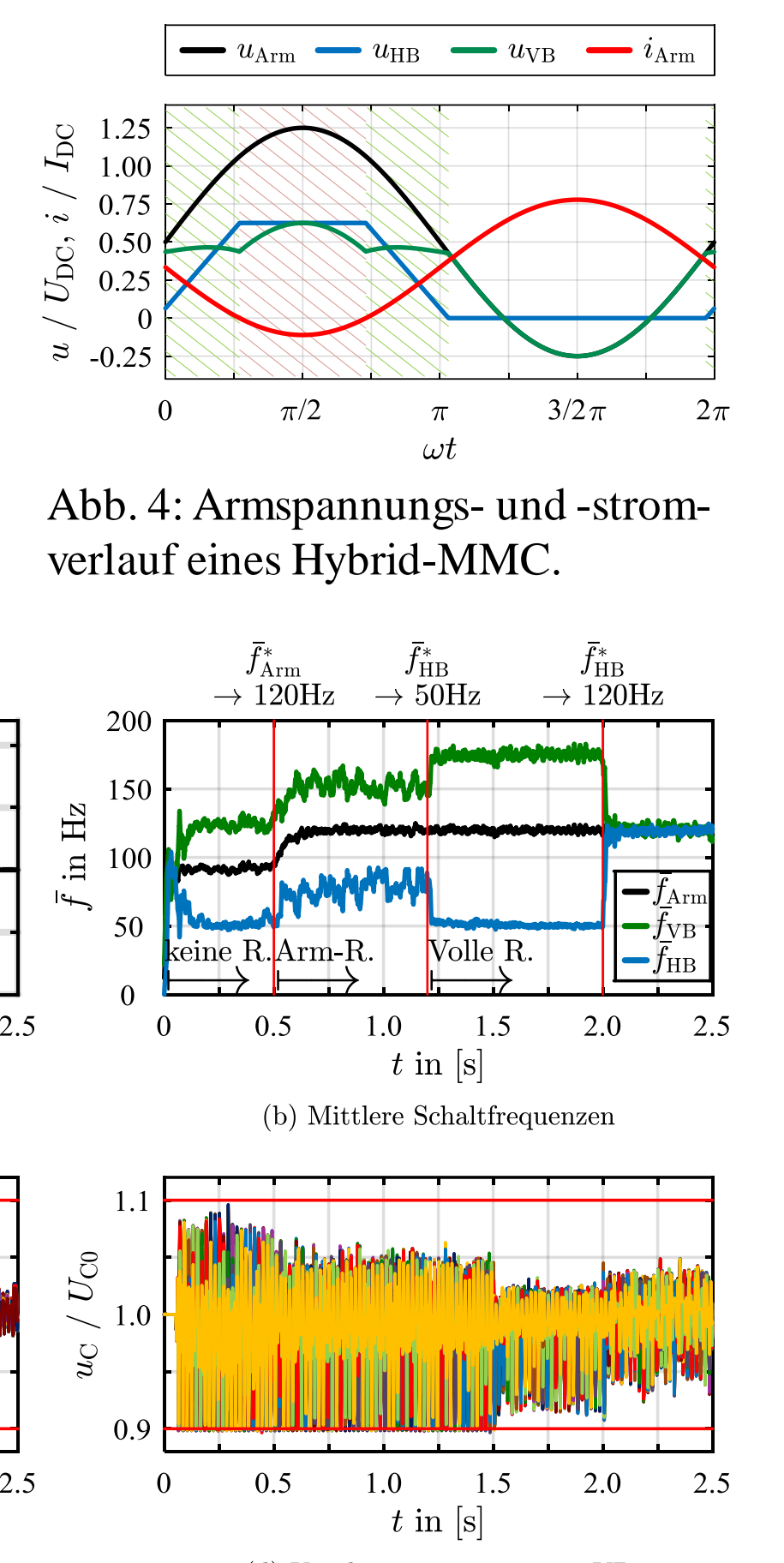


Abb. 5: Simulationsergebnisse einer transienten Full-Scale-Simulation unter Einsatz des entwickelten Modulationsalgorithmus.

