

MTAB

**Modellierung und Test neuartiger,
hocheffizienter und hochintegrierter
Antriebssysteme für Bahnanwendungen**

19I18015C

Zuwendungsempfänger

Leiter des Teilvorhabens
mit Telefon, Fax und E-Mail

Datum

Fraunhofer IISB

Simon Quergfelder
09131 761-653
09131 761-312
simon.quergfelder@iisb.fraunhofer.de

29.03.2023

Abschlussbericht

ZE:

**Fraunhofer-Institut für Integrierte
Systeme und Bauelementetechnologie
IISB**



Vorhabensbezeichnung:

MTAB

Modellierung und Test neuartiger, hocheffizienter und hochintegrierter Antriebssysteme für
Bahnanwendungen

Teilprojekt:

Stromrichtersysteme

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2019 bis 30.09.2022

Impressum:

29.03.2023, Simon Quergfelder, Dr-Ing. Thomas Heckel

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben
wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Energie gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt bei den Autoren einfügen.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellungen	5
I.1	Aufgabenstellung	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II.	Eingehende Darstellungen.....	8
II.1	AP1: Erarbeitung von Referenzantriebssystemen und Ausarbeitung einer Technologiematrix.....	8
II.2	AP 2: Simulationsmodell Stromrichter	8
II.3	AP 4: Technologieauswahl und Konzept Leistungselektronik.....	9
II.3.1	Potenzielle Stromrichter-Topologien	9
II.3.2	Modulbasiertes Vorgehen zur Topologiewahl und Umrichterauslegung	10
II.3.3	Betriebsbereich des Umrichters	11
II.3.4	Kriterien zur Auswahl des Leistungsmoduls.....	12
II.3.5	Zusammenfassung der Modulauswahl.....	15
II.4	AP 6: Evaluierung und Selektion für den Prototypbau	16
II.5	AP 7: Entwicklung & Prototyp Leistungselektronik.....	16
II.5.1	AP 7.2.1: Entwicklung teilintegriertes Hardwarekonzept	16
II.5.2	AP 7.2.2: Schaltungsentwicklung und thermisches Design Leistungsstufe	17
II.5.3	AP 7.2.3 Aufbau und Vorqualifizierung	22
II.6	AP 8: Systemtest.....	27
II.7	AP 10: Abgleich der Ergebnisse und Abschluss.....	29
II.8	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30

II.9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
II.10	Voraussichtlicher Nutzen.....	30
II.11	Fortschritt bei anderen Stellen.....	31
II.12	Erfolge und geplante Veröffentlichungen.....	31
Verzeichnisse		32
II.13	Literaturverzeichnis	32
II.14	Abbildungsverzeichnis	32
II.15	Tabellenverzeichnis	33

I. Kurze Darstellungen

Im Rahmen des Vorhabens MTAB sollte die Gewichtsreduktion des Antriebsstrangs eines Schienenfahrzeugs bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung erarbeitet werden.

Vor dem Hintergrund, dass der Fokus der Betreiber von Schienenfahrzeugen auf den Lebenszykluskosten liegt, spielt die Reduktion von Gewicht eine Schlüsselrolle, da beide Kenngrößen zum einen mehrfach in die Lebenszykluskosten eingehen. Das Gesamtziel des Vorhabens bestand daher darin, einen Fahrzeugstrang, bestehend aus Stromrichter, Motor und Getriebe, aufzubauen, der gegenüber dem Referenzsystem eine Gewichtsreduktion um mindestens 50 % aufweist.

I.1 Aufgabenstellung

Der zentrale Ansatz für die Reduktion des Gewichts ist die Verwendung einer Antriebsmotors mit deutlich höherer Drehzahl.

Das Fraunhofer IISB verantwortete die Entwicklung und Umsetzung des Stromrichters, der die erhöhten Anforderungen des neuen Systems erfüllt und die neue Maschine unter den gegebenen Rahmenbedingungen speisen kann. Dabei sollten ebenfalls die Zielvorgaben der Gewichtsreduktion von mindestens 50 % gegenüber dem Referenzsystem erfüllt werden und gleichzeitig die Effizienz deutlich um mindestens 30 % gegenüber dem Referenzsystem gesteigert werden, um höhere Leistungsdichten zu ermöglichen.

Die wesentlichen Aufgaben bestanden in:

- Auswahl des Referenzsystems in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern
- Auswahl Topologie des Stromrichters und der Leistungshalbleiter
- Erarbeitung eines Aufbaukonzept unter Berücksichtigung der Schnittstellen zu Partnerkomponenten
- Entwicklung der Elektronik
- Entwicklung eines Entwärmungskonzepts
- Mechatronische Integration der projektübergreifenden Komponenten
- Aufbau und Vorqualifizierung der elektronischen Teilkomponenten
- Aufbau und Inbetriebnahme des Stromrichters
- Unterstützung beim Test des Gesamtsystems

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Erprobung des Gesamtsystems im Labor von Alstom war ein entscheidender Teil des Gesamtvorhabens. Daher wurde bei der Entwicklung der Stromrichterkomponente darauf verzichtet, die Leistungsmodule selbst aufzubauen und stattdessen kommerziell verfügbare Module zu verwenden. Auf dieser Weise wurde ein zusätzlich serieller Entwicklungsschritt vermieden, der das Projektziel hätte gefährden können. Die Wahl der Topologie und des Leistungsmoduls ist in Abschnitt II.3.2 genauer beschrieben.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der zeitliche und inhaltliche Ablauf des Vorhabens ist in Abbildung 1 dargestellt. In der ersten Phase des Projekts wurde ein Referenzsystem und Zielwerte für das Vorhaben vereinbart (Meilenstein 1). Anschließend wurde für jede Teilkomponente nach einer Phase der konzeptionellen Entwicklung in die Detailentwicklung übergegangen (Meilenstein 2). Ab Meilenstein 3 war die Entwicklung abgeschlossen, der jeweilige Prototyp aufgebaut und nach der Fertigung vorgetestet (Meilenstein 4). Die vorqualifizierten Prototypen wurden schließlich im Verbund bei Alstom im Systemtest erprobt (Meilenstein 5) und die Ergebnisse abschließend evaluiert (Meilenstein 6).

Für das Fraunhofer IISB lag der Fokus auf der Entwicklung eines neuartigen Stromrichters, wie unter Punkt I.1 dargestellt. Die Ziele und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspunkte werden im Abschnitt II genauer beschrieben.

Durch Verzögerungen aufgrund der Corona-Pandemie und der Lieferung des Prüfstandgetriebes wurde das Vorhaben kostenneutral bis September 2022 verlängert.

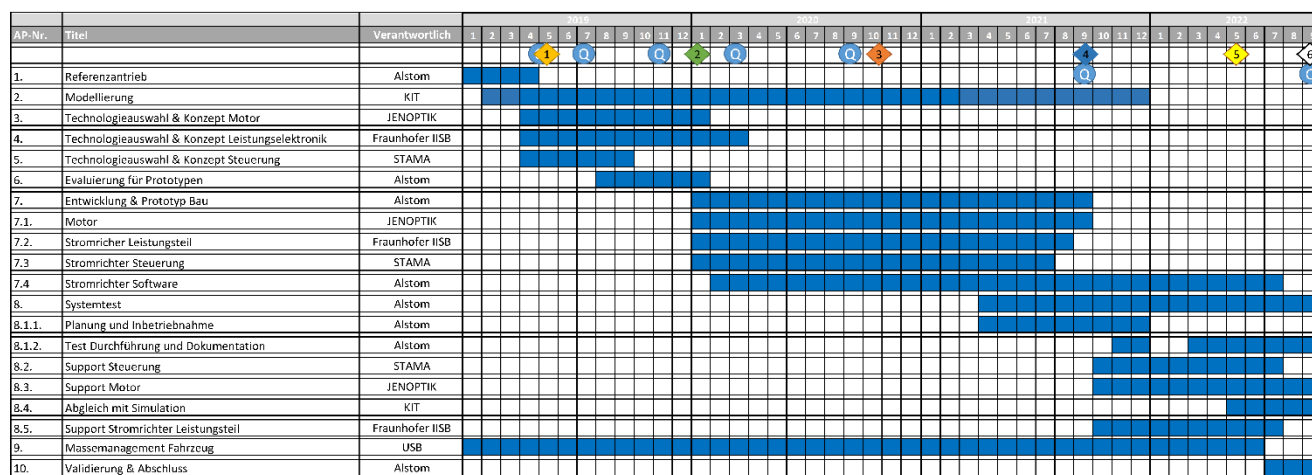


Abbildung 1: Arbeits- und Zeitplan des Vorhabens MTAB mit Meilensteinen und Quartalstreffen

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Schlüssel für die Gewichtsreduktion im Antriebsstrang ist die Verwendung einer Maschine mit höherer Drehzahl. Bisherige Antriebskonzepte erbringen die gleiche Antriebsleistung bei geringerer Drehzahl und damit mit größerem Drehmoment. Als Folge sind die Motoren größer und schwerer.

Für den neuen Stromrichter bedeutet das, er muss im Vergleich zu Stromrichter des Stands der Technik deutlich höhere Grundfrequenzen für den Motor erzeugen können. Dies geht wiederum mit höheren Schaltfrequenz auf Seite des Stromrichters einher, der dadurch höhere Verluste erzeugt.

Für das Projekt war es daher notwendig, neuen Stromrichterkonzepte für schnelldrehende Motoren zu erarbeiten. Ansätze für schnellere Stromrichter sind aus dem Automobilsektor bekannt [1]. Aufgrund der höheren Komplexität des Systems mit sehr spezifischen Leistungsanforderungen, deutlich höheren Einsatzdauern, herausfordernden Einsatzumgebungen und Betriebsszenarien können diese Ansätze nicht direkt übernommen werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurde daher erörtert, wie durch die Wahl von neuartigen Halbleitern oder komplexeren Multilevel-Topologien die gestiegenen Anforderungen bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung erfüllt werden können. Neben der Wahl des Leistungshalbleiters kann durch effizientere Kühlung Systemvorteile erarbeitet werden [2]. Parallel wurde daher ein innovatives Entwärmungskonzept umgesetzt, um den Leistungsteil hinsichtlich der Anforderungen zu unterstützen.

Eigene Vorarbeiten

Ein Forschungsschwerpunkt der Fraunhofer IISB liegt in der Entwicklung und Umsetzung von leistungselektronischen Systemen. Daher konnte insbesondere bei den System- und Topologiestudien für Stromrichter im Antriebsstrang und der mechatronischen Integration auf Erkenntnisse aus Vorprojekten zurückgegriffen werden.

Dazu zählen neben einer großen Zahl an Projekten im Bereich der Elektromobilität besonders die folgenden öffentlich geförderten Vorhaben:

- Roll2Rail (EU-gefördert)
- EMiLE (BMBF-gefördert)
- Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (BMBF-gefördert)
- Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität 2 (Fraunhofer-gefördert)
- StabLE (BMBF-gefördert)
- COSIVU (EU-gefördert)

Schutzrechte

Den Arbeiten des Fraunhofer IISB standen nach aktuellem Wissensstand keine Schutzrechte Dritter entgegen. Es wurden keine eigenen Schutzrechte in das Vorhaben eingebracht.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten wurden in intensiver und vertrauensvoller Zusammenarbeit mit den Partnern des Verbundvorhabens durchgeführt.

Dabei wurden besonders die Schnittstellen zu den Projektpartnern STAMA (Hardware-Verbindung zwischen Steuerboard und Stromrichter) und Alstom (Regelung für den Stromrichter und gemeinsamer Systemtest) häufig und intensiv abgestimmt. Über das Projekt hinweg wurde jedoch auch mit den anderen Projektpartnern KIT (z.B. Verlustdaten für die Systemsimulation), usb (z.B. Masseprognosen und -daten für das Massemanagement des Gesamtsystems) und Vincorion (z.B. Maschinendaten für die Arbeitspunktbestimmung des Stromrichters) in eingehendem Austausch agiert.

Im Rahmen der Teilvorhaben wurde darüber hinaus keine Unterbeauftragung an Dritte vergeben. Für die Fertigung der mechanischen Komponenten des Bahnstromrichters wurden mehrheitlich KMU in Deutschland beauftragt.

II. Eingehende Darstellungen

II.1 AP1: Erarbeitung von Referenzantriebssystemen und Ausarbeitung einer Technologiemarkt

In diesem Arbeitspaket wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein Referenzsystem für das Antriebssystem ausgewählt und die Systemparameter spezifiziert. Die Auswahl erfolgte in Anlehnung an marktübliche Antriebe, bezieht jedoch auch Aspekte aus der aktuellen Forschung mit ein. Die wesentlichen Kenngrößen, die für das Teilprojekt „Stromrichtersysteme“ relevant sind, sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Ergebnisse des Vorhabens werden an diesem Referenzsystem gemessen.

Tabelle 1: Kenngrößen des Referenzsystems

Parameter	Wert
Nennleistung Antrieb bei 600 V	150 kW
Bremsleistung Nennpunkt	Ca. 340 kW
Bremsleistung Gefahrenbremsung	450 kW
Zwischenkreisspannung nominal	750 V
Schwankungsbereich der Zwischenkreisspannung	+/- 30%
Vorlauftemperatur des Kühlwassers	65 °C
Phasenanzahl des Antriebs	3
Topologie des Stromrichters	2-Level-Stromrichter mit Brems-Chopper
Leistungshalbleiter	1700 V IGBT

II.2 AP 2: Simulationsmodell Stromrichter

Unter der Federführung des Projektpartners KIT wurden die Verluste der Baugruppen der Baugruppen (z.B. Stromrichter, Getriebe, Motor) und des Gesamtsystem für bestimmte Fahrzyklen einer Straßenbahn abgeschätzt.

