

1 Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist das Aufzeigen mehrerer innovativer Ansätze zur Optimierung von leistungselektronischen Wandlern im Hinblick auf ihre jeweilige Leistungsdichte und Effizienz. Als primärer Anwendungsbereich werden dabei Wandler für elektrische Straßenfahrzeuge betrachtet, die dargestellten Technologien sind jedoch nicht auf diese Anwendungen beschränkt.

Vorrangig wird der Einsatz von Leistungshalbleiterbauelementen auf Basis von Siliziumkarbid untersucht. Dabei wird der Einfluss der Halbleiterbauelemente auf die Auslegung und Leistungsfähigkeit leistungselektronischer Wandler theoretisch und praktisch analysiert. Darüber hinaus werden mehrere innovative Technologien entwickelt, erprobt und bewertet, die den Einsatz moderner Leistungshalbleiter optimal unterstützen oder selbst unmittelbar Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der betrachteten elektronischen Systeme nehmen.

1.1 Ziele und Forschungsfragen

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den anwendungsbezogenen Auswirkungen des Einsatzes von Siliziumkarbidleistungshalbleitern und mehreren zu entwickelnden Begleittechnologien. Dabei stehen die technologischen Ansätze zur Steigerung der Performance sowie die praxisnahe Erprobung und Analyse ihrer Wirksamkeit im Vordergrund. Hierdurch sollen fundierte Aussagen über die Eignung der ausgewählten Optimierungsansätze für unterschiedliche Aufgaben innerhalb des Anwendungsfeldes der Elektromobilität generiert werden.

Da die herausragenden Eigenschaften der Halbleiter selbst bereits vielfach untersucht und dokumentiert sind, werden hier insbesondere praktische Auslegungsaspekte sowie mehrere begleitende Hardwaretechnologien und methodische Optimierungsansätze untersucht und bewertet. Dabei wird stets auch deren Zusammenspiel betrachtet sowie die Frage beantwortet, inwiefern insbe-

sondere der Einsatz von Siliziumkarbidhalbleitern zusätzlich begünstigt wird. Es sollen so zusätzliche Optimierungspotentiale genutzt werden, die weit über den einfachen Austausch von Siliziumhalbleitern durch Siliziumkarbidhalbleiter hinausgehen.

Beim Entwurf der als Technologiedemonstratoren und zur praktischen Erprobung vorgestellten Wandler wird stets der Ansatz verfolgt, dass im jeweiligen Leistungsteil eine möglichst einfache Schaltungstopologie unter dem Einsatz von möglichst gut geeigneten Halbleitern einer komplexeren Topologie mit beispielsweise preiswerteren Halbleitern bevorzugt wird. Dieser Ansatz hat zum einen eine möglichst hohe Leistungsdichte zum Ziel, zum anderen soll so eine möglichst überschaubare und vergleichbare Basis zur Bewertung der verfolgten Optimierungsansätze realisiert werden.

Abschließend wird geklärt, welche Strukturen, Wandler oder Schaltungstopologien von den unterschiedlichen Technologien und methodischen Ansätzen am stärksten profitieren beziehungsweise welcher Optimierungsansatz auf die unterschiedlichen Schaltungen den größten Einflussfaktor besitzt und somit den größten Vorteil liefern kann.

1.2 Motivation und Einordnung in einen globalen Kontext

In diesem Abschnitt erfolgt eine grobe Einordnung der Thematik dieser Dissertation in den aktuellen globalen Kontext. Eine detaillierte Analyse des Standes der Technik erfolgt aufgrund der Themenvielfalt in den jeweiligen technologiebezogenen Abschnitten.

