

# Einsatz von Simulationen beim Entwurf leistungselektronischer Systeme

Robert Rohn<sup>1\*</sup>, Thorben Schobre<sup>1</sup>, Günter Tareilus<sup>1</sup>, Regine Mallwitz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen; Technische Universität Braunschweig; Hans-Sommer-Str. 66; 38106 Braunschweig, Deutschland; \*[r.rohn@tu-braunschweig.de](mailto:r.rohn@tu-braunschweig.de)

## Kurzfassung

Dieser Beitrag soll eine Einsatzmöglichkeit der Simulationssoftware LTspice im Entwurfsprozess leistungselektronischer Systeme vorstellen. Dabei geht es um den Entwurf des Modells eines Silizium-Karbid-Wechselrichters mit Sinusfilter für lange Motorleitungen bei hohen Schaltfrequenzen. Es wird beschrieben, wie die Festlegung geeigneter Parameter erfolgt und geeignete Vereinfachungen getroffen werden. Abschließend wird am Beispiel der Halbleiter ein Vergleich gezogen, ob es sinnvoll ist, alle physikalischen Eigenschaften abzubilden oder ob getroffene Vereinfachungen das Ergebnis zu stark verfälschen.

## Einleitung

Bei Wechselrichtern handelt es sich um Systeme, die zum Antrieb von Motoren mit variabler Drehzahl in einer Vielzahl von Industrieanlagen eingesetzt werden. Im Allgemeinen werden für den Anschluss von elektrischen Maschinen an Wechselrichtern geschirmte Motorleitungen eingesetzt. Diese weisen im Vergleich zu ungeschirmten Leitungen gleichen Querschnitts einen insgesamt größeren Durchmesser bei mehr Gewicht auf und verursachen zusätzlich durch ihre komplexe Handhabung ein Vielfaches der Kosten. Die Entwicklungen im Bereich der Wide-Bandgap-Halbleiter erlauben durch steile Schaltflanken hohe Schaltfrequenzen, was zu kapazitiven Umladeströmen auf dem Schirm der Motorleitung und in der Maschine führt. Gerade bei großen Leitungslängen, wie sie beispielsweise in explosionsgeschützten Bereichen häufig anzutreffen sind, können hohe Umladeströme fließen, wodurch sich die Systemeffizienz verringert.

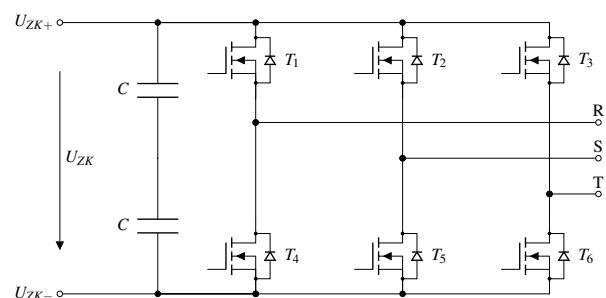
Im BMWi geförderten Projekt Ide3Al soll daher ein Silizium-Karbid-Wechselrichter mit Sinusfilter entwickelt werden. Der Sinusfilter glättet die Ausgangsspan-

nung des Wechselrichters, wodurch auf den Leitungsschirm verzichtet werden kann. Dieser Verzicht birgt ein erhebliches Potential zur Effizienzsteigerung, da weniger Energie zum Umladen der Schirmkapazität aufgewendet werden muss. Auch die Verluste in der Maschine verringern sich durch die Spannungsglättung erheblich. Der Fokus der folgenden Betrachtungen liegt hierbei auf Leitungslängen von rund 100 m, da die beschriebenen Effekte hier besonders zum Tragen kommen.

Um eine Einschätzung des Einsparpotentials zu erhalten und die Auslegung von Filter und Wechselrichter zu unterstützen, wird im Projekt ein Simulationsmodell des Systems erstellt. Mit dessen Hilfe lassen sich der Einfluss von Flankensteilheit und Ableitkapazitäten auf das Gesamtsystem untersuchen.