Dazu wurden Wirkungsgrad-Kennlinienfelder des Stromrichters in Abhängigkeit des mechanischen Betriebspunktes (Drehzahl und Drehmoment) erstellt. Die Daten wurden mit Hilfe des in Abschnitt II.3.2 beschriebenen Modells des Umrichters generiert. Mit Hilfe dieser Daten wurde der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs abgeschätzt und damit Einflüsse der Wahl verschiedener Topologien und Technologien des Stromrichters auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems beurteilt (siehe Abschlussbericht KIT).

Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch das Wirkungsgradkennfeld des 2-Level-SiC-Moduls, das für die Umsetzung des Stromrichters ausgewählt wurde, und ist die Prognose, mit der die Messungen im System verglichen werden. (siehe Abschnitt II.7)

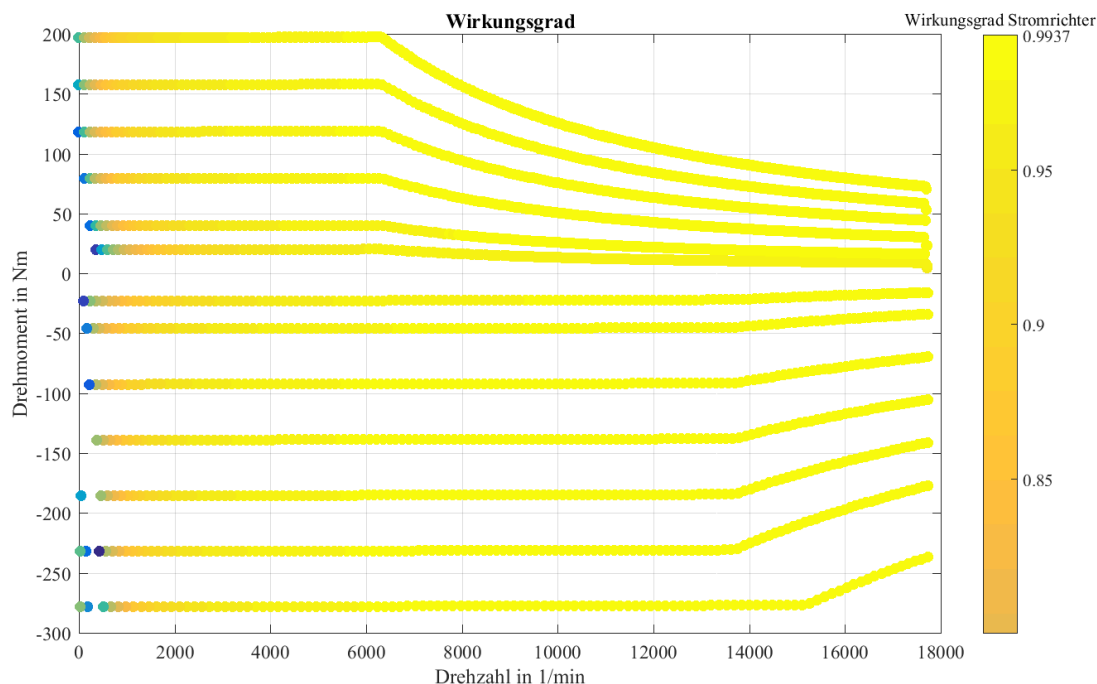


Abbildung 2: Stromrichter-Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Maschinenbetriebspunkts für die Parallelschaltung zweier SiC-Halbbrücken-Module

II.3 AP 4: Technologieauswahl und Konzept Leistungselektronik

Ziel dieses Arbeitspakets war Untersuchung und Bewertung, wie der Stromrichter im Gesamtsystem umzusetzen ist. Im Rahmen eines Technologiescreenings wurden dazu zunächst geeignete Umrichter-Topologien und Halbleiter-Technologien ausgewählt.

Unter der Randbedingung kommerziell verfügbarer Leistungsmodule (siehe Abschnitt I.2) wurde eine Auswahl an möglichen Realisierungsvarianten aufgestellt. Anschließend wurde in einer modulbasierten Simulation zur Auswahl von Topologie und Leistungsmodul die zu realisierende Variante anhand der Auswahlkriterien Wirkungsgrad, Sperrschicht-Temperaturhub, Spannungs-klasse, Modulfläche und Schaltzeit ausgewählt. Dazu werden die relevanten Teilaspekte im Folgenden zusammengefasst:

II.3.1 Potenzielle Stromrichter-Topologien

B6-Stromrichter

Der B6-Stromrichter ist aktuell die am weitesten verbreitete Wechselrichter-Topologie. Er besteht aus drei Halbbrücken, deren Mittelpunkte die Phasenausgänge bilden.

Die Stärke dieser Topologie liegt in ihrer Einfachheit. Es werden nur sechs Schalter und sechs Dioden benötigt. Die geringe Anzahl von Schaltelementen im Strompfad ermöglicht geringe Durchlassverluste. Jedes Schaltelement muss die gesamte Zwischenkreisspannung sperren können. Die geringe Zahl der Schaltelemente ermöglicht eine einfache Ansteuerung, die jedoch im Vergleich zu den komplexeren Topologien weniger Redundanzen zur Optimierung des Stromrichterhaltens bietet.

Neutral-Point-Clamped-Umrichter (NPC)

Der NPC erweitert den B6-Wechselrichter um zwei Schalter und zwei Dioden pro Phasenzweig. Der Phasenausgang kann dadurch den Wert dreier Zwischenkreispotentiale P, N und 0 annehmen. Die Zwischenkreispotentiale ergeben sich aus dem kapazitiven Spannungsteiler der Kapazitäten C1 und C2.

Jedes der Schaltelemente muss nur die halbe Zwischenkreisspannung sperren können. Innerhalb einer Spannungsklasse skaliert die Verlustenergie pro Schaltvorgang etwa linear mit der Schalterspannung. Im Vergleich zum B6-Wechselrichter sind die Schaltverluste daher geringer, während die Durchlassverluste steigen. Die Mehrzahl an Schaltelementen bietet die Möglichkeit zur Optimierung des Stromrichterverhalten durch Redundanzen in den Schaltzuständen. Nachteilig gegenüber dem B6-Umrichter ist der höhere Aufwand in Hardware und Software. Zudem ist die Messung der Kondensatorspannungen notwendig, deren Symmetrie durch eine entsprechende Ansteuerung gewährleistet werden muss.

T-Type Neutral-Point-Clamped-Umrichter (T-NPC)

Der T-NPC ist eine Variation des NPCs. Bei diesem erfolgt die Anbindung des Phasenausgangs an den Neutralpunkt durch den bidirektionalen Schalter aus zwei Schaltelementen statt der Klemmdioden.

Die äußeren Schalter des Phasenzweigs müssen, wie beim B6-Wechselrichter, die gesamte Zwischenkreisspannung sperren können. Dem gegenüber ergibt sich im Vergleich zum NPCs jedoch ein geringerer Widerstand im Strompfad. Durch den 3-Level-Betrieb ist die Differenzspannung vor und nach dem Schaltvorgang nur die halbe Zwischenkreisspannung, wodurch geringere Schaltverluste anfallen als beim B6-Wechselrichter. Die inneren beiden Schalter müssen die halbe Zwischenkreisspannung sperren. Im Vergleich zum konventionellen NPC können so die Durchlassverluste zulasten höherer Schaltverluste reduziert werden. Der T-Type NPC kombiniert daher die Eigenschaften des NPCs und des B6-Umrichters.

II.3.2 Modulbasiertes Vorgehen zur Topologiewahl und Umrichterauslegung

Der Verlauf des Projekts ist darauf ausgelegt die verschiedenen Teilkomponenten in einem Systemtest zusammen in der Praxis zu betreiben. Um dieses Vorhaben nicht zu gefährden, wurde beschlossen, auf kommerziell verfügbare Leistungsmodule für den Bau des Stromrichters zurückzugreifen (siehe Abschnitt I.2). Für den weiteren Verlauf wurde daher ein modulbasiertes Vorgehen verwendet. Dazu wurden in einer Marktrecherche Module identifiziert, die für den Umrichter in Frage kommen. Für diese Module wurden für Durchlassverluste und Schaltverluste relevanten Kennlinien aus den Datenblättern extrahiert. Diese Verlustkennlinien wurden genutzt, um mit Hilfe einer Simulation in PLECS/Matlab die Verluste des Stromrichters im Betrieb abzuschätzen und Aussagen über die Eignung der betrachteten Module zu treffen.

Die dazu geschaffene Simulationsplattform ist in Abbildung 3 skizziert: Mittig sind die Umrichter-Topologien in PLECS dargestellt, die den Stromrichter durch physikalische Schalter modellieren. Den Schaltermodellen wurden die bereits genannten Kennlinienfelder (Abbildung 3 links) hinterlegt. Zur Ansteuerung der Schalter wurden verschiedene Modulationsverfahren implementiert (Abbildung 3 oben). Zur Führung des Betriebspunkts wurde von Alstom eine Betriebspunktmatrix der MTAB-Asynchronmaschine zur Verfügung gestellt. Die Betriebspunkte wurden dem Stromrichter in Form von idealen Stromquellen beaufschlagt (siehe Abbildung 4).

Mit Hilfe der dargelegten Simulationsplattform wird das Verhalten von Stromrichtern charakterisiert und es können dabei Topologie, Halbleiterschalter, Ansteuerung und Betriebspunkt variiert werden.

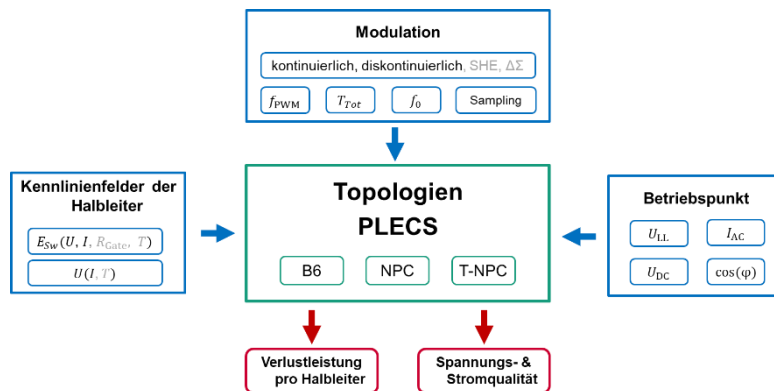


Abbildung 3: Schema zur Bestimmung der Topologie und Halbleiter-Technologie

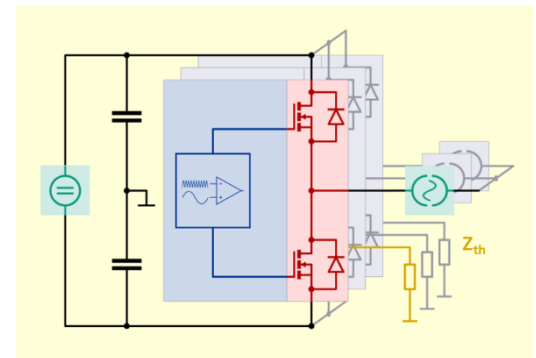


Abbildung 4: Modellierung des Stromrichters

II.3.3 Betriebsbereich des Umrichters

Nachdem im AP 1 das Referenzsystem und damit die Eckdaten des Antriebssystems festgelegt wurden, konnte mit den Projektpartnern der Betriebsbereich des Stromrichters simulativ abgegrenzt werden. Die Abbildung 5 zeigt hierzu die Abgrenzung des mechanischen Betriebsbereichs der Maschine. Es wird deutlich, dass der für den Stromrichter kritische Betriebsbereich die Gefahrenbremse (unterste Trajektorie) mit einer maximalen Leistung von etwa 450 kW darstellt.

Der Abbildung 6 sind die dabei auftretenden Phasenströme zu entnehmen, die die kritische Größe für die Auswahl der Leistungsmodule darstellt. Daraus geht hervor, dass für die Auswahl der Module ein Phasenstrom von etwa 465 A Phasenstrom als Anhaltspunkt gilt.

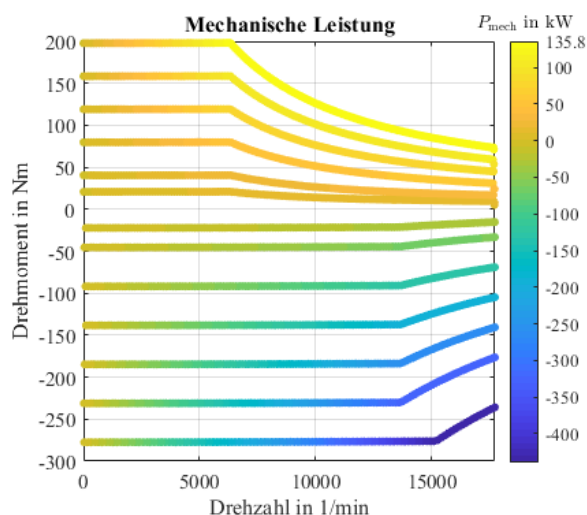


Abbildung 5: Betriebspunktraster der mechanischen Antriebsleistung in kW

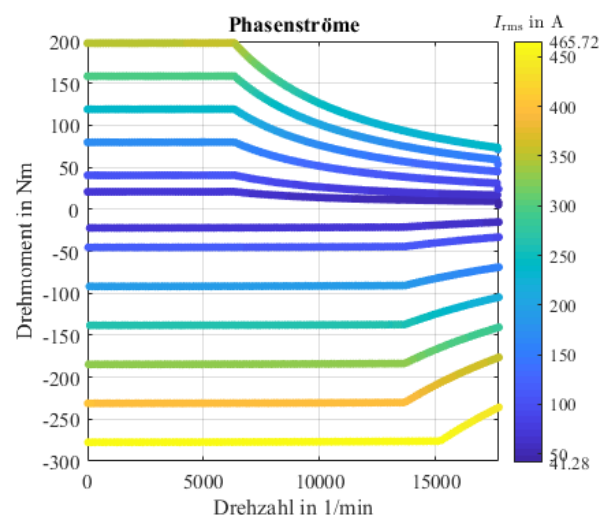


Abbildung 6: Betriebspunktraster des Phasenstromes in A

II.3.4 Kriterien zur Auswahl des Leistungsmoduls

Durch das in den vorherigen Abschnitten dargelegte Simulationstool und die Betriebspunkte für die MTAB-Asynchronmaschine können verschiedene Schaltertechnologien und Stromrichter-Topologien verglichen werden. Die dafür in Abstimmung mit den Projektpartnern gewerteten Auswahlkriterien werden im Folgenden kurz vorgestellt und die Ergebnisse jeweils zusammengefasst.