[SB16] beschreibt umfassend die Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz und damit zur Reduktion des Treibhausgasausstoßes, gliedert nach Sektoren. Die Mobilität macht demnach in Deutschland 23 % der CO₂-Emissionen pro Kopf aus. Neben den zwei Stellhebeln „Vermeidung der Verkehrsnachfrage“ und „Nutzung von Mobilitätsdienstleistungen“ werden vor allem „technologiebezogene Maßnahmen [...] im Bereich der Antriebstechnologien“ als Wege zu einer höheren Energieeffizienz angeführt. Unter diesen technologischen Maßnahmen bieten im Straßenverkehr vor allem die „Diversifizierung der Antriebskonzepte“ und der Einsatz elektrischer Antriebe die größten Potentiale.

Die aktuellen Statistiken [IEA20; ZSW21] zeigen die rasch voranschreitende Marktentwicklung der Elektromobilität. So haben Elektrofahrzeuge im

PKW-Segment in ausgewählten Märkten 2019 bereits Verkaufsanteile im zweistelligen Prozentbereich (Schweden: 11,4 %, Niederlande: 15,1 %, Norwegen: 55,9 %), für Deutschland wird ein Anteil von 3 % angeführt. Weltweit wird für 2020 ein Bestand von knapp 11 Millionen Elektrofahrzeugen (batterieelektrische und Plug-In-Hybride) gemeldet. Prognosen wie [LF20] stellen für 2035 Marktanteile von etwa 25 % für batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie weitere 11 % für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge in Aussicht. Als primäre Hemmnisse bei der Anschaffung von Elektrofahrzeugen werden weiterhin stets die vermeintlich zu geringe Reichweite, die hohen Batteriekosten sowie die geringe Ladeleistung angeführt.

Die Leistungselektronik als eine von mehreren Schlüsseltechnologien bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen kann hierbei durch stetige Verbesserungen im Hinblick auf Bauräume, Gewicht, Wirkungsgrade und Systemkosten ihren Beitrag zur Weiterentwicklung liefern. So tragen eine Reduktion von Bauraum und Gewicht durch eine Steigerung der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte zu einer einfacheren Fahrzeugintegration und in gewissem Maße zu geringeren Fahrwiderständen bei. Jede Reduktion von auftretenden Verlusten steigert die mögliche Fahrzeugreichweite oder bietet alternativ die Möglichkeit zur Reduktion der erforderlichen Batteriekapazität und damit der Einsparung von Kosten. Strukturelle Ansätze im Bereich der Bordnetztopologie oder die Festlegung einer hohen Bordnetzspannung zielen unter anderem auf eine Steigerung der realisierbaren Ladeleistung ab.

[Raj13] zeigt einen umfassenden Überblick über mögliche zukünftige technologische Entwicklungen im Bereich von Elektrofahrzeugantriebssträngen auf. Deutlich dargestellt wird dabei auch die bisherige sukzessive Steigerung der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte der benötigten leistungselektronischen Komponenten. Als nächster Schritt wird der flächendeckende Einsatz von Leistungshalbleitern auf Basis von Siliziumkarbid und darüber hinaus auch Galliumnitrid in Aussicht gestellt.

Wie in dieser Arbeit herausgearbeitet wird, sollte der Einsatz von Siliziumkarbid-MOSFETs dabei nicht als alleinstehende Technologie betrachtet werden, da ihr Potential durch den einfachen Austausch von Leistungshalbleitern nur teilweise gehoben wird. Vielmehr sind der Einsatz vielfältiger Begleittechnologien sowie eine umfassende Optimierung von Antriebsstrang- und Bordnetzkonzepten vor dem Hintergrund der Verfügbarkeit neuer und innovativer Leistungshalbleiter und deren spezifischer Eigenschaften erforderlich.

1.3 Struktur, Inhalte und Vorgehen der Arbeit

Als Leistungsfähigkeit oder Performance eines leistungselektronischen Wandlers wird in dieser Arbeit stets ein sinnvoller Kompromiss aus Leistungsdichte ρ_P und Effizienz η verstanden. Diese zwei möglichen Entwicklungsziele bei der Auslegung leistungselektronischer Schaltungen verstärken sich teilweise, zum Beispiel bei der Auslegung von Kühlsystemen, bringen jedoch teilweise auch konträre Entwicklungstendenzen mit sich, z. B. bei der Wahl einer Schaltfrequenz. Es muss daher stets ein begründeter, anwendungsabhängiger Kompromiss gefunden werden. Die Veröffentlichungen [NBK20a; NBK20b] sprechen in diesem Zusammenhang von der $\eta\rho$ -Performance, die in entsprechenden Optimierungs- und Auslegungsvorgängen als zweidimensionale Paretofront dargestellt werden kann.