Optimierte Konverterdimensionierung

Auf Grundlage der gemittelten Verlustleistungsmodellierung, die an die besonderen Anforderungen des Hybrid-MMC und die damit verbundene Betriebsstrategie angepasst wurde, erfolgte eine kostenoptimierte Konverterdimensionierung. Dabei wurden verschiedene Verlustkostenbewertungen und anfallende Hardwarekosten berücksichtigt. Weiterhin fand die Evaluation für unterschiedliche Modulationsarten statt. Die Optimierung wurde im Hinblick auf möglichst geringe Gesamtkosten pro übertragener Leistung durchgeführt. Neben der Konverterdimensionierung für eine reine Leistungsübertragung wurden optimierte Konfigurationen bei zusätzlicher Anforderung an die Sonderfunktionen der absenkbaren DC-Spannung, des sicheren DC-Fehlerbetriebs und gleichzeitig beider Funktionalitäten ermittelt. Der Freiheitsgrad bestand einerseits in der optimalen Konfiguration des Umrichters, wobei der Anteil an installierten Halb- und Vollbrücken variierte. Andererseits waren der Modulationsindex und auch der mögliche DC-Strom und damit die übertragene Leistung frei wählbar. Der Vergleich mit dem Stand der Technik zeigt, dass der Hybrid-MMC nicht nur aus rein technischer Sicht eine MMC-Variante bietet, mit der die Gesamtperformance aktueller Lösungen deutlich gesteigert werden kann. Auch die Analyse mit aktuell gültigen Kostenverhältnissen zeigt die vorteilhaften Einsatzbereiche des Hybrid-MMC auf.

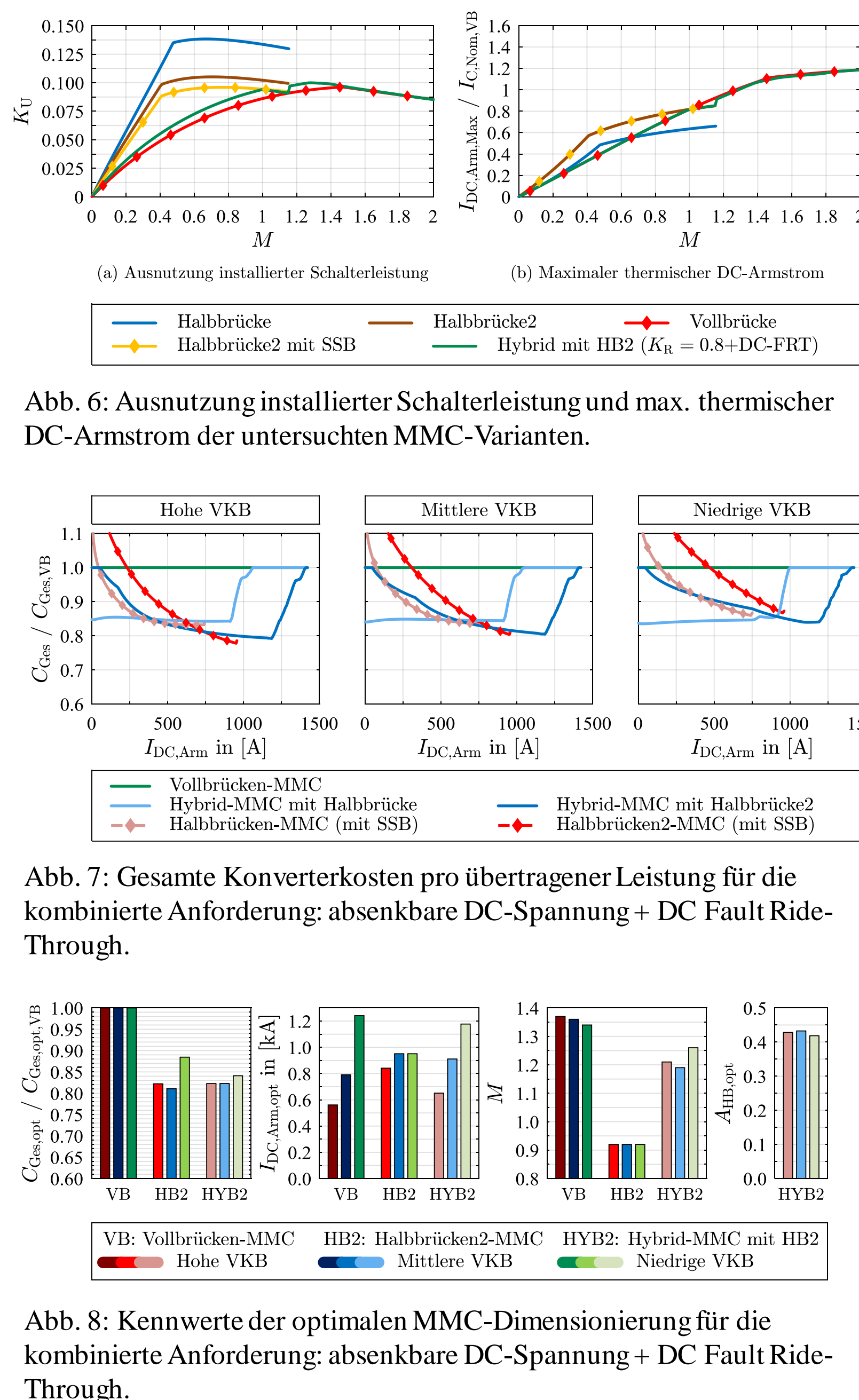


Abb. 8: Kennwerte der optimalen MMC-Dimensionierung für die kombinierte Anforderung: absenkbare DC-Spannung + DC Fault Ride-Through.