Wirkungsgrad

Für das neue System wurde ein möglichst hoher Wirkungsgrad angestrebt. Für die Auswertung der Modulvarianten wurden die arbeitspunktabhängigen Verlustdaten an den Projektpartner KIT übergeben. Anschließend wurden die Unterschiede in Fahrzyklen bestimmt (siehe Abschlussbericht KIT) und so ein Wirkungsgradvorteil von 2-Level-SiC gegenüber 2-Level-Si und 3-Level-Si von etwa 1% ausgemacht.

Temperaturhub

Ein wichtiger Faktor bei der Auslegung des Stromrichters ist die Sperrschicht-Temperatur T_j der Leistungshalbleiter. Da im Bereich des Schienenverkehrs hohe Lebensdauern erwartet werden, wurden als Kriterium der Temperaturhub ΔT_j herangezogen, der die Lebensdauer der Leistungsmodule limitiert. Zur Berechnung des Temperaturhubs aus der Verlustleistung des Stromrichters wurden zwei thermische Ersatzschaltbilder ausgewertet:

Zum einen wurde durch FEM-Simulationen ein repräsentativer thermischer Widerstand für den stationären Zustand in Kombination mit einer Wasserkühlung ermittelt. Die Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Temperaturhub-Verteilung für eine Parallelschaltung von zwei Modulen pro Phase für ein 1700-V-SiC-Modul. Diese Konstellation war bis dato die thermisch günstigste 1700-V-Variante, aber mit einem maximalen Temperaturhub von etwa 90 Kelvin thermisch für die Anwendung nicht geeignet. Die Abbildung 8 zeigt die favorisierte Variante mit der Parallelschaltung von 1200-V-SiC-Modulen, die einen maximalen Temperaturhub von etwa 55 Kelvin hervorruft.

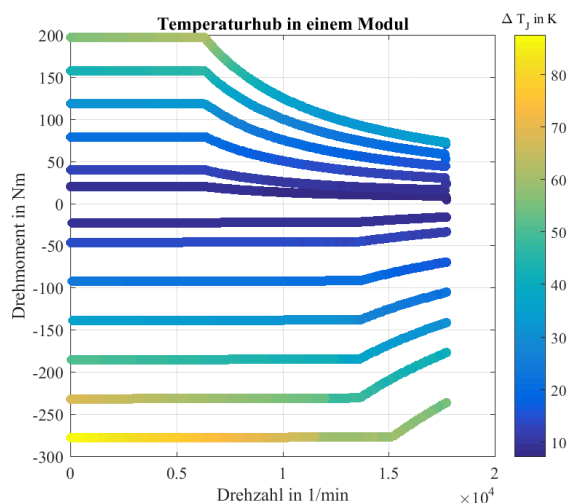


Abbildung 7: Stationäre Temperaturhübe für die Parallelschaltung eines 1700V-SiC-Moduls

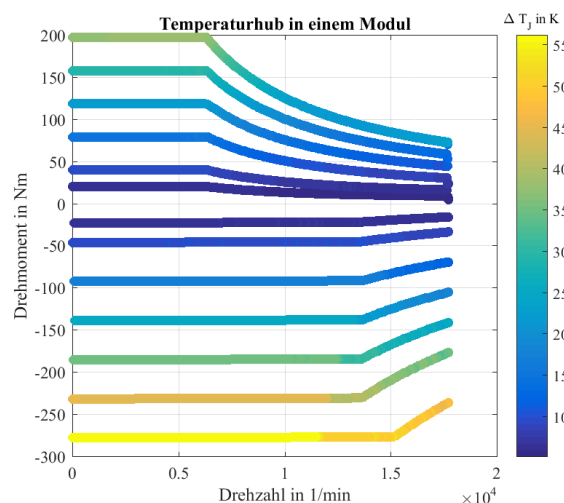


Abbildung 8: Stationäre Temperaturhübe für die Parallelschaltung eines 1200V-SiC-Moduls

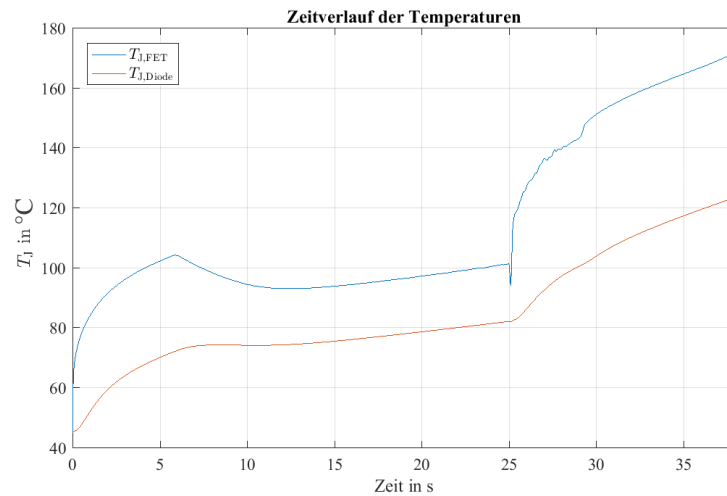


Abbildung 9: Verlauf der Sperrschicht-Temperatur der Parallelschaltung zweier SiC-Module bei dynamischer thermischer Modellierung und Gefahrenbremsung

Da durch dieses Vorgehen keine transienten Temperaturverläufe abgebildet werden können, wurde von Alstom ein thermisches Ersatzschaltbild für eine Luftkühlung und ein Fahrzyklus zur Verfügung gestellt, wodurch kritische Betriebsarten wie die Gefahrenbremse dynamisch betrachtet wurden (siehe Abbildung 9).

Neben den drei Phasen für den Wechselrichter wurden auch die Bremschopper-Phase betrachtet. Dazu wurde die Zwischenkreisspannung im Bremsfall mit Hilfe einer Hystereseregulierung kontrolliert (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

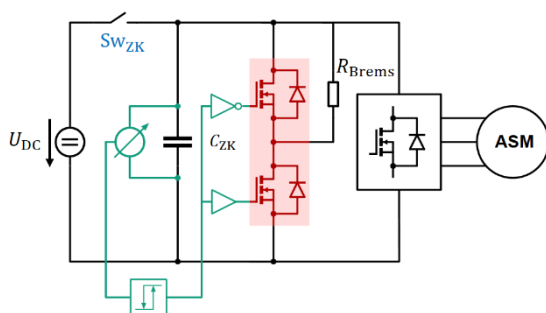


Abbildung 10: Schema zur Bremssteller-Phase

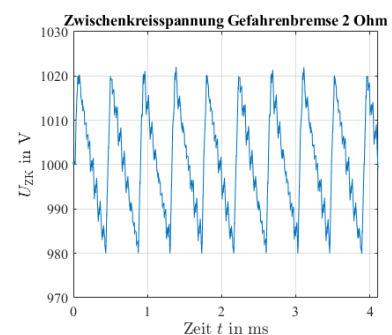


Abbildung 11: Zeitverlauf der Zwischenkreisspannung während der Gefahrenbremse

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die dynamische Modellierung aufgrund der schlechteren Luftkühlung quantitativ konservativer war, beide Varianten kamen qualitativ jedoch auf die gleichen Ergebnisse:

- Innerhalb der 2-Level-Varianten gab es kein verfügbares Modul, das allein eine ausreichend hohe Stromtragfähigkeit aufweist, so dass aus thermischen Aspekten eine Parallelschaltung von zwei Modulen notwendig war.
- Es gab bei der geforderten Leistung aus thermischen Gesichtspunkten keine verfügbare 1700-V-Variante, die in Frage kam.
- Die in thermischer Hinsicht vielversprechendsten Module waren die 1200-V-SiC-Module und 1200-V-3-Level-Si-Module.

Spannungsklasse

Üblicherweise werden bei Straßenbahnen trotz nomineller Zwischenkreisspannung von 750 V Leistungsschalter mit einer Durchbruchspannung von 1700 V verwendet. Dies ist zum einen damit begründet, genügend Spannungsreserve für transiente Artefakte vorzuweisen. Zum anderen erlaubt die größere Spannungsreserve eine höhere Lebensdauer der Halbleiter.

Im vorherigen Abschnitt wurde jedoch erläutert, dass keine verfügbare 1700-V-Variante die thermischen Anforderungen erfüllen konnte. Es wurde daher in Absprache mit den Projektpartnern beschlossen, den Stromrichter mit 1200-V-Elementen umzusetzen. Die Erkenntnisse dieses Aufbaus konnten aufzeigen, dass mit 1200-V-Module ein Stromrichter für diese Anwendung in Betracht kommt.

Schaltzeit

Für den Betrieb mit der schnelldrehenden Maschine wurde eine Schaltfrequenz von 20 kHz angestrebt. Für den Betrieb muss die Schaltzeit der Leistungsmodule klein gegen die Periodendauer sein (50 µs bei 20 kHz). Die Tabelle 2 zeigt die aus den Datenblättern ermittelten Schaltzeiten. Dazu wurde aus jeder Topologiegruppe das Modul mit der geringsten Schaltzeit dargestellt und die Verteilung der restlichen Module einer Kategorie angegeben. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass 2-Level-SiC-Module den anderen hinsichtlich der Schaltzeit überlegen sind.

Tabelle 2: Übersicht der Schaltzeiten aus Datenblattangaben

	2-Level-Hybrid	2-Level-SiC	3-Level-Si
Summe Schaltzeiten	1050 ns (Rest: ~ 2-3,5 µs)	226 ns (Rest: < 560 ns)	611 ns (Rest: ~ 1-3 µs)

Modulfläche

Ziel des Projekts war es, Masse und Volumen einzusparen. Auf Modulebene übersetzt sich dieses Ziel auf die Grundfläche des Moduls. Mit dem kleinsten relevanten 2-Level-SiC-Modul (CAB450M12XM3) wurde gegenüber den 3-Level-Topologien nur die Hälfte der Fläche und gegenüber der 1700-V-SiC-Lösung eine um 70 % geringere Grundfläche benötigt.

II.3.5 Zusammenfassung der Modulauswahl

Aus den dargelegten Gründen fiel die Wahl für die Leistungsmodule auf das CAB450M12XM3 von Wolfspeed. Pro Phase wurden zwei Module parallelgeschaltet. Herausforderungen für die Umsetzung des Designs war in der Folge das synchrone Schalten zweier paralleler SiC-Module und die Umsetzung einer niederinduktiven Kommutierungszelle, um die Abschaltüberspannung niedrig zu halten. Die Ergebnisse der Evaluierung sind in Tabelle 3 qualitativ für das jeweils beste Modul aus der Topologiegruppe zusammengefasst.

Tabelle 3: Qualitative Bewertung der untersuchten Topologievarianten

	B6-Hybrid	B6-SiC	T-Type NPC (Si)
Temperaturhub	O	+	O
Wirkungsgrad	O	+	O
Schaltzeit	-	+	O
Flächenbedarf	O	+	O

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Ergebnisse keine allgemeine Gültigkeit besitzen. Sie gelten nur für den betrachteten Betriebsbereich und bilden nur die in dieser Leistungsklasse kommerziell verfügbaren Leistungsmodule ab.

In Tabelle 4 ist die Spezifikation des MTAB-Stromrichters im Vergleich zum Referenzsystem dargestellt. Der zu treibende Strom reduziert sich etwas, da der schnelldrehende Motor bei gleicher Leistung weniger Drehmoment liefern muss. Die mit der höheren Drehzahl ebenfalls erhöhte Grundfrequenz erfordert höhere PWM-Frequenzen des Umrichters. Für einen kompakteren Leistungsteil wird eine Wasserkühlung vorgesehen. Insgesamt wird eine Halbierung der Masse des Stromrichters angestrebt.

Tabelle 4: Spezifikation für den MTAB-Umrichter

	Referenzsystem	MTAB-Umrichter
Topologie	Zwei-Level B6	Zwei-Level B6
DC-Link (nominell)	750 V	750 V
Dauerstrom (effektiv)	220 A	190 A (Fahren) 235 A (Bremsen)
Spitzenstrom (effektiv)	480 A (< 10 s)	465 A (< 10 s)
Spannung (LL, effektiv)	0 – 545 V (3Ph)	0 – 545 V (3Ph)
Halbleiter	IGBT	SiC
Taktfrequenz	2 kHz	20 kHz
Kühlung	Luft	Wasser
Gewicht	34 kg	~ 17 kg

II.4 AP 6: Evaluierung und Selektion für den Prototypbau

Unter der Federführung von Alstom wurden die Fortschritte der Teilprojekte so zusammengeführt, dass im Sinne der Gesamtsystemoptimierung ein günstiges Ergebnis (ggf. zu Lasten eines Teilsystems) erreicht werden konnte. Dazu wurden die Ergebnisse der Teilprojekte wöchentlich mit den Projektpartnern diskutiert.