Abbildung 1.1 zeigt eine Übersicht über die Gliederung dieser Dissertation.

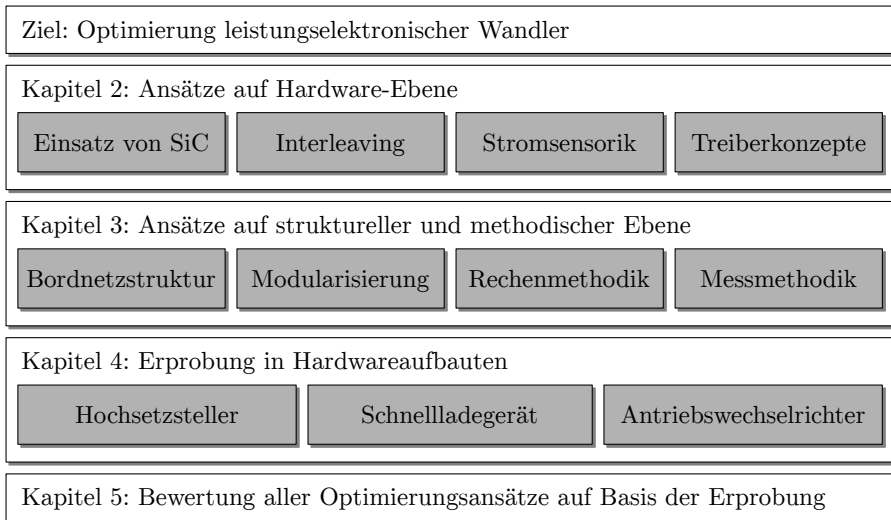


Abbildung 1.1: Gliederung der Arbeit

Um das übergeordnete Ziel der Optimierung von Leistungsdichte und Effizienz leistungselektronischer Wandler zu erreichen, werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Diese sollen durch ihren Einsatz die oben definierte Performance gegenüber konventionellen Entwürfen steigern und werden in die

unmittelbar hardwarebezogenen Technologien und die eher strukturellen oder methodischen Optimierungsansätze untergliedert.

Zu den hier vorgeschlagenen technologischen Ansätzen auf Hardwareebene zählen neben dem Einsatz von Siliziumkarbid-MOSFETs eine besonders kompakte, integrierbare Strommessmethode, ein Konzept für intelligente Treiberstufen mit dezentraler Steuerungselektronik und verschiedene Schaltungskonzepte für die Verkleinerung von Filterbauelementen durch versetztes Schalten (*Interleaving*). Im Bereich der strukturellen und methodischen Ansätze werden insbesondere universelle und modulare Bordnetzstrukturen für Elektrofahrzeuge sowie der Einfluss der Wahl einer bestimmten Bordnetzspannung betrachtet. Weiterhin wird eine besonders effiziente Berechnungsmethode zur Auslegung leistungselektronischer Schaltungen vorgestellt. Ebenfalls betrachtet werden Methoden zur Vermessung von Halbleiterbauelementen zur Bestimmung geeigneter Ersatzparameter für die exakte Modellbildung. Alle entwickelten Technologien und Optimierungsansätze werden in den Kapiteln 2 und 3 jeweils für sich genommen dargestellt, theoretisch analysiert und vorläufig bewertet.