Lastflussregler

Bei der Entwicklung hin zu Multi-Terminal- und vermaschten Netzen wird zwischen parallelen Übertragungspfaden eine Lastflussregelung notwendig, die nicht durch die Konverter realisiert werden kann. Serielle Längsspannungsquellen mit einem internen Energieaustausch zwischen benachbarten Leitungen werden als hierfür geeignetste Variante angesehen. Der Stand der Technik bietet dabei nur Lösungen, die auf den Einsatz einer Spannungsstufe begrenzt sind. In dieser Dissertation wurde eine Topologie (U-LSQ) entwickelt, die in diesem Einsatzbereich bei geringerem Einsatz leistungselektronischer Komponenten eine höhere Effizienz und Leistungsfähigkeit aufweist. Darüber hinaus wurden zwei Schaltungskonzepte (K-LSQ und MML) erarbeitet, die über die Bemessungsspannung einer Stufe hinaus skalierbar sind und deren Einsatz somit keinen Systembeschränkungen unterliegt. Für die kaskadierte Längsspannungsquelle wurde eine Modulationsstrategie realisiert, die den Regelaufwand stark reduziert und eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Schaltung bei asymmetrischen Betriebsbedingungen zulässt. Der Modulare Multilevel Lastflussregler basiert auf fünf MMC-Armen und vollzieht den notwendigen Energieaustausch bei unterschiedlichen Frequenzen. Diese Topologie bietet ideale Skalierungsmöglichkeiten für höhere Spannungsstufen.

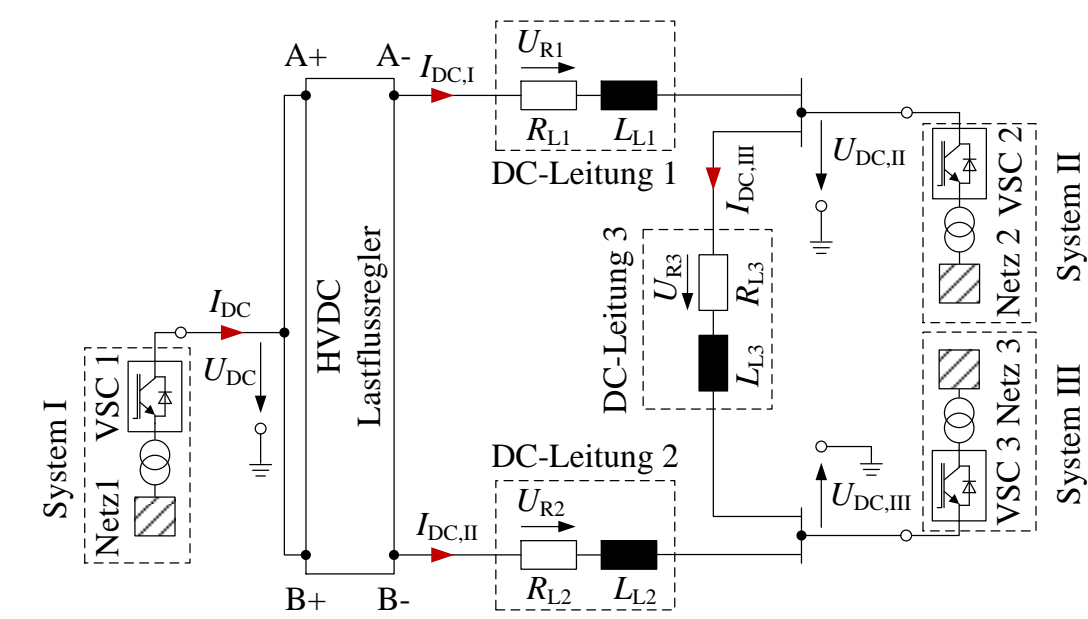


Abb. 9: Konfiguration eines vermaschten Netzes mit einem HVDC Lastflussregler (CFC).