Bei der Topologie- und Technologieauswahl des Stromrichters stand dabei die Abwägung von Teilsystemwirkungsgrad gegen Gesamtsystemwirkungsgrad im Vordergrund. Hierfür liefen die Zwischenergebnisse beim Projektpartner KIT für eine systemübergreifende Auswertung zusammen. Dabei kam heraus, dass die Wahl des Stromrichters einen untergeordneten Einfluss auf die Wahl von Motor oder Getriebe hat.

II.5 AP 7: Entwicklung & Prototyp Leistungselektronik

In diesem Arbeitspaket ist die Entwicklung und Umsetzung des Prototyps zusammengefasst. Es gliedert sich in drei Teilarbeitspakete, zu denen im Folgenden jeweils die wichtigsten Aspekte zusammengefasst wurden.

II.5.1 AP 7.2.1: Entwicklung teilintegriertes Hardwarekonzept

In diesem Teilarbeitspaket wurde in Absprache mit den Projektpartnern ein systemoptimiertes Aufbaukonzept für den Stromrichter entwickelt.

Ein wichtiger Punkt für das Hardwarekonzept war die Schnittstelle zwischen den Leistungsteil und der Steuerelektronik des Projektpartners STAMA. Hierbei war vorgesehen, die Steuerplatine mit der Leistungselektronik im Sinne eines kompakten Gesamtsystems zu vereinen und auf Seite des Leistungsteils eine Sammelplatine vorgesehen, die alle für die Steuerung relevanten Signale bündelt (siehe Abbildung 12). Dazu wurde in Zusammenarbeit mit STAMA die Signalschnittstelle definiert und ein Verbindungsstecker zwischen Sammelplatine und Steuerplatine ausgewählt. Auf diese Weise wurde die Hardware-Entwicklung auf beiden Seiten weitgehend entkoppelt.

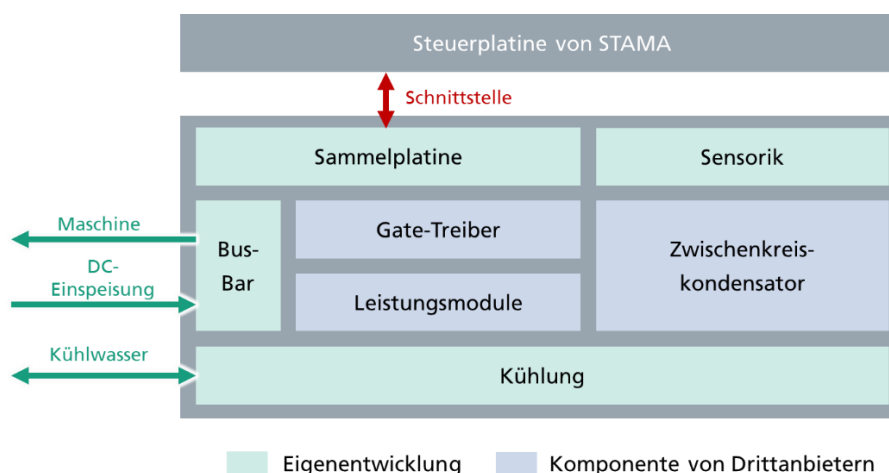


Abbildung 12: Schema des System-Aufbaus des Leistungsteils mit gebündelter Verbindung zur Steuerung über eine Sammelplatine

II.5.2 AP 7.2.2: Schaltungsentwicklung und thermisches Design Leistungsstufe

Die Einzelkomponenten des Leistungsteils sind in Abbildung 12 schematisch dargestellt. In diesem Teilpaket wurde die Hardware-Entwicklung und Auslegung dieser Systemkomponenten vorgenommen.

II.5.2.1 Auslegung des Zwischenkreis-Kondensators

Die Auslegung des Kondensators erfolgte anhand des Kondensatorstromes, der Auskunft über die thermische Belastung gibt, und des Ripples der Zwischenkreisspannung während des Betriebs.

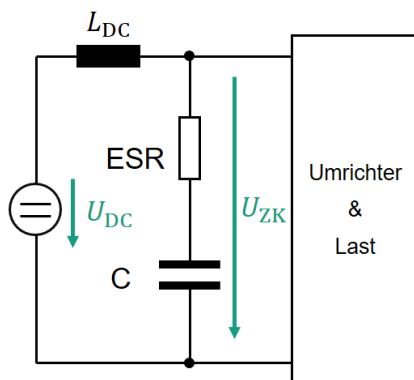


Abbildung 13: Schematischer Aufbau für die Kondensator-Simulation

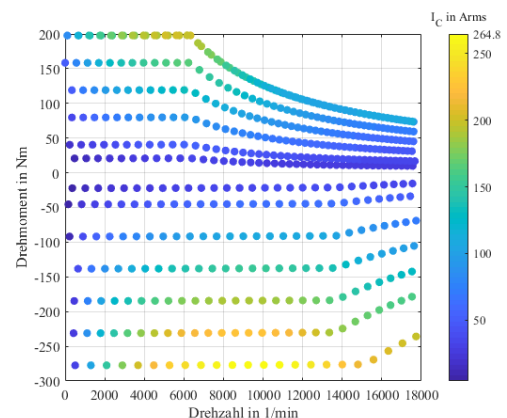


Abbildung 14: Betriebspunktraster des effektiven Kondensatorstromes in A

Für die Simulation wurde das Simulationsmodell der Topologiestudie auf der DC-Seite erweitert (siehe Abbildung 13). In der Abbildung 14 ist der resultierende Effektivwert des Kondensatorstromes über dem Betriebsbereich dargestellt. Das Ergebnis wurde analytisch plausibilisiert [3]. Für die Anforderung an den Kondensator wurde der Effektivwert des Kondensatorstromes über einen Fahrzyklus mit maximalen Antriebs-Drehmoment und anschließender Gefahrenbremsung ermittelt. Das Ergebnis war ein effektiver Kondensatorstrom von etwa 150 A.

Neben dem effektiven Kondensatorstrom ist der Spannungsripple ein Kriterium zur Auslegung des Kondensators. Dieser ist unter anderem abhängig von der Kapazität und der PWM-Frequenz der Modulation (siehe Abbildung 15). Als Kriterium wurde mit den Projektpartnern festgelegt, dass der Ripple weniger als 16 V betragen soll. Als Zielkapazität wurde 700 μF gewählt. Für diesen Wert ist das Kriterium bis zu einer PWM-Frequenz von 8 kHz erfüllt.

Weitere wichtige Kriterien sind die parasitäre Induktivität (ESL), die in die Kommutierungszelle eingeht, und das Volumen des Kondensators. Der Zwischenkreiskondensator wird in diesem Projekt durch fünf parallel geschaltete Becherkondensatoren mit jeweils 160 μF realisiert.

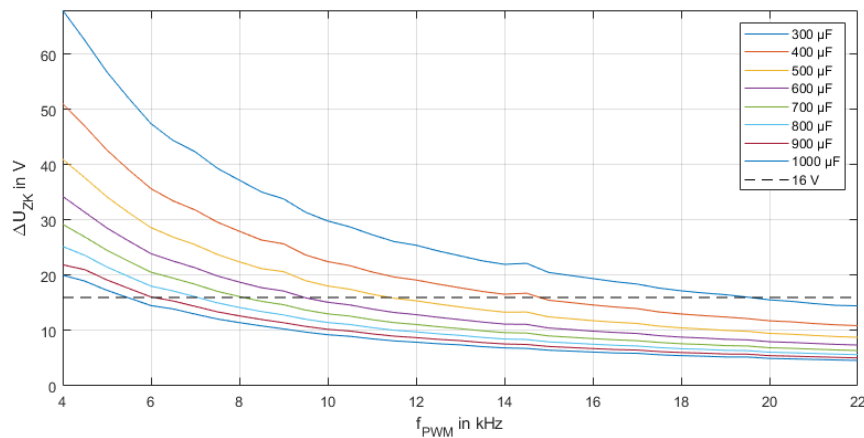


Abbildung 15: Resultierender Spannungsripple (ohne transiente Schaltspitzen) über der PWM-Frequenz für verschiedene Kapazitätswerte.

II.5.2.2 Mechatronische Entwicklung

Bei der mechatronischen Entwicklung stand ein kompakter Aufbau unter Einhaltung der Anforderungen eines Bahn-Stromrichters im Vordergrund.

Das Ergebnis der Konstruktion ist in Abbildung 16 dargestellt: Es ist eine Frontansicht dargestellt, auf der die drei Phasenanschlüsse zum Motor hin (gelbe Klemmblöcke) und die zwei Anschlüsse für den Bremswiderstand (blauer Klemmblock) zu sehen sind. Der Anschluss für die Wasserkühlung geht nach links weg. Hinten sind die fünf Zwischenkreiskondensatoren angeordnet und die Steuerung sitzt auf einem Rahmen über dem Leistungsteil. Die Abmessungen betragen 521 mm x 249 mm x 117 mm (Länge x Breite x Höhe), womit sich ein Volumen der Baugruppe von 15,2 L ergibt.

Für den Testbetrieb wurde der Rahmen für die Steuerung so konstruiert, dass er auch vertikal befestigt werden kann (siehe Abbildung 17). Auf diese Weise konnten im Systemtest auch Messungen im

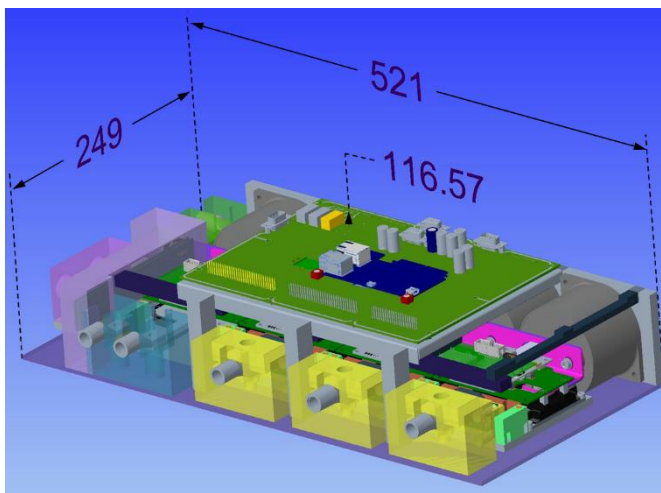


Abbildung 16: Frontansicht mit Bemaßung

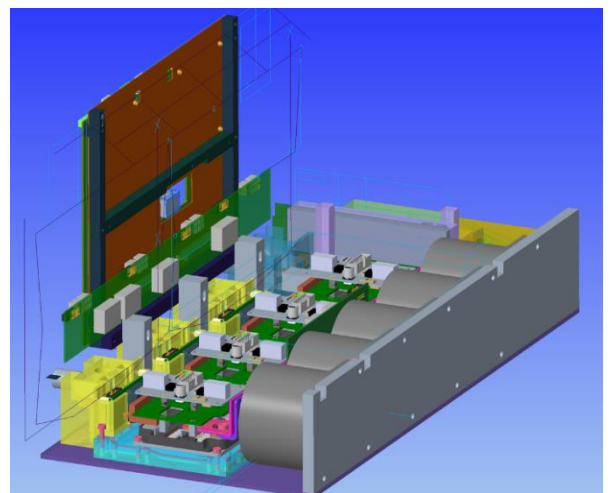


Abbildung 17: Konfiguration im Test-Modus

Leistungsteil vorgenommen werden. Die Steuerung und die Sammelplatine bilden dazu eine Bauteilgruppe.

Einen genaueren Blick auf die mechatronische Integration bietet Abbildung 18. Dort ist ein Schnitt des Aufbaus dargestellt. Von rechts beginnend sind die Zwischenkreiskondensatoren dargestellt. Diese sind über die DC-Busbar mit den Leistungsmodulen verbunden, die auf dem Wasserkühlkörper sitzen. Auf der Lastseite des Moduls führt die AC-Busbar durch den Stromsensor zum Anschlussblock für die Motorkabel. Jeweils zwei parallele Module werden über eine Adapterplatine noch oben mit dem Gate-Treiber verbunden. Über diesem wiederum ist die Sammelplatine (in der Abbildung als Intermediate-Platine bezeichnet) angebracht. Auf dieser werden alle Ansteuer- und Sensorsignale des Leistungsteils gebündelt und zur Steuerung übertragen. Die Steuerung befindet sich über den gezeichneten Komponenten und ist in der Abbildung nicht mit dargestellt.