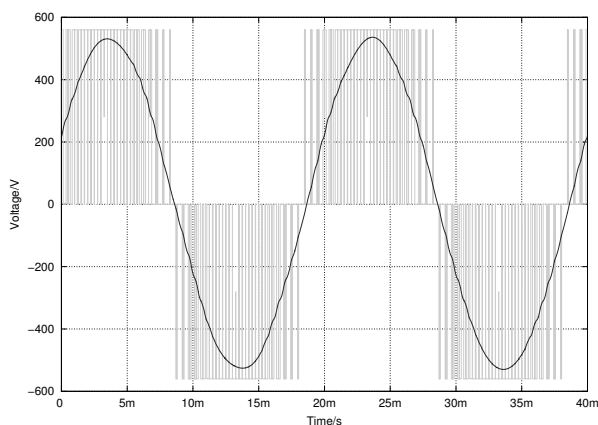
Im Folgenden werden die notwendigen Schritte zum Erstellen des Modells beschrieben.

## Wechselrichter



**Figure 1:** B6-Leistungsteil eines Wechselrichters mit eingangsseitigem Spannungszwischenkreis und drei Halbbrücken

Im Leistungsteil des Wechselrichters (Fig. 1) kommt eine klassische B6-Anordnung der Halbleiter  $T_1$ - $T_6$  zum Einsatz. Eingangsseitig befindet sich ein Gleichspannungszwischenkreis, dem die Energie zum Antrieb der



**Figure 2:** Spannungen am Sinusfilter (grün: Wechselrichter-ausgangsspannung an Klemme R,S, blau: Filterausgangsspannung an Klemme F1,F2)

Maschine entnommen wird. An den Ausgangsklemmen R, S, T kann die Wechselspannung für den Motor abgegriffen werden.

Als Vereinfachung werden die Halbleiter jedoch nicht mit ihren physikalischen Eigenschaften dargestellt, sondern idealisiert durch spannungsgesteuerte Schalter. Diese nehmen abhängig von der an ihren Steuereingängen anliegenden Spannung den Zustand leitend oder sperrend ein, was sich mittels Spice-Direktive festlegen lässt. Darüber lassen sich die Durchlassverluste und Leckströme der realen Halbleiter näherungsweise nachbilden. Zusätzlich lässt sich das Modell durch eine Streuinduktivität erweitern. Im vorliegenden Fall wird allerdings hierauf verzichtet.

Die Halbleiter werden mittels Raumzeigermodulation so angesteuert, dass sich an den Klemmen R, S, T des Lastabgangs in Fig. 1 eine dreiphasige, gepulste, im Mittel sinusförmige Ausgangsspannung ergibt, dargestellt in Fig. 2. Pro Halbbrücke darf dabei allerdings immer nur einer von beiden Halbleitern eingeschaltet sein. Andernfalls fließt in der betreffenden Halbbrücke ein sehr großer Strom, was die Betrachtung unrealistisch macht und in der Realität zur Zerstörung der betroffenen Halbleiter führt. Daher ist beim Umschalten der Halbbrücken eine Totzeit einzuhalten, eine kurze Phase, in der keiner von beiden Halbleitern eingeschaltet ist.

Der Laststrom kann sich jedoch bei induktiven Lasten wie elektrischen Maschinen nicht sprunghaft ändern, sondern fließt zunächst unverändert weiter. Dadurch steigt die Spannung an den Schaltern während

der Totzeit stark an. Um dies zu verhindern, muss ihm ein alternativer Pfad zur Verfügung gestellt werden, in dem er freilaufen kann, was mit einer antiparallelen Diode zu jedem Schalter erreicht wird. Hierdurch wird dem Strom ermöglicht, auf die Diode zu kommutieren, was die am Halbleiter anliegende Spannung auf die Vorwärtsspannung der Diode begrenzt [1, p. 87].

Viele kommerzielle B6-Module integrieren diese Freilaufdioden standardmäßig. Dioden- und Halbleitermodell lassen sich über folgende Spice-Direktiven parametrieren:

```
.model Mosfet T(Ron=10m...
...Roff=100Meg Vt=4V)
.model Diode D(Ron=10m...
...Roff=100Meg Vfwd=0.6V)
```

In diesem Beispiel werden der Widerstand im eingeschalteten Zustand  $R_{on}$  und im ausgeschalteten Zustand  $R_{off}$ , die Einschaltspannung des Mosfets  $V_t$  und die Vorwärtsdurchbruchspannung der Diode  $V_{fwd}$  parametrieren [2].