Anschließend erfolgt in Kapitel 4 eine praktische Erprobung in dazu besonders geeigneten prototypischen Aufbauten. Hierbei kommen jeweils mehrere der dargestellten Ansätze zum Einsatz. Ziel der Erprobung ist die Untersuchung der Umsetzbarkeit und der Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen auf die resultierende Performance in unterschiedlichen praktischen Anwendungen. Als Zielanwendung dient hier stets ein Elektrofahrzeug, woraus sich auch der besondere Fokus auf Leistungsdichte und Wirkungsgrad ergibt. Die Anwendungsbeispiele in dieser Arbeit umfassen drei möglichst unterschiedliche, typische Komponenten von Elektrofahrzeugen. Dadurch soll zum einen die große Bandbreite der Optimierungsansätze berücksichtigt werden, die für unterschiedliche Wandlertypen und Leistungsklassen jeweils unterschiedlich gut geeignet sind, zum anderen soll festgestellt werden, ob sich die Maßnahmen in unterschiedlichen Aufbauten unterschiedlich stark und in unterschiedlicher Art und Weise auswirken. Die konkret ausgewählten Versuchsträger sind ein Antriebswechselrichter für leistungsfähige Hauptantriebe (Nennleistung 250 kW), ein bidirektionaler Gleichstromsteller (Nennleistung 100 kW) sowie ein Onboard-Ladegerät (Nennleistung 22 kW). Die Entwicklung der jeweiligen prototypischen Aufbauten wird vorgestellt und die Demonstratoren werden anhand von Messergebnissen bewertet und mit konventionellen oder

aktuellen kommerziellen Aufbauten verglichen.

Abschließend erfolgt in Kapitel 5 eine Analyse der Wirksamkeit aller in den prototypischen Aufbauten eingesetzten Optimierungsansätze im Hinblick auf die geforderte Steigerung der oben definierten Performance. Interessant sind hierbei sowohl der Einfluss der individuellen Maßnahmen als auch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Technologien miteinander sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten untereinander. Auf Grundlage der theoretischen Untersuchungen und der praktischen Erprobung erfolgt eine finale Bewertung aller Optimierungsansätze.

2 Hardwaretechnologien zur Steigerung von Effizienz und Leistungsdichte

Das zentrale Ziel in dieser Arbeit ist die Steigerung der Performance leistungselektronischer Wandler, wobei unter Performance vorrangig Leistungsdichte und Effizienz verstanden werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene technologische Ansätze entwickelt, dargestellt und theoretisch analysiert, die unmittelbar oder mittelbar die Leistungsdichte elektronischer Energiewandler positiv beeinflussen sollen. In diesem Kapitel werden vier Technologien angeführt, die dieses Ziel durch Maßnahmen direkt auf der Hardwareebene erreichen sollen.

In Abschnitt 2.1 werden zunächst die Größen Leistungsdichte und Effizienz allgemein definiert. Es werden aus den gefundenen Definitionen systematisch die grundlegenden Einflussfaktoren abgeleitet, um ein Gesamtbild der möglichen Stellschrauben finden zu können. In den weiteren Abschnitten erfolgt dann die Entwicklung einzelner, spezifischer Optimierungsansätze.

Hierbei wird als erstes der Einsatz von Siliziumkarbid-MOSFETs betrachtet. Es erfolgen eine Darstellung der wichtigsten anwendungsrelevanten Bauteilparameter und eine umfassende Analyse der aktuell verfügbaren Bauteile. Des Weiteren erfolgt eine Abgrenzung anhand ihrer typischen Bauteileigenschaften zu alternativen, auf Silizium oder Galliumnitrid basierenden Bauteilen, die in den jeweiligen Anwendungsfeldern miteinander konkurrieren. Hieraus werden die spezifischen Vorteile und Potentiale der jeweiligen Leistungshalbleiter abgeleitet.

Als ein für den Bauraum beispielsweise von Antriebswechselrichtern nicht zu vernachlässigendes Element ist die üblicherweise nötige Stromsensorik anzuführen. Ihr Volumen auf ein Minimum zu reduzieren, ist das Ziel der in Abschnitt 2.3 entwickelten integrierbaren Strommessmethode. Diese Technologie

auf der Grundlage von Rogowskispulen ist nicht notwendigerweise auf das Zusammenspiel mit Siliziumkarbidleistungshalbleitern beschränkt, trägt aber insbesondere in Antriebsumrichteranwendungen zu einem kompakten Gesamtsystem bei.