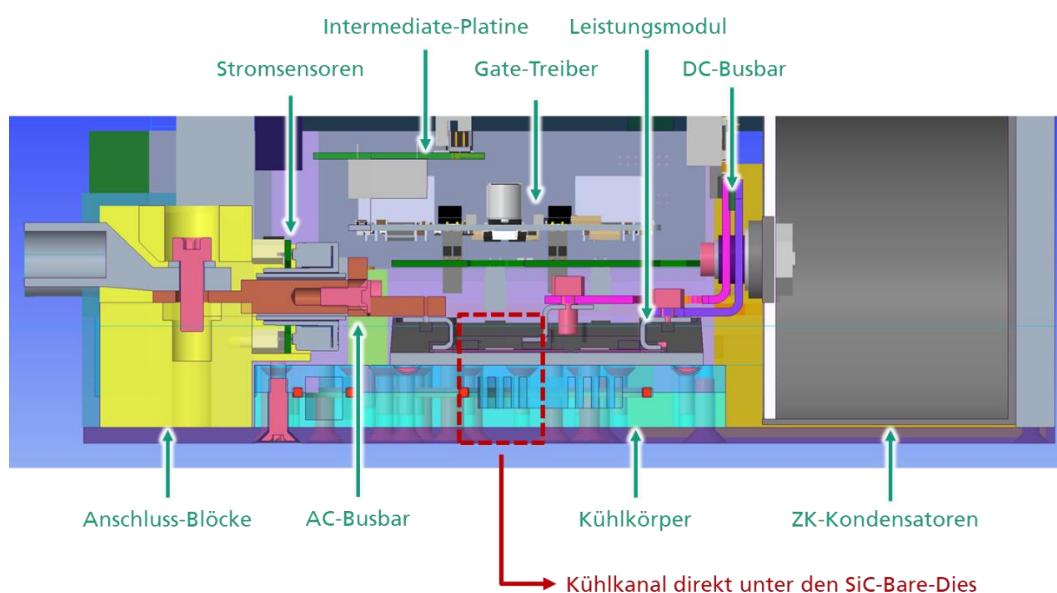


Abbildung 18: Schnitt einer Seitenansicht der Konstruktion

II.5.2.3 Thermisches Design

Ein wichtiger Bestandteil des Leistungsteils ist die Kühlung. Diese wurde in Form eines Wasserkühlkörpers realisiert. In diesem Abschnitt wird kurz das Vorgehen zur Auslegung und das Ergebnis des Kühlkörper-Designs vorgestellt.

Zur Auslegung des Kühlkörpers wurde ein geöffnetes Leistungsmodul vermessen und sein interner Aufbau in einer CAD-Umgebung modelliert. In Abschnitt II.3.4 wurden die Verluste des Systems in einer Simulation abgeschätzt. Diese Verluste wurden in einer Finite-Elemente-Simulation stationär in die Halbleiterchips des Leistungsmoduls eingepreist und Schaltertemperatur für verschiedene thermische Auslegungen bewertet.

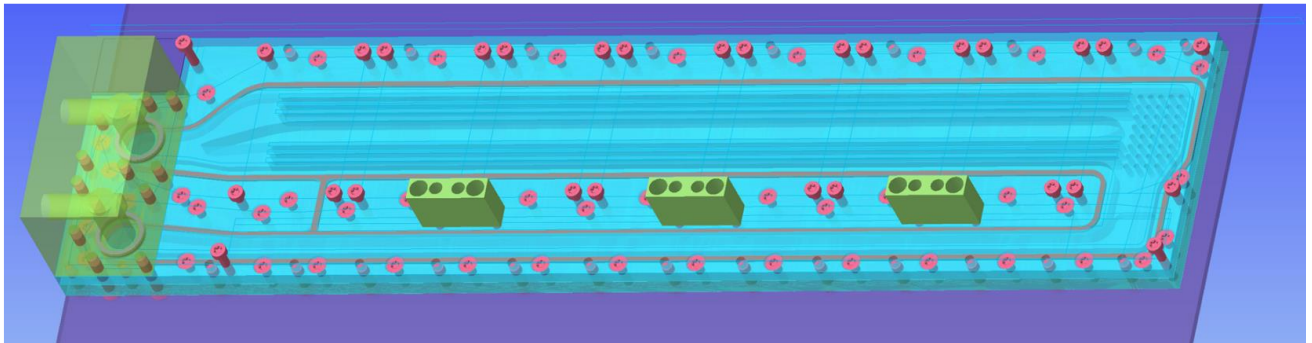


Abbildung 19: Prototyp des Wasserkühlkörpers

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Kühlkörper-Auslegung. Der Kühlkanal unter den Leistungsmodulen ist in zwei Teile geteilt, die letztlich der Position der Halbleiterchips im Leistungsmodul entsprechen, um eine optimale Kühlfunktion zu gewährleisten (vgl. Querschnitt in Abbildung 18).

Die Randbedingungen (Durchfluss, Druckabfall und Kühlmedium) für die Kühlkörperauslegung wurden mit den Projektpartnern abgesprochen.

II.5.2.4 Schaltungsentwicklung im Leistungsteil

In diesem Abschnitt wird die Schaltungsentwicklung rund um die Leistungsmodule beschrieben. Diese umfasste zum einen die Isolationskoordination, die Treiber und die Adapterplatine, mit der jeweils zwei parallelen Module mit einem Treiber verbunden werden.

Die Isolationskoordination wurde zusammen mit dem Projektpartner Alstom so abgesprochen, dass sie der Norm IEC 62497-1 entsprechen würde.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde der Treiber CGD12HBXMP von Wolfspeed verwendet. Dieser wurde speziell für das verwendete Leistungsmodul entwickelt. Zwei Leistungsmodule teilen sich einen Treiber. Dazu wurde eine Adapterplatine entwickelt (siehe Abbildung 20), die eine symmetrische und niederinduktive Führung der beiden Gate-Pfade realisiert und Möglichkeit zur Anpassung individueller Gate-Widerstände bietet.



Abbildung 20: Prototyp einer Adapterplatine für die Parallelschaltung zweier Leistungsmodule

II.5.2.5 Schaltungsentwicklung Sensorik

Zur Erfassung der drei Phasenströme und der Zwischenkreisspannung wurden kompakte Sensorschaltungen angestrebt. Das Interface zur Steuerelektronik sollte ein stromproportionales Signal sein.

Für die Stromsensoren der drei Phasenstrom wurde ein Open-Loop-Hall-Sensor verwendet, dessen Ausgangsspannung mittels einer sog. Howland-Pump in ein stromproportionales Ausgangssignal umgesetzt wurde. Für den Spannungssensor ist die Messung der Zwischenkreisspannung mittels Spannungsteiler und Isolationsverstärker vorgesehen. Das Interface zur Steuerelektronik ist wie bei der Strommessung stromproportional.

II.5.2.6 Schaltungsentwicklung Steuerung

Für die Vorqualifizierung des Stromrichters wurde dieser an einer passiven Last im motorischen Betrieb getestet werden (siehe Abschnitt II.5.3.4). Da die Steuerplattform der Projektpartner aufgrund der fehlenden Software-Lizenzen am Fraunhofer IISB nicht nutzbar war, wurde eine eigene Steuerplattform für die Vorqualifizierung entwickelt.

Die Steuer- und Regeleinheit war dabei ein Echtzeit-Rechner (eine bereits vorhandene Plecs RT-Box). Als Verbindungsstück zwischen der RT-Box und dem Stromrichter wurde eine Steuerplattform entwickelt (siehe Abbildung 21). Diese vereint die Signalverarbeitung, die Bereitstellung von Versorgungsspannungen und die Umsetzung eines Sicherheitskonzeptes. Sie bietet Platz für die Ansteuerung von neun Gate-Treibern und der Erfassung von zehn Sensorsignalen. Der Modulare Aufbau ermöglicht es, die Plattform über das Projekt hinaus für auch für komplexere leistungselektronische Schaltungen weiter zu verwenden.

Das System besteht aus den steckbaren Interfaces für Halbbrückentreiber (unten links) und für Sensoren (unten rechts). Für die Interaktion mit anderen Gate-Treibern oder Sensoren müssen nur die steckbaren Interfaces an die neue Hardware angepasst werden. Der Anschluss zur RT-Box ist hinten rechts in Form von D-Sub-Steckverbindern zu sehen. Darüber hinaus wird die minimale Verriegelungszeit und Pulssperre nach Fehlern durch eine ebenfalls steckbare Zusatzplatine (hinten links) gewährleistet. Die Verriegelungszeit kann dabei durch Bestückung oder Potentiometer angepasst werden.

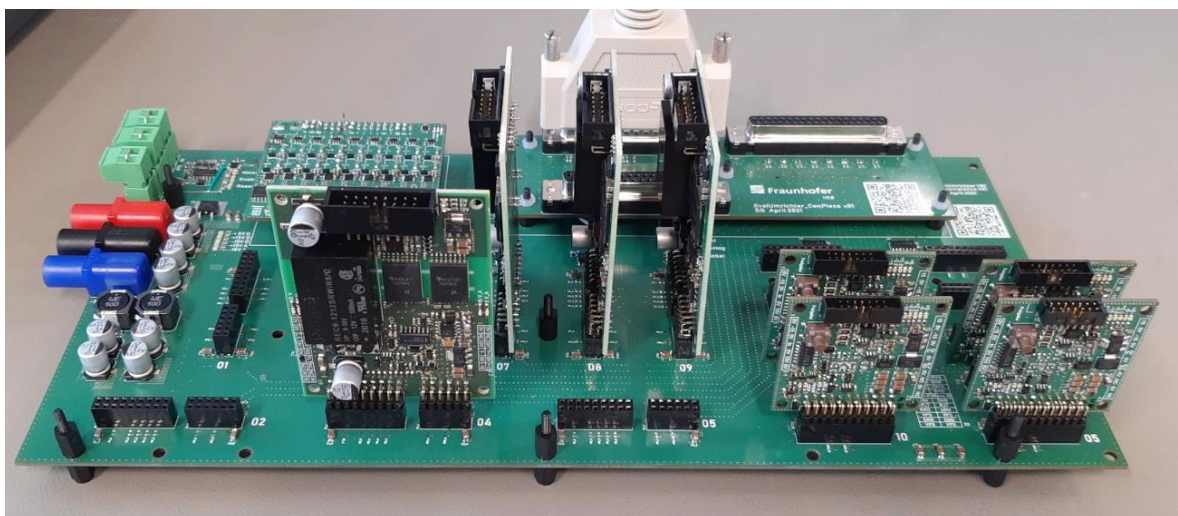


Abbildung 21: Ansteuerplattform für die Vorqualifizierung des Stromrichters

II.5.3 AP 7.2.3 Aufbau und Vorqualifizierung

In diesem Unterkapitel wird beschrieben, wie die in Abschnitt II.5.2 genannten Teilkomponenten aufgebaut und vorgetestet wurden.

II.5.3.1 Aufbau und Test der Sensorik

Die in Abschnitt II.5.2.5 beschriebene Strom- und Spannungsmessung wurde aufgebaut und vorgetestet. Der Prototyp für den Stromsensor ist in Abbildung 22 gezeigt. Abbildung 23 zeigt eine Messung mit diesem Prototypen und eine Referenzmessung mit einer Strommesszange. Die wenigen quantitativ erkennbaren Unterschiede zwischen dem Signal des Sensors und der Strommesszange waren für die Anwendung hinreichend gering.



Abbildung 22: Messung mit dem Prototypen eines Stromsensors

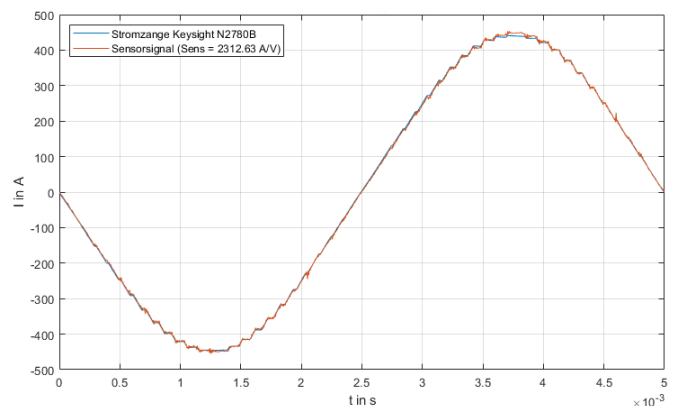


Abbildung 23: Vergleichende Messung mit Strommesszange

Die Schaltung zur Spannungsmessung ist in Abbildung 24 dargestellt. Sie besteht aus einem Spannungsteiler, einem Trennverstärker, einem isolierten DCDC-Wandler und der Signalaufbereitung auf der Niederspannungsseite. Der Sensor wurde statisch getestet.

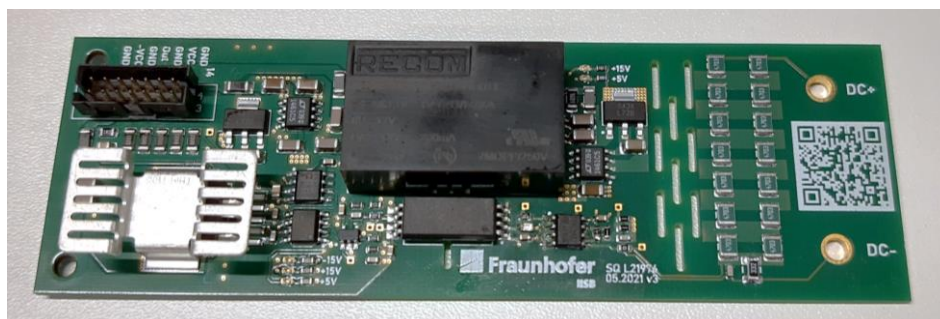


Abbildung 24: Sensorschaltung für die Spannungsmessung

II.5.3.2 Vortest der Leistungsmodule

Bei den Schalttest der Module in Form eines Doppelpulstests war die Erprobung mit drei Zielen im Fokus: Zum einen, wie sich der Strom bei einer Parallelschaltung von zwei Leistungsmodulen aufteilt und wie Symmetrie erreicht werden kann. Zum anderen sollte eine Aussage zu den Mindestpulszeiten und der minimalen Verriegelungszeit des Stromrichters ermöglicht werden. Als dritter Punkt sollte ermittelt werden, wie groß die Zwischenkreisspannung in einem Stromrichter mit 1200-V-Bauelementen angehoben werden darf, ohne in gefährliche Bereiche aufgrund der Abschaltüberspannung zu geraten.