## Sinusfilter

Wie bereits erwähnt ergibt sich an den Ausgangsklemmen des Wechselrichters eine gepulste Wechselspannung. Wird an den Klemmen eine elektrische Maschine angeschlossen, sorgt das integrierende Verhalten der Motorinduktivität für eine Glättung des Stroms, so dass dieser einen nahezu sinusförmigen Verlauf hat. Allerdings kann der Wechselrichter selten direkt an die Maschine angeschlossen werden. In der Regel kommt zwischen Wechselrichter und Maschine eine Motorleitung zum Einsatz.

In der Norm DIN VDE 0160-103 sind Grenzwerte für die maximale Flankensteilheit auf ungeschirmten Leitungen festgelegt. Bei Wechselrichtern mit Schaltfrequenzen zwischen 8 kHz und 20 kHz ist es daher üblich, eine geschirmte Leitung zu verwenden. Durch den geringen Abstand zwischen den Leitern und dem Leitungsschirm ergibt sich für die geschirmte Motorleitung eine deutlich größere Ableitkapazität, als sie eine vergleichbare ungeschirmte Leitung aufweist. Wegen der Spannungspulsation am Wechselrichterausgang wird die Ableitkapazität mit Schaltfrequenz umgeladen, was im Betrieb zur Ausbildung von Ableitströmen führt. Diese können eine erhebliche Verlustleistung zur Folge haben.

Mit dem Einzug von Wide-Band-Gap-Halbleitern wie Silizium-Karbid-Mosfets (SiC-Mosfets) sind jedoch

sehr steile Schaltflanken und damit hohe Schaltfrequenzen von 100 kHz und mehr möglich. Diese hohen Schaltfrequenzen führen zu einem proportional größeren Ableitstrom, da die Ableitkapazitäten häufiger umgeladen werden. Daher ist der Einsatz eines Sinusfilters (Fig. 3) sinnvoll [3].

In Fig. 4 und Fig. 5 sind die Spektren der Wechselrichterausgangsspannung und der Filterausgangsspannung bei 100 kHz Schaltfrequenz gegenübergestellt. Die eingezeichnete Normgrenzwertkennlinie wird am Wechselrichterausgang nicht mehr eingehalten, wohl aber am Sinusfilterausgang. Die Auslegung der Filterelemente muss entsprechend der Anwendung angepasst werden.

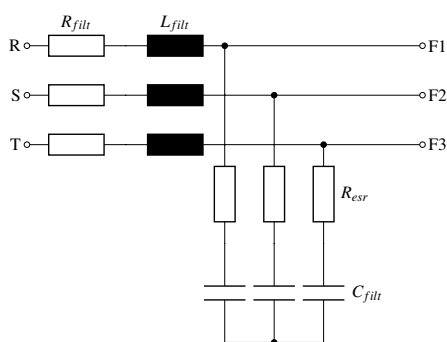


Figure 3: Ersatzschaltbild des Sinusfilters

Die Filterinduktivität  $L_{filt}$  führt zusammen mit der Filterkapazität  $C_{filt}$ , wie bereits für die Maschine beschrieben, zu einer Glättung des Laststroms, wodurch sich an den Ausgangsklemmen F1 bis F3 in Fig. 3 eine sinusförmige Ausgangsspannung ergibt. Der Dämpfungswiderstand  $R_{esr}$  bildet den äquivalenten Ersatzwiderstand des Kondensators ab,  $R_{filt}$  repräsentiert die Wicklungs- und Eisenverluste der Filterinduktivität. Zur Bestimmung der Parameter der Filterelemente wird zunächst der maximal zulässige Stromrippel  $\Delta I$  festgelegt. Mit diesem kann zusammen mit der Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$  und der Schaltfrequenz  $f_{sw}$  nach Gl. (1) die erforderliche Größe der Induktivität bestimmt werden [1, p. 191].

$$L_{filt} = \frac{U_{ZK}}{4 \cdot \Delta I \cdot f_{sw}} \quad (1)$$

Anschließend wird die Grenzfrequenz  $f_0$  des Filters festgelegt, die unterhalb der Schaltfrequenz der Halbleiter und oberhalb der Regelfrequenz liegen sollte. Als weiteres Kriterium ist die Dämpfung entscheidend, die das Filter bei der Schaltfrequenz der Halbleiter bie-

ten soll. Die höchste Frequenz der Grundwelle findet hier keine Betrachtung, da diese unterhalb der Regelfrequenz liegt. Ein Filter 2. Ordnung bietet eine Dämpfung von  $20 \frac{dB}{dekade}$ . Mit der Grenzfrequenz lässt sich daraus der Kapazitätsbedarf des Filters nach Gl. (2) bestimmen [4].