In Abschnitt 2.4 werden verschiedene Schaltungstopologien untersucht und gegenübergestellt, die durch eine Unterteilung einzelner Halbbrückenschaltungen in mehrere parallele Stränge mit individueller Ansteuerung das Ziel verfolgen, das Volumen von passiven Filterbauelementen zu reduzieren. Dies betrifft sowohl die zwischenkreisseitigen Kondensatoren als auch die lastseitigen induktiven und kapazitiven Filterbauelemente. Üblicherweise werden diese Maßnahmen unter dem Begriff des Interleaving zusammengefasst. Hierbei lassen sich verschiedene Ansätze verfolgen, die jeweils für verschiedene Anwendungsfälle wie Gleichstromsteller oder Antriebswechselrichter geeignet sind.

Als eine weitere Begleittechnologie, die sowohl auf einige neue Anforderungen besonders schnell schaltender Leistungshalbleiter zugeschnitten ist als auch die Optimierungsansätze integrierte Strommessmethode und Interleaving optimal unterstützt, werden die in Abschnitt 2.5 vorgestellten „Intelligenten Treiberstufen“ angesehen. Sie helfen auf vielfältige Weise beim EMV-gerechten Entwurf von modularen und kompakten leistungselektronischen Systemen, vor allem vor dem Hintergrund einer aufgrund von Interleaved-Konzepten steigenden Anzahl an individuell schaltenden Halbbrücken. Auch diese Technologie ist nicht grundsätzlich auf den Einsatz mit Siliziumkarbidhalbleitern beschränkt, jedoch kommen hier einige Vorzüge besonders stark zur Geltung.

2.1 Definition von Leistungsdichte und Effizienz

In diesem Abschnitt werden Leistungsdichte und Effizienz allgemein definiert sowie allgemeine Einflussfaktoren auf beide Größen abgeleitet.

2.1.1 Leistungsdichte

Als Leistungsdichte wird allgemein das Verhältnis einer Leistung zu einem Volumen bezeichnet. Im Hinblick auf leistungselektronische Wandler ist die Angabe der elektrischen Nennausgangsleistung des Wandlers in seinem Auslegungsbetriebspunkt bezogen auf sein Gesamtvolumen eine sinnvolle Angabe.

Die typische Maßeinheit im betrachteten Anwendungskontext ist $[\rho_{P,V}] = 1 \text{ kW}/\ell$. Neben der volumetrischen Leistungsdichte ist auch die Angabe einer gravimetrischen Leistungsdichte üblich, also einem Verhältnis von Leistung zu Masse, angegeben in $[\rho_{P,m}] = 1 \text{ kW}/\text{kg}$. Diese Größe entspricht dem unmittelbaren Kehrwert eines Leistungsgewichtes, also Masse pro Leistung.

Die Formeln 2.1 zeigen die allgemeine Definition der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte in differentieller Form. Da in den hier betrachteten Anwendungen die Beschreibung einer lokalen Verteilung der Leistungsdichte innerhalb eines Wandlers nicht sinnvoll möglich ist, wird die einfachere, makroskopische Definition gemäß Gleichungen 2.2 verwendet.

$$\rho_{P,V} = \frac{dP}{dV}, \quad \rho_{P,m} = \frac{dP}{dm} \quad (2.1)$$

$$\rho_{P,V} = \frac{P}{V}, \quad \rho_{P,m} = \frac{P}{m} \quad (2.2)$$

Bei der Gegenüberstellung von Leistungsdichteangaben muss aufgrund der vielfältigen möglichen Definitionen der Leistung (Nennleistung, Dauerleistung, Maximalleistung) und der Volumina (Gesamtvolumen, Volumen der Aktivteile, Quadvolumen) stets auf eine sinnvolle Vergleichbarkeit der Werte geachtet werden.