Der Aufbau dafür ist in Abbildung 25 skizziert. Die Messung der Schalterspannungen ($U_{DS,M1/2}$) wurden bei geöffnetem Modul direkt an den Halbleiterchips im Modul vorgenommen. Auf diese Weise konnte der Einfluss der modulinternen Streuinduktivität ausgeklammert und festgestellt werden, welcher

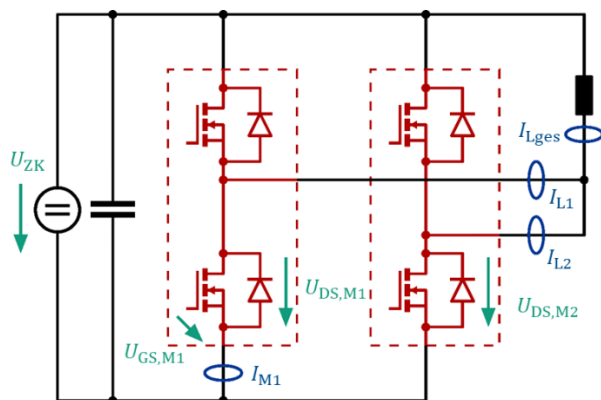


Abbildung 25: Schematischer Aufbau zum Doppelpuls der beiden parallelen Module

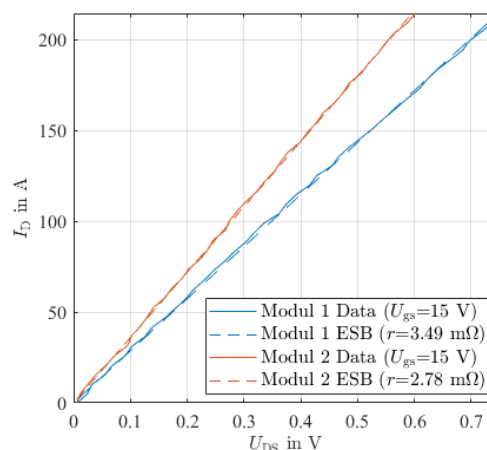


Abbildung 26: Vermessenes Ausgangskennlinien zweier Leistungsmodule im ersten Quadranten

Spannung ein Schalter im Modul inklusive der Abschaltüberspannung ausgesetzt ist. Die Messung des Modulstroms I_{M1} erfolgt über eine Rogowski-Spule. Die anderen Ströme wurden wegen der geringeren Bandbreitenanforderung mit Strommesszangen vermessen.

Bei Messungen mit mehreren Pulsen hintereinander wurde festgestellt, dass die Modulströme stationär um bis zu 10 % abweichen. Die Vermessung des Ausgangskennlinienfeldes (siehe Abbildung 26) hat ergeben, dass der Einschaltwiderstand der Module abweicht. Beide Werte befinden sich innerhalb der Spezifikation; für den Aufbau des Stromrichters -Prototypen wurden jedoch alle Module vermessen und paarweise möglichst passend ausgewählt.

Mit Hilfe der Messungen konnten auch die Ein- und Ausschaltzeiten der Halbbrücken für viele Arbeitspunkte aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Mindestpulsdauer und minimale Verriegelungszeit wurde daraufhin zusammen mit den Projektpartnern festgelegt.

Zuletzt wurde untersucht, wie hoch die Zwischenkreisspannung gewählt werden kann, um bei einem schnellen Schaltvorgang noch unterhalb der Durchbruchspannung der Leistungshalbleiter zu bleiben. Ein Arbeitspunkt Punkt der Messungen ist in Tabelle 5 angegeben. Es konnten bei einer Zwischenkreisspannung von 1000 V Gesamtströme von 740 A sicher geschaltet werden, ohne die Durchbruchspannung zu erreichen. Der maximale Strom in den späteren Systemtests beträgt 665 A.

Tabelle 5: Ergebnisse zu den Doppelpulsmessreihen bezüglich der Abschaltüberspannung

Messgröße		Wert
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung	1000 V
$I_{L,max}$	Maximaler Spulenstrom	740 A
$\hat{I}_{Phase,max}$	Maximaler Betriebsstrom	665 A
$U_{DS,max}$	Maximale Schalterspannung	1180 V
dU_{DS}/dt	Spannungssteilheit	~ 25 V/ns

II.5.3.3 Aufbau des Stromrichters

Nachdem alle Teilkomponenten des Stromrichters aufgebaut und vorgetestet wurden, wurde der Stromrichter aufgebaut. Das Ergebnis ist in Abbildung 29 zu sehen und soll kurz beschrieben werden.

Dazu ist in Abbildung 27 der Innenaufbau des MTAB-Stromrichters dargestellt. Zentraler Bestandteil sind die acht Halbbrücken-Module, die zu vier Phasen verschaltet sind (links die Bremssteller-Phase und rechts die drei Motor-Phasen). Die abstandskritischen Kupferschienen (DC-Busbar und AC-Abgänge) wurden mit einem Kunststoff zur Isolation überzogen. Für die Halterungen und Anschlussblöcke wurden die weißen Halterungen im 3D-Druck-Verfahren hergestellt. In den Taschen der Anschlussblöcke für die Motor-Phasen sind die entsprechenden Phasenstrom-Sensoren verbaut. Der Kühlkörper ist unter den Modulen auf der Basisplatte angebracht und hat seinen Anschlussblock unter der Halterung für die Spannungsmessung links mittig. Links oben sind die Anschlüsse für die DC-Spannung und rechts daneben sind die Kondensatoren aufgereiht. Links unten ist der EMV-Kondensator angebracht.

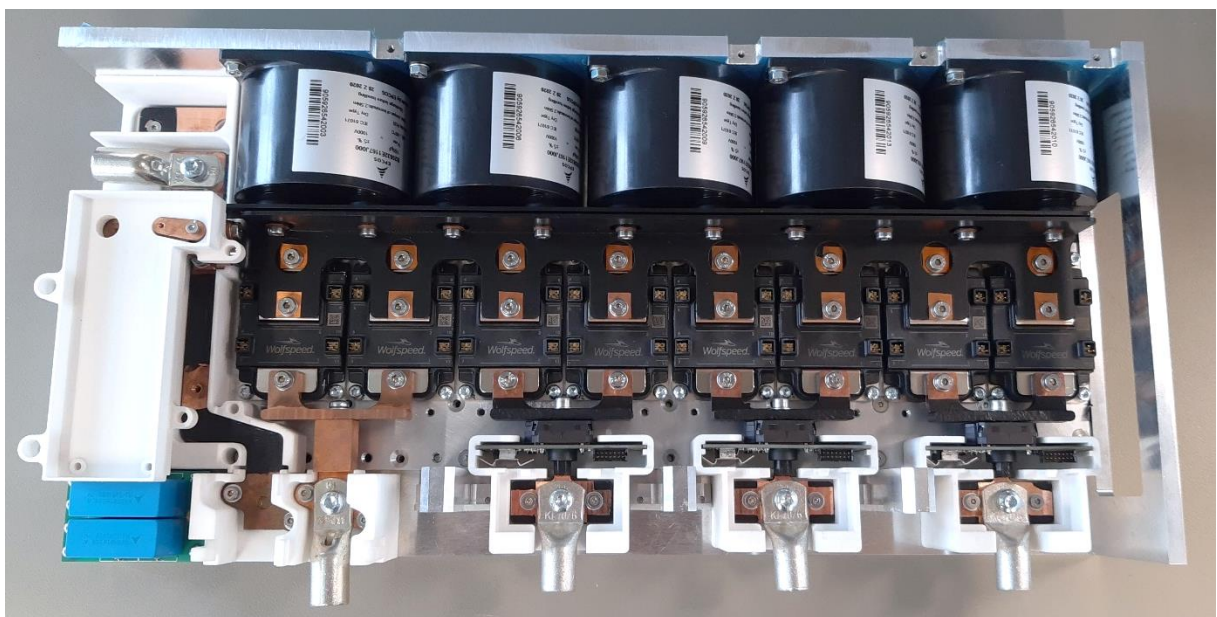


Abbildung 27: Innenansicht des umgesetzten MTAB-Stromrichters

In Abbildung 28 ist der fertige MTAB-Stromrichter im Test-Modus dargestellt. Auf den Modulen ist der Gate-Adapter-Stack aufgesteckt und dieser jeweils mit einem Flachbandkabel auf die Zwischenplatine zur Steuerung verbunden. Der Stapel-Aufbau der Bremssteller-Phase wurde zur Illustration abgebaut. Die Zwischenplatine ist von unten auf den Rahmen der Steuerelektronik geschraubt. Auf der anderen Seite wird die Steuer-Elektronik vom Projektpartner STAMA angebracht werden. Der Rahmen kann (wie in Abbildung 28 dargestellt) senkrecht angebracht werden. Dies erlaubt im Testbetrieb den Zugriff auf die Steuersignale und Module.

Wird der Rahmen horizontal angebracht (siehe Abbildung 29), ergibt sich ein kompakter Aufbau bei gleicher Funktionalität. Die Maße des Stromrichters inklusive Steuerungshardware betragen 521 mm x 249 mm x 117 mm (Länge x Breite x Höhe). Der fertige Umrichter wiegt 13,75 kg.



Abbildung 28: Ansicht des aufgebauten MTAB-Stromrichters im Test-Modus

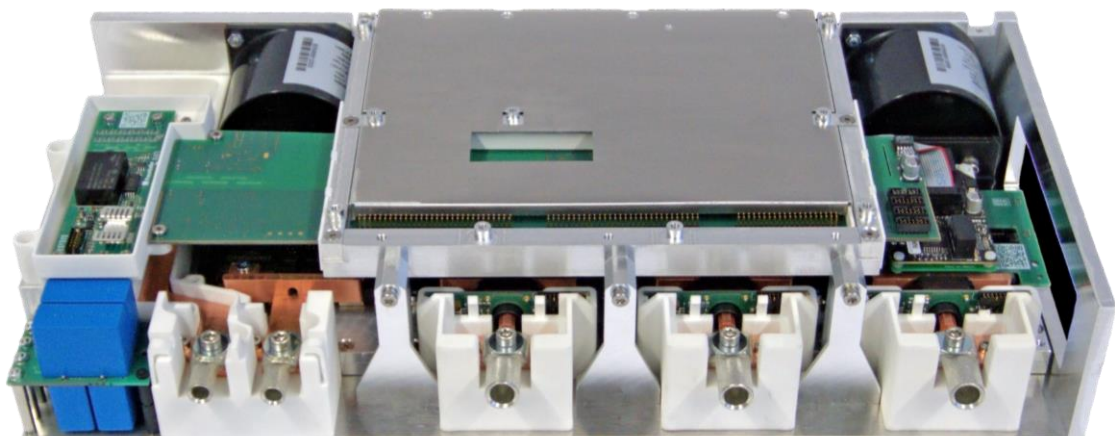


Abbildung 29: Ansicht des aufgebauten MTAB-Stromrichters im geschlossenen Modus

II.5.3.4 Inbetriebnahme des Stromrichters

Nachdem alle Einzelkomponenten vorgetestet und der Gesamtumrichter aufgebaut worden war, wurde der Stromrichter für den Systemtest vorqualifiziert und anschließend bei Alstom im Labor für den Systemtest in Betrieb genommen.

Dazu wurde der Stromrichter ausgangsseitig mit einer induktiven Last verbunden und auf der Zwischenkreisseite durch eine Spannungsquelle gespeist. Diese Testumgebung emuliert den Anwendungsfall hinreichend genau, um wesentliche Betriebspunkte vor der Integration in das Gesamtsystem mit den Projektpartnern testen zu können. Der Aufbau für die Inbetriebnahme ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Messung der Spannung und Ströme durch den Umrichter wurden mit den externen Messungen durch Differenzastkopf und Strommesszange abgeglichen. Die Bedienung der Messmittel erfolgte potentialgetrennt. Der Stromrichter wurde bei Zwischenkreisspannungen bis 800 V und Phasenströmen bis 315 A ohne Auffälligkeiten betrieben (siehe Abbildung 31). Während der Einprägung verschiedener Arbeitspunkte wurden die Sensorwerte mit den externen Messungen abgeglichen und die Sensoren so justiert.

Für den Test der Temperaturerfassung wurde die Vorlauftemperatur der Kühlung durch ein Temperiergerät vorgegeben und die erfassten Daten ausgewertet. Für den Funktionstest der Bremsstellerphase wurde die Phase T umgeklemmt und die Ansteuerung entsprechend angepasst, so dass weiterhin mit einer dreiphasigen Last gearbeitet werden konnte.

Damit wurde der Stromrichter-Prototyp erfolgreich vorgetestet und für die Inbetriebnahme in Mannheim freigegeben.