$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_{filt} \cdot f_0^2} \quad (2)$$

Durch die ausbleibende Spannungspulsation am Filterausgang (Fig. 2) werden die Ableitkapazitäten nur noch mit der Grundwellenfrequenz umgeladen, wodurch vollständig auf die Schirmung der Motorleitung verzichtet werden kann, wie aus Fig. 5 hervorgeht [5]. Daher wird im weiteren Verlauf die Anordnung einer einfachen dreidadrigen Leitung betrachtet.

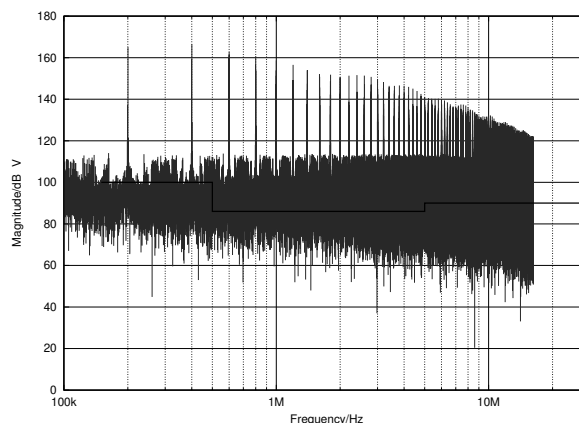
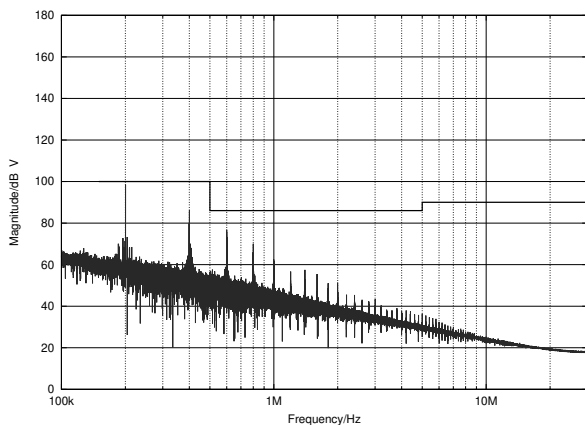


Figure 4: Spannungsspektrum an den Wechselrichterklammern R,S,T mit Grenzwertkurve nach DIN VDE 0160-103

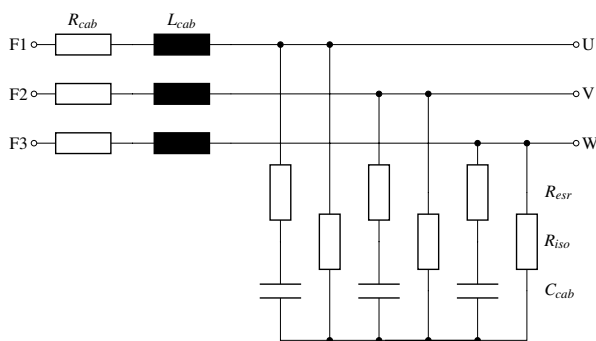
## Motorleitung

Die Motorleitung bildet wie das Sinusfilter ein System 2. Ordnung (Fig. 3). Es finden der Ohmsche Leitungswiderstand  $R_{cab}$ , die Leitungsinduktivität  $L_{cab}$  und die Leitungskapazität  $C_{cab}$  mit dem Dämpfungswiderstand  $R_{esr}$  Berücksichtigung.

Zusätzlich wird die Kabelisolation durch den Widerstand  $G_{iso}$  dargestellt. Die Ersatzschaltbildparameter der Leitung setzen sich aus den Leitungsbelägen und der -länge zusammen und sind etwa eine Größenordnung kleiner als die des Sinusfilters. Anders als z.B.



**Figure 5:** Spannungsspektrum an den Filterausgangsklemmen F1, F2, F3 mit Grenzwertkurve nach DIN VDE 0160-103

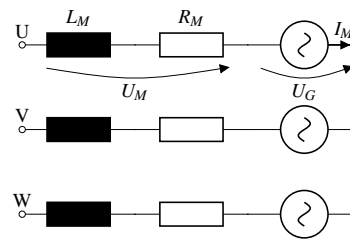


**Figure 6:** Ersatzschaltbild der Motorleitung

in [6] finden bei diesem Modell keine Reflexionen Berücksichtigung.