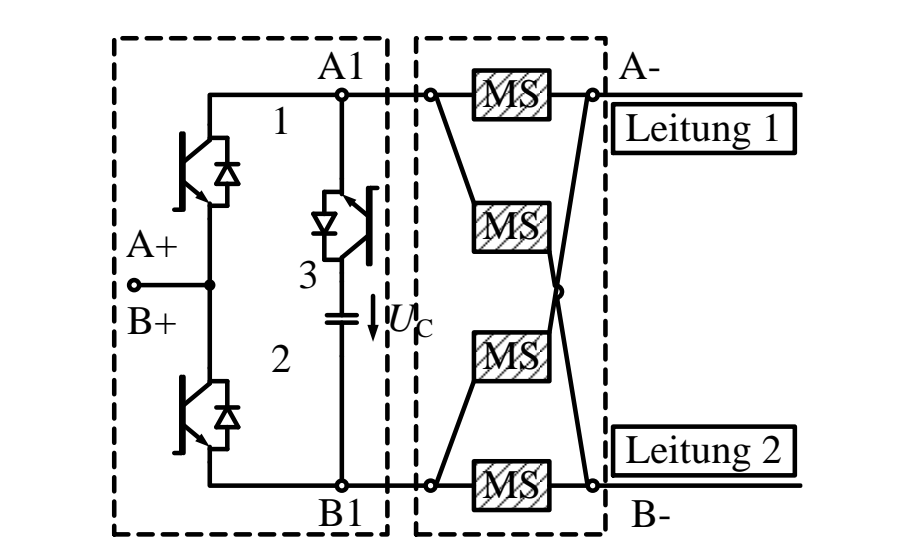


Abb. 10: Unidirektionale, einstufige Längsspannungsquelle (U-LSQ).