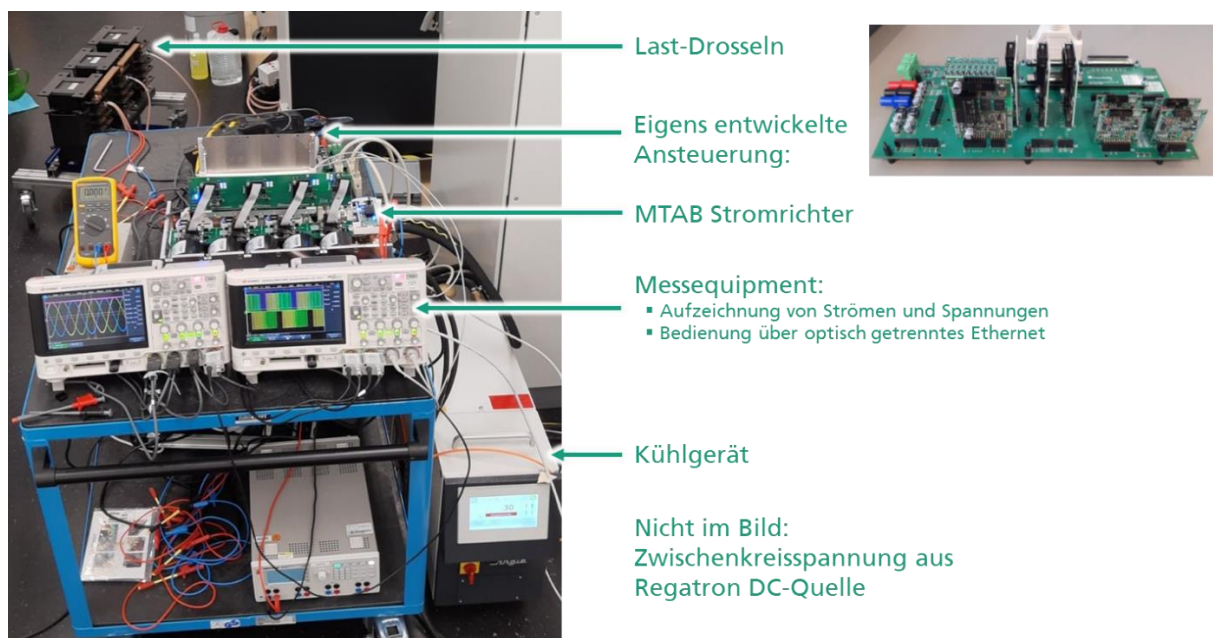


Abbildung 30: Setup für die Inbetriebnahme des Stromrichters am Fraunhofer IISB in Erlangen

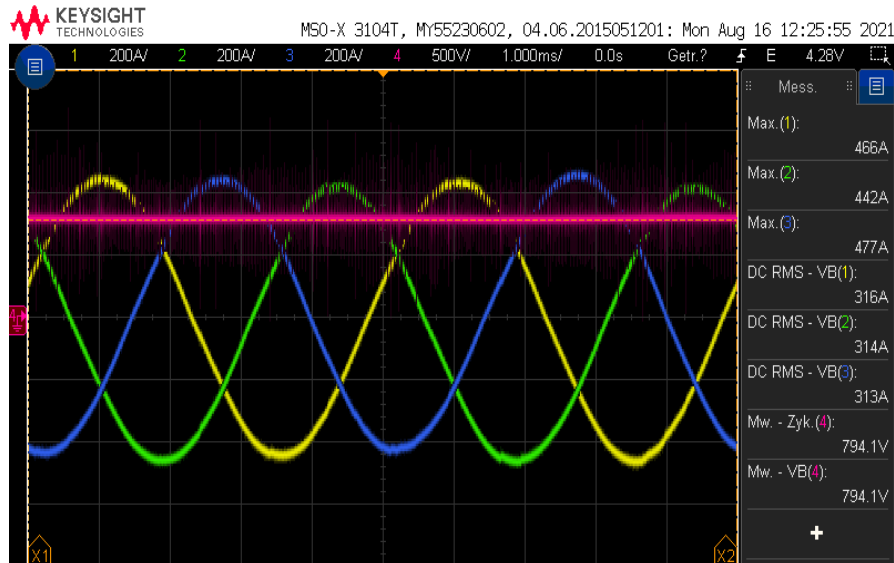


Abbildung 31: Messergebnisse der Phasenströme und Zwischenkreisspannung

II.6 AP 8: Systemtest

Die AP 8.1 und 8.5 sahen die Unterstützung bei der Planung und der Durchführung des Systemtests beim Projektpartner Alstom vor. Das Fraunhofer IISB war bei der Planung unterstützend tätig und war zur Inbetriebnahme des Stromrichters vor Ort.

Nach der Vorqualifikation des Stromrichter-Prototypen (siehe Abschnitt II.5.3.4) wurde für die Einbringung ins Gesamtsystem zunächst das Steuerboard des Projektpartners STAMA in den Stromrichter integriert (siehe Abbildung 32). Die Zusammenführung wurde durch die Abstimmung der Schnittstelle und die entkoppelnde Intermediate-Platine begünstigt. Nach dem Zusammenbau wurde die Funktion zunächst ohne Laststrom erfolgreich nachgewiesen und die korrekte Überführung aller Signale getestet (siehe Abbildung 33).

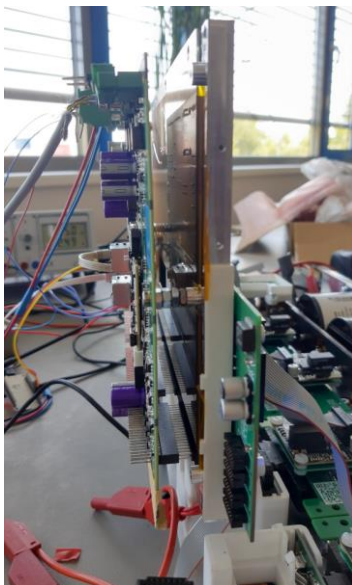


Abbildung 32: Anbringung des Controllerboards

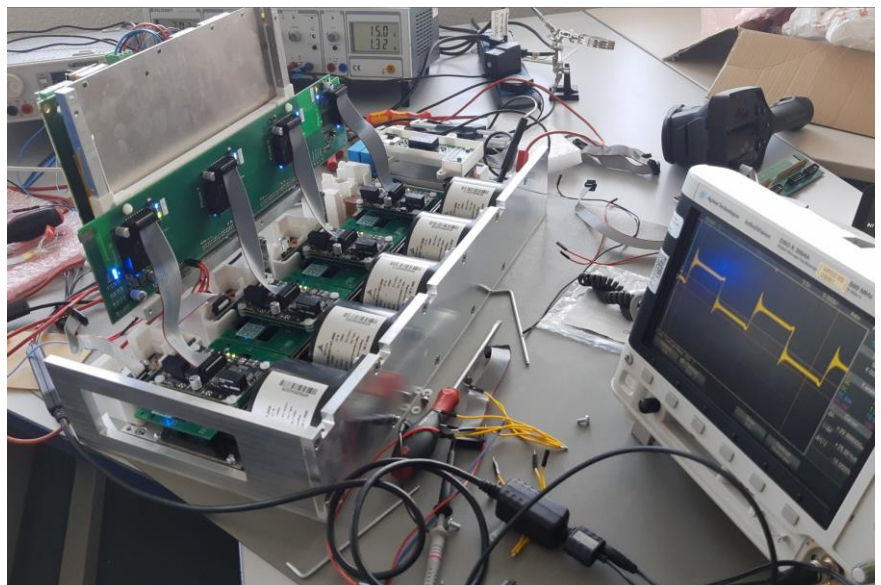


Abbildung 33: Inbetriebnahme mit dem Controller-Board vom des Projektpartners STAMA

Nach der Zusammenführung von Steuerung und Leistungsteil wurde das Tandem beim Projektpartner Alstom ähnlich wie bereits in Erlangen an einer induktiven Last unter Betriebsbedingungen vorgetestet. Der Aufbau dazu ist in Abbildung 34 dargestellt. Hierbei wurden Betriebspunkte bis in den Nennbereich (800 V Zwischenkreisspannung und 350 A Phasenstrom) angefahren. Auch hier wurden die Messungen der Temperaturen, Ströme und Spannung kontrolliert. Die Funktion der Kühlung konnte hiermit entsprechend des Projektplans auch im Nennbereich nachgewiesen werden. Abschließend wurde die Entladefunktion der Bremsstellerphase mit positivem Ergebnis auf Funktion überprüft.

Im Rahmen der Qualifikation wurde darüber hinaus ein Isolationstest mit 2,8 kV AC erfolgreich durchgeführt.

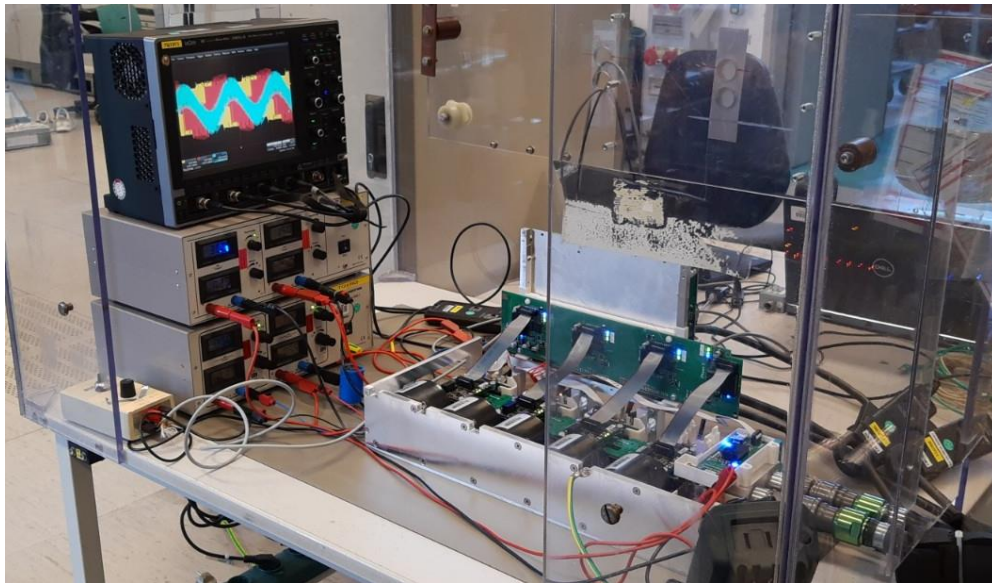


Abbildung 34: Betrieb des Stromrichters an einer induktiven Last bei Alstom in Mannheim

Das AP 8.5 sah die Unterstützung bei der Durchführung des Systemtests beim Projektpartner Alstom vor. Das Fraunhofer IISB hat nach der Inbetriebnahme den Systemtest weiterhin unterstützt.

Ein Beispiel ist in Abbildung 36 dargestellt. Im Rahmen der Durchführung des Systemtests war ein niedrigerer Ripple der Zwischenkreisspannung erstrebenswert. Dies kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Schaltfrequenz des Bremsstellers erreicht werden. Daher wurden die Verluste des Bremsstellers in Abhängigkeit der Schaltfrequenz neu bewertet und in Abstimmung mit den Projektpartnern thermisch verträgliche Betriebspunkte abgestimmt.

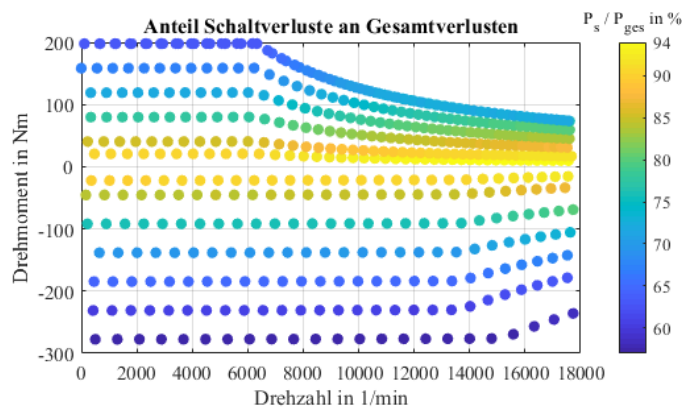


Abbildung 35: Anteil der Schaltverluste an den Gesamtverlusten bei einer Taktfrequenz von 20 kHz für den Wechselrichter

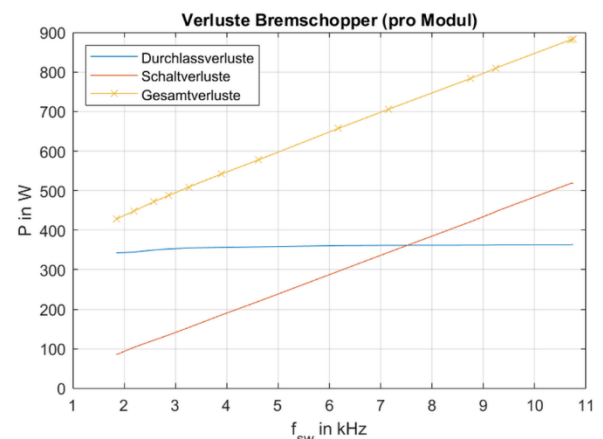


Abbildung 36: Maximale Verluste in der Bremssteller-Phase während der Gefahrenbremse

II.7 AP 10: Abgleich der Ergebnisse und Abschluss

Abschließend wurden die Ergebnisse des Systemtest ausgewertet und analysiert. Dies geschah maßgeblich durch die Auswertung des Projektpartners KIT (siehe Abschlussbericht KIT).

In Bezug auf den Stromrichter kann verzeichnet werden, dass der gemessene Wirkungsgrad über weite Teile des Betriebsbereichs größer als 99 % beträgt und im Mittel 99,4 %. Im Vergleich zur Simulation (siehe Abschnitt II.3.5) ergibt sich im Median eine Abweichung von nur 1 %, wobei die Wirkungsgrade der Simulation aufgrund der höheren angenommenen Temperatur geringer als die Messwerte prognostiziert wurden.