## Maschine

Abschließend findet die Maschine Anschluss an das Leitungsmodell. Dabei kommt das einfache Ersatzschaltbild einer Synchronmaschine in Sternschaltung zum Einsatz, dargestellt in Fig. 7 [1, p. 340]. Durch den Widerstand  $R_M$  wird die in der Maschine umgesetzte Wirkleistung abgebildet. Dies umfasst die abgegebene mechanische Leistung wie auch interne Verluste durch Ummagnetisierung, Skin- und Proximityeffekt sowie Kupferverluste. Die Maschineninduktivität wird durch  $L_M$  repräsentiert. Mittels Spannungsquelle lässt sich eine Gegenspannung  $U_G$  einstellen, die zur Simulation generatorischer Arbeitspunkte notwendig ist. Da-



**Figure 7:** Ersatzschaltbild einer Synchronmaschine

mit lassen sich alle vier Quadranten darstellen. Da bestimmte Arbeitspunkte simuliert werden sollen, lassen sich Motorinduktivität  $L_M$  und -widerstand  $R_M$  nach Gl. (3) und (4) über Strangspannung  $U_M$  und -strom  $I_M$  einstellen. Der Strom in Phase N ist bei einem dreiphasigen System um  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$  zu verschieben.

$$L_M = \frac{\hat{U}_M}{2\pi \cdot f_G \cdot \sqrt{2} \cdot I_M \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)}} \quad (3)$$

$$R_M = \frac{\hat{U}_M}{\sqrt{2} \cdot I_M \cdot \cos(\varphi)} \quad (4)$$

Um Einschwingvorgänge abzukürzen sollte auch der initiale Strom, der in der Motorinduktivität fließt, festgelegt werden. Dies erfolgt nach Gl. (5) mit einer .ic-Direktive.

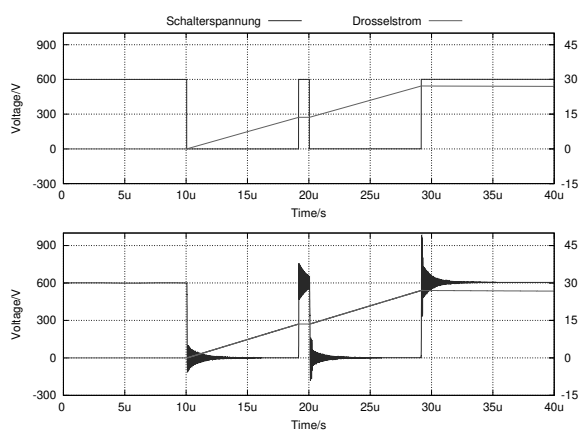
$$I_{M_N}(t_0) = I_M \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(-\varphi - \frac{N \cdot 2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

Auch in diesem Fall ist die Phasenverschiebung für alle Motorphasen entsprechend zu berücksichtigen.

## Ergebnisse

Dieses Modell soll eine Basis für weitergehende Untersuchungen bilden. So lässt sich der Filterbedarf bei verschiedenen Flankensteilheiten anhand des auftretenden Spektrums an den Ausgangsklemmen des Wechselrichters vorhersagen. In Fig. 4 und 5 sind die Spektren für den Betrieb ohne Sinusfilter und mit Sinusfilter für den Fall des idealen Schaltens gegenüber gestellt. Es lässt sich unschwer erkennen, dass die Grenzwertkennlinie ohne Sinusfilter deutlich überschritten wird, weshalb ein Betrieb ohne geschirmte Motorleitung unzulässig ist. Mit Sinusfilter werden die Grenzwerte hingegen eingehalten. Weiterhin spielt die Anbindung der Sternpunkte von Filter und Maschine an den Zwischenkreis eine Rolle bei der Filterwirkung. Mit dem Modell las-

sen sich verschiedene Variationen untersuchen.  
Auch der Einfluss des Schaltverhaltens der Halbleiter



**Figure 8:** Unterschiede im Schaltverhalten idealisierter Schalter (oben) gegenüber eines exakten Halbleitermodells (unten)

lässt sich betrachten. Viele Hersteller liefern entsprechende Simulationsmodelle die sich einbinden lassen. In Fig. 8 ist das Schaltverhalten des idealisierten B6-Modells mit dem Schaltverhalten des Halbleitermodells eines Herstellers gegenübergestellt. Es lassen sich deutliche Unterschiede erkennen, die von der Ausgangskapazität der Halbleiter hervorgerufen werden. Durch die hochfrequenten Umladevorgänge dieser Kapazitäten verkürzt sich der Simulationszeitschritt allerdings erheblich.