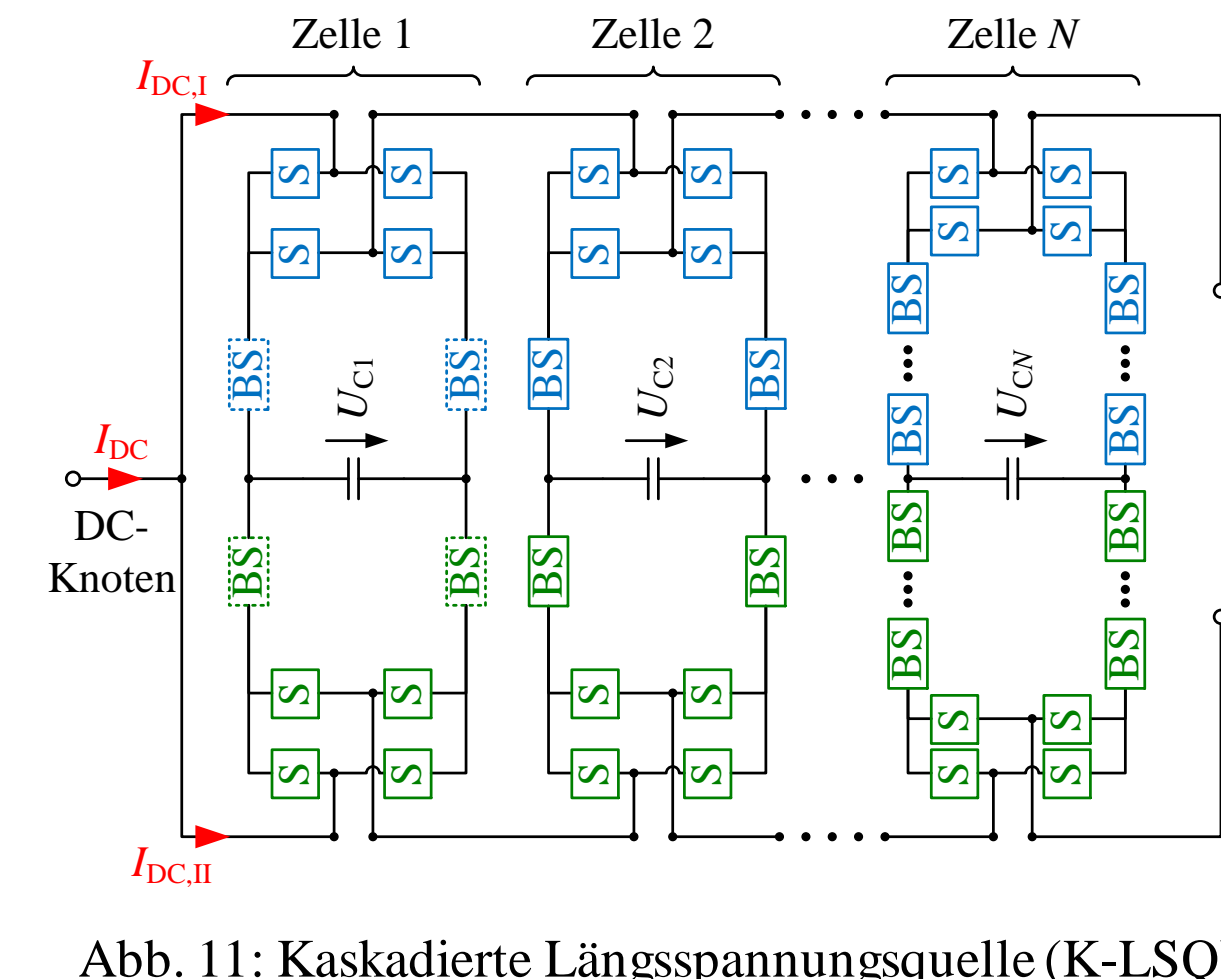


Abb. 11: Kaskadierte Längsspannungsquelle (K-LSQ).

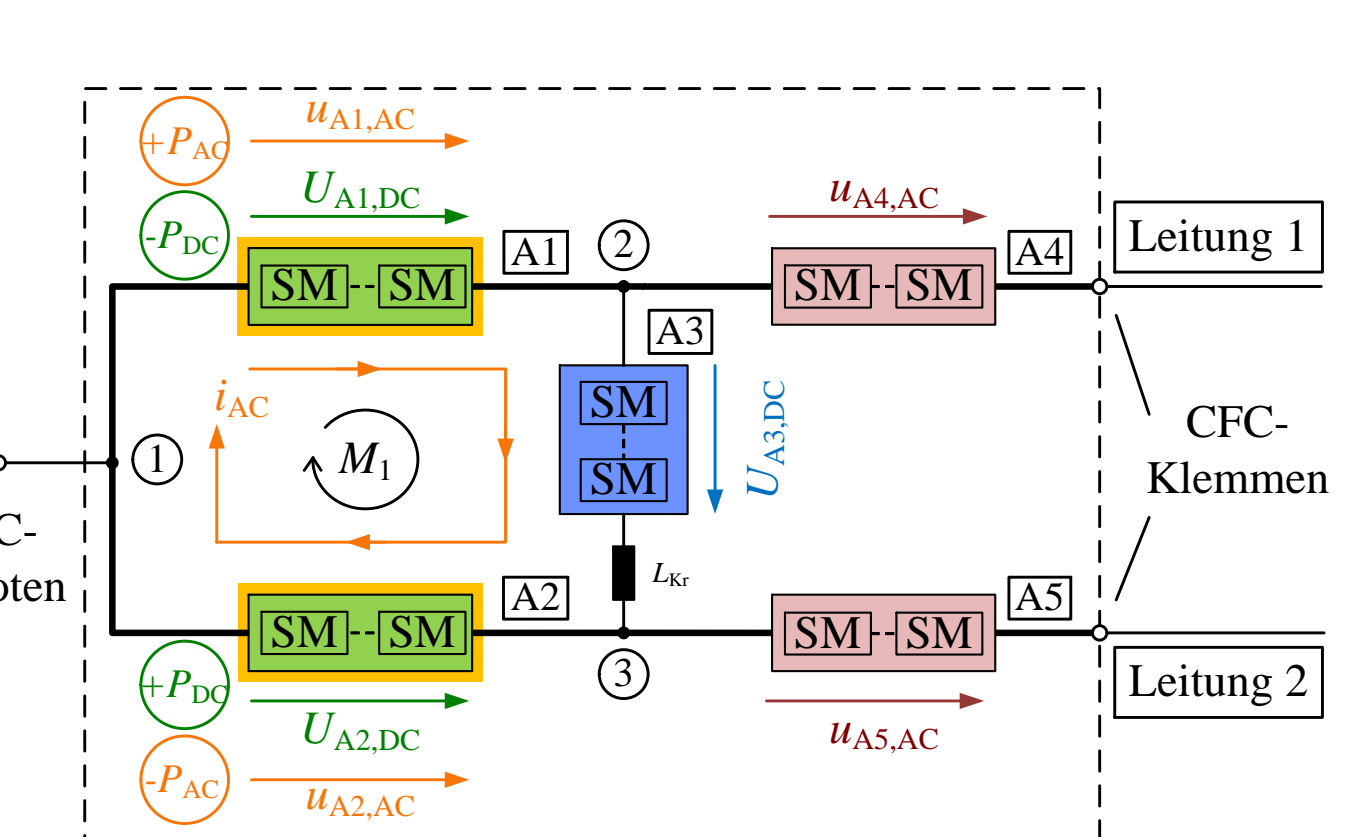


Abb. 12: Modularer Multilevel Lastflussregler (MML).