Damit wurde eine Wirkungsgradverbesserung gegenüber dem Referenzsystem um 3 % erreicht. Bezüglich der Masse-Ziele des Stromrichters konnte das Projektziel von 17 kg mit der Stromrichtermasse von 13,75 kg um 3,25 kg unterboten werden. Verglichen mit dem Referenzsystem wiegt der MTAB-Stromrichter nur knapp über 40 %

Bezüglich der Stromrichtermasse und des Wirkungsgrades sind weitere Optimierungen möglich: Die Stützelemente des MTAB-Stromrichters sind als Vollmaterial ausgeführt, das weitere Möglichkeit zur Reduzierung bietet. Abbildung 35 verdeutlicht weiteres Potential in Bezug auf die Stromrichterverluste: Der Anteil der Schaltverluste dominiert gegenüber den Durchlassverlusten. Dies indiziert, dass durch eine Reduzierung der Schaltfrequenz oder optimierte Pulsverfahren weitere Verluste eingespart werden können. Aus der Abbildung geht zudem hervor, dass insbesondere bei im Bereich niedriger Drehmomente mit dem hohen Anteil an Schaltverlusten hohes Optimierungspotential für optimierte Pulsverfahren besteht, da diese Betriebspunkte je nach Fahrspiel einen signifikanten Anteil der Verlustenergie des Zyklus annehmen (Berichte des Projektpartners KIT).

II.8 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Personalkosten	450.298,66 €
Reisekosten	2.500,00 €
Sachkosten	47.500,00
Gesamtkosten	500.298,66 €
davon Fördersumme	425.253,86 €
davon Eigenmittel	75.044,80 €
Förderquote	85 %

II.9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig, um die in der Vorhabensbeschreibung beschriebenen Aufgaben lösen zu können. Der Umfang der Arbeiten wurde dabei jeweils so bemessen, dass die für die nachfolgenden Arbeitsschritte erforderlichen Spezifikationen und Implementierungen im notwendigen Umfang durchzuführen. Dabei wurde auf Arbeiten, die nicht zum Erkenntnisgewinn oder zum Projektfortschritt beitrugen, verzichtet, so dass insgesamt ein angemessener Umfang der Arbeiten und der in der Vorhabensbeschreibung beschriebene Zeitrahmen eingehalten wurden.

II.10 Voraussichtlicher Nutzen

Neben dem im Projekt erzielten Erkenntnis- und Erfahrungsgewinn hinsichtlich der Entwicklung eines Stromrichters unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen eines Schienenfahrzeugs erzeugte das Vorhaben MTAB zusätzlich verwertbaren Nutzen:

Halbleiter-Charakterisierung:

Die erfolgreiche direkte Messung der Chip-Spannung (Kapitel II.5.3.2) war Anstoß, dieses Verfahren in bestehende Messplätze zu übernehmen und künftig aus der wissenschaftlichen Perspektive genauere Messungen zu ermöglichen und aus wirtschaftlicher Perspektive attraktiver für Anfragen in diesem Bereich zu sein.

Topologie-Simulation und Rapid Control Prototyping:

Die Toolchain für die Inbetriebnahme des Stromrichter-Prototypen (Kapitel II.3) wurde erweitert, so dass nun im bidirektionalen Betrieb einer aktiven Last gemessen werden kann. Das erweitert das Betriebsfeld des Stromrichters, so dass Prototypen nun im gesamten Betriebsbereich charakterisiert werden können. Wie beschrieben kann hierfür das Modell aus der Simulation direkt übernommen werden, so dass künftig für die Entwicklung des Stromrichters eine Plattform verwendet werden kann.

Know-How und Wissenstransfer

Das Vorhaben bot studentischen und wissenschaftlichen Nachwuchskräften die Möglichkeit, Erfahrungen im Bereich der Entwicklung elektrischer Antriebe zu sammeln. Insbesondere wird hierbei auf die enge Einbindung studentischer Hilfskräfte und Praktikanten hingewiesen. Im Rahmen des Vorhabens entstanden zudem zwei Bachelorarbeiten, eine Masterarbeit und eine Seminararbeit mit insgesamt zwei Prämierungen mit Preisen. Weiterhin beförderte das Vorhaben den internen, abteilungsübergreifenden Wissensaustausch hinsichtlich der simulationsgestützten Auslegung von Stromrichtern.

II.11 Fortschritt bei anderen Stellen

Uns wurden während der Durchführung des Vorhabens keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

II.12 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Die in MTAB erzielten Forschungsergebnisse wurden in Beiträgen auf Messen, Konferenzen und Kolloquien einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht:

27.02.2019	Fachvortrag zum Thema „State of the Art Packaging“ auf dem Wide Bandgap User Training
24.03.2022	Präsentation des Stromrichters auf dem Messestand des Fraunhofer IISB auf der Schienentechnik Fachmesse C.NA ForumBahntechnik 2022
10.-12.05.2022	Präsentation des Stromrichters auf dem Messestand des Fraunhofer IISB auf der Leistungselektronik-Fachmesse PCIM 2022
04.-07.08.2022	Vorstellung der Projektergebnisse auf den 22. Jungforscher Kongress 2022
20.-21.09.2022	Fachvortrag zum Thema „ Design and Practical Evaluation of High Efficiency Three-Phase-Inverters up to 500 kW“ auf der PLECS Conference in Zürich

Zusätzlich konnten mit den studentischen Abschlussarbeiten folgende Preise gewonnen werden:

- Eva Nistler den VDI Bayern Award 2022 mit ihrer Bachelorarbeit
- Thomas Lehmeier den EnCN Energiepreis 2022 mit seiner Masterarbeit

Verzeichnisse

II.13 Literaturverzeichnis

- [1] M. Kegeleers, J. Koerner, S. Matlok, M. Hofmann and M. Maerz, "Parasitic Inductance Analysis of a Fast Switching 100 kW Full SiC Inverter," *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 1-7.
- [2] T. Menrath, A. Roskopf, F. B. Simon, M. Groccia and S. Schuster, "Shape Optimization of a Pin Fin Heat Sink," 2020 36th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), San Jose, CA, USA, 2020, pp. 10-16, doi: 10.23919/SEMI-THERM50369.2020.9142830.
- [3] J. W. Kolar, T. M. Wolbank and M. Schrodli, "Analytical calculation of the RMS current stress on the DC link capacitor of voltage DC link PWM converter systems," 1999. *Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 468)*, Canterbury, UK, 1999, pp. 81-89, doi: 10.1049/cp:19990995.

II.14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeits- und Zeitplanung des Vorhabens MTAB mit Meilensteinen und Quartalstreffen.	6
Abbildung 2: Stromrichter-Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Maschinenbetriebspunkts für die Parallelschaltung zweier SiC-Halbbrücken-Module	9
Abbildung 3: Schema zur Bestimmung der Topologie und Halbleiter-Technologie	11
Abbildung 4: Modellierung des Stromrichters	11
Abbildung 5: Betriebspunktraster der mechanischen Antriebsleistung in kW	11
Abbildung 6: Betriebspunktraster des Phasenstromes in A	11
Abbildung 7: Stationäre Temperaturhübe für die Parallelschaltung eines 1700V-SiC-Moduls	12
Abbildung 8: Stationäre Temperaturhübe für die Parallelschaltung eines 1200V-SiC-Moduls	12
Abbildung 9: Verlauf der Sperrschicht-Temperatur der Parallelschaltung zweier SiC-Module bei dynamischer thermischer Modellierung und Gefahrenbremsung	13
Abbildung 10: Schema zur Bremssteller-Phase	13
Abbildung 11: Zeitverlauf der Zwischenkreis-spannung während der Gefahrenbremse	13
Abbildung 12: Schema des System-Aufbaus des Leistungsteils mit gebündelter Verbindung zur Steuerung über eine Sammelplatine	16
Abbildung 13: Schematischer Aufbau für die Kondensator-Simulation	17
Abbildung 14: Betriebspunktraster des effektiven Kondensatorstromes in A	17
Abbildung 15: Resultierender Spannungsripple (ohne transiente Schaltspitzen) über der PWM-Frequenz für verschiedene Kapazitätswerte	18
Abbildung 16: Frontansicht mit Bemaßung	18
Abbildung 17: Konfiguration im Test-Modus	18

Abbildung 18: Schnitt einer Seitenansicht der Konstruktion.....	19
Abbildung 19: Prototyp des Wasserkühlkörpers	20
Abbildung 20: Prototyp einer Adapterplatine für die Parallelschaltung zweier Leistungsmodule	20
Abbildung 21: Ansteuerplattform für die Vorqualifizierung des Stromrichters.....	21
Abbildung 22: Messung mit dem Prototypen eines Stromsensors	22
Abbildung 23: Vergleichende Messung mit Strommesszange	22
Abbildung 24: Sensorschaltung für die Spannungsmessung	22
Abbildung 25: Schematischer Aufbau zum Doppelpuls der beiden parallelen Module	23
Abbildung 26: Vermessenes Ausgangskennlinien zweier Leistungsmodule im ersten Quadranten ..	23
Abbildung 27: Innenansicht des Umgesetzten MTAB-Stromrichters.....	24
Abbildung 28: Ansicht des aufgebauten MTAB-Stromrichters im Test-Modus	25
Abbildung 29: Ansicht des aufgebauten MTAB-Stromrichters im geschlossenen Modus.....	25
Abbildung 30: Setup für die Inbetriebnahme des Stromrichters am Fraunhofer IISB in Erlangen	26
Abbildung 31: Messergebnisse der Phasenströme und Zwischenkreisspannung	27
Abbildung 32: Anbringung des Controllerboards	27
Abbildung 33: Inbetriebnahme mit dem Controller-Board vom des Projektpartners STAMA	27
Abbildung 34: Betrieb des Stromrichters an einer induktiven Last bei Alstom in Mannheim.....	28
Abbildung 35: Anteil der Schaltverluste an den Gesamtverlusten bei einer Taktfrequenz von 20 kHz für den Wechselrichter	29
Abbildung 36: Maximale Verluste in der Bremssteller-Phase während der Gefahrenbremse.....	29

II.15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen des Referenzsystems	8
Tabelle 2: Übersicht der Schaltzeiten aus Datenblattangaben.....	14
Tabelle 3: Qualitative Bewertung der untersuchten Topologievarianten	15
Tabelle 4: Spezifikation für den MTAB-Umrichter	15
Tabelle 5: Ergebnisse zu den Doppelpulsmessreihen bezüglich der Abschaltüberspannung	24

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN N.a.	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht		
3. Titel MTAB: Schlussbericht Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Quergfelder, Simon Heckel, Thomas		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2022	
		6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2023	
		7. Form der Publikation --	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) Schottkystraße 10 91058 Erlangen		9. Ber. Nr. Durchführende Institution N.a.	
		10. Förderkennzeichen 19I18015C	
		11. Seitenzahl 33	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin		13. Literaturangaben 3	
		14. Tabellen 5	
		15. Abbildungen 36	
16. Zusätzliche Angaben --			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) --			
18. Kurzfassung <p>Der Antrieb eines Schienenfahrzeuges definiert einen Großteil des Energieverbrauches und trägt einen signifikanten Anteil der Gesamtmasse dar. Zur Realisierung von niedrigen Lebenszykluskosten, und Steigerung der Energieeffizienz spielt die Gewichtsreduktion im Antriebsstrang eine Schlüsselrolle. Im Rahmen des Verbundprojekts MTAB wurde ein neuartiger Antriebsstrang zur Reduktion des Gewichts bei gleichzeitiger Steigerung des Gesamtwirkungsgrads entwickelt, aufgebaut und vermessen. Der Lösungsansatz hierfür war ein Motor mit hoher Drehzahl und ein Stromrichter mit hoher Schaltfrequenz.</p> <p>Das Fraunhofer hat in diesem Projekt den Stromrichter entwickelt, der die Anforderungen der Bahnanwendung erfüllt und dabei die Gewichts- und Wirkungsgradziele erreicht. Das Ergebnis ist ein Stromrichter, der im Mittel über alle Betriebspunkte einen mittleren Wirkungsgrad über 99 % aufweist und im Vergleich zum Stromrichter des Referenzsystems 40 % des Gewichts einspart.</p> <p>Das Vorhaben zeigte, dass eine Miniaturisierung des Antriebsstrangs auch bei Bahnanwendungen zielführend und zukunftsweisen ist.</p>			
19. Schlagwörter Leistungselektronik, Stromrichter, Straßenbahn, Antriebsstrang			
20. Verlag N.a.		21. Preis N.a.	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report		
3. title MTAB: Final report of Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)			
4. author(s) (family name, first name(s)) Quergfelder, Simon Heckel, Thomas		5. end of project 30.09.2022	
		6. publication date 31.03.2023	
		7. form of publication --	
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) Schottkystraße 10 91058 Erlangen		9. originator's report no.	
		10. reference no. 19I18015C	
		11. no. of pages 33	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin		13. no. of references 3	
		14. no. of tables 5	
		15. no. of figures 36	
16. supplementary notes --			
17. presented at (title, place, date) --			
18. abstract The drive system of a rail vehicle defines a large portion of the energy consumption and represents a significant share of the total mass. To achieve low life cycle costs and increase energy efficiency, weight reduction in the powertrain plays a key role. Within the MTAB research project, a novel drive train was developed, built and measured to reduce weight while simultaneously increasing overall efficiency. The approach for this was a high-speed motor and an inverter with a high switching frequency. Fraunhofer developed the inverter in this project, which meets the requirements of railway applications and achieves weight and efficiency goals. The result is an inverter that has an average efficiency of over 99% across all operating points and saves 40% of the weight compared to the inverter of the reference system. The project demonstrated that downsizing of the powertrain is effective and forward-looking in railway applications.			
19. keywords power electronics, railway, inverter, powertrain, drive train			
20. publisher		21. price	