2.1.2 Effizienz

Unter Effizienz oder Wirkungsgrad wird bei elektronischen Energiewandlern, wie bei Energiewandlern allgemein üblich, das Verhältnis von Ausgangsleistung zu Eingangsleistung verstanden. Die dimensionslose Größe lässt sich gemäß Gleichung 2.3 somit aus zwei der drei Größen Eingangsleistung P_{ein} , Ausgangsleistung P_{aus} und Gesamtverlustleistung $P_{\text{v,tot}}$ des Wandlers bestimmen.

$$\eta = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}} = \frac{P_{\text{ein}} - P_{\text{v,ges}}}{P_{\text{ein}}} = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{aus}} + P_{\text{v,tot}}} \quad (2.3)$$

Der Wirkungsgrad ist somit eine betriebspunktabhängige Größe und kann daher nicht pauschal für einen Wandler angegeben werden. Es gibt in verschiedenen Anwendungsfeldern Definitionen für gewichtete Wirkungsgrade, die einfache skalare Vergleichs- oder Bewertungsgrößen darstellen sollen. Die bekanntesten Anwendungen dieser gewichteten Wirkungsgrade, bei denen die

Wirkungsgrade mehrerer festgelegter Betriebspunkte mit individuellen Gewichtungsfaktoren skaliert und aufaddiert werden, sind Computernetzteile (vgl. [CO05]) und Solarwechselrichter (vgl. [Wag19]). Für leistungselektronische Wandler in automotiven Anwendungen sind solche genormten Definitionen bisher nicht bekannt, sodass hier weiterhin auf die Angabe des Betriebspunktes zum jeweiligen Wirkungsgrad geachtet werden muss. Alternativ ist eine Darstellung als Betriebspunktabhängiges Wirkungsgradkennfeld möglich.

2.1.3 Ableitung allgemeiner Einflussgrößen

Aus den in den Gleichungen 2.2 und 2.3 dargestellten Definitionen lassen sich allgemeine Zusammenhänge ableiten, welche Möglichkeiten zur Steigerung von Leistungsdichte und Wirkungsgrad bestehen. Diese sollen hier systematisch betrachtet und um praktische Aspekte ergänzt werden.

Es wird zunächst angenommen, dass zur Erfüllung der Aufgabe eines Wandlers in seiner Zielapplikation eine vorgegebene Ausgangsleistung P_{aus} zu erbringen ist. Die volumetrische Leistungsdichte kann dann also nur durch eine Volumenreduktion, die gravimetrische Leistungsdichte durch eine Gewichtsreduktion gesteigert werden. Zur Steigerung des Wirkungsgrades ist eine Reduktion der im Wandler auftretenden Verluste erforderlich.

Abhängigkeiten im Bereich der Leistungshalbleiter

Die Leistungshalbleiter spielen vor allem im Bereich der Verlustreduktion eine wichtige Rolle, da hier ein großer Anteil der Gesamtverluste auftritt. Diese Verluste lassen sich durch den Einsatz optimierter Bauelemente reduzieren oder durch eine Reduktion der Ausnutzung oder Stromdichte, was einer Vergrößerung der verwendeten Chipfläche entspricht. Letzteres ist offensichtlich kontraproduktiv im Hinblick auf eine Volumen- und Gewichtsreduktion, sodass hier ein erster Zielkonflikt erkennbar wird. Die Durchlassverluste heutiger Leistungshalbleiter haben grundsätzlich positive Temperaturkoeffizienten, sodass auch eine gute Kühlung, die im Betrieb niedrige Sperrschichttemperaturen erreicht, einem hohen Wirkungsgrad zuträglich ist. Die Schaltverluste sind vor allem von den verwendeten Halbleitern und der Schaltfrequenz abhängig. Eine niedrige Schaltfrequenz ist also ebenfalls vorteilhaft für den Wirkungsgrad.

Eine Reduktion der Schaltverluste kann außer durch die Wahl schnell schal-