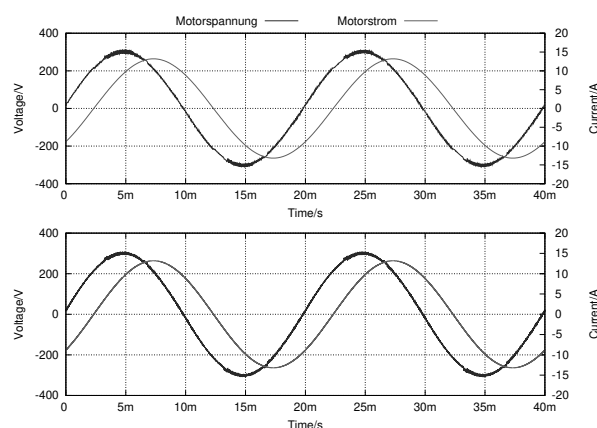
Die Simulationsdauer von zwei Grundwellen verlängert sich auf der genutzten Hardware (Intel Xeon E3-1230v3, 32 Gb Ram) bei ansonsten gleichbleibenden Simulationsparametern in diesem Fall von 0,6h auf 6,6h Stunden. Die Unterschiede im Systemverhalten sind allerdings vernachlässigbar, wie sich aus Fig. 9 ablesen lässt, weshalb sich der zusätzliche Rechenaufwand hier nicht auszahlt.

Um hingegen eine Bestimmung von Schaltverlusten der Halbleiter vorzunehmen, ist es notwendig mit einem exakten Modell zu simulieren. In diesem Beispiel führen die beschriebenen Vereinfachungen zu großen Abweichungen von 2,27 W bei idealisierter Betrachtung zu 44,6 W mit exaktem Halbleitermodell.

Für die Auslegung einer Kühllösung ist die idealisierte Betrachtung somit viel zu Ungenau.

Es ist also Abwägungssache, ob sich die Investition von Rechenzeit in der Leistungselektronik auszahlt. Betrachtungen auf Systemebene lassen sich i.d.R. gut an

einem einfachen Modell abschätzen, Detailbetrachtungen dagegen müssen anhand eines exakten Modells getroffen werden.



**Figure 9:** Unterschiede im Simulationsverlauf von Motorspannung (blau) und dem Motorstrom (rot) für die Idealisierte Annahme (oben) und ein reales Halbleitermodell (unten)

## References

- [1] SPECOVIVUS, JOACHIM: *Leistungselektronik und EMV*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [2] BROCARD, G.: *Simulation in LTSpice IV: Handbuch, Methoden und Anwendungen*. Würth Elektronik. Swiridoff, 2013.
- [3] WEIS, BENNO: *Kompakter 690V-Umrichter mit SiC-Schottkydioden für sinusförmige Ausgangsspannung*. doctoralthesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2008.
- [4] PICATOSTE, R., M. BUTCHER A. MASI: *Sine wave filter for stepper motor drives working with long cables*. 2012 International Conference on Electrical Machines, 1075–1081, Sep. 2012.
- [5] WEIS, B.: *Ein kompakter 690-V-Umrichter mit integriertem Sinus-Ausgangsfiler und SiC-Schottky-Freilaufdioden*. VDE Kongress'08 Zukunftstechnologien Innovationen – Märkte – Nachwuchs. Siemens AG, VDE Verlag, Nov. 2008.
- [6] VON JOUANNE, A., P. ENJETI W. GRAY: *The effect of long motor leads on PWM inverter fed AC*

*motor drive systems. Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95, 2, 592–597 vol.2, 1995.*

## Kurzbiographie



Robert Rohn erwarb an der FH Aachen 2015 den Bachelor of Science und 2017 den Master of Engineering im Studiengang Elektrotechnik. Seine Bachelorarbeit verfasste er bei der Firma devolo über ein Thema aus dem Bereich Energy Harvesting, die Masterarbeit bei der Firma futavis, wo er einen interleaved SiC-Synchronous-Buck-Converter entwickelte. Seit November 2017 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMAB der TU-Braunschweig und befasst sich mit Stromwandlern und Ladegeräten auf Basis von SiC-Halbleitern.