

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 418

Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile,  
Hannover

## Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

11  
102  
1004  
Leibniz  
Universität  
Hannover

**IL** Institut für  
Antriebssysteme und  
Leistungselektronik



# **Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(abgekürzt: Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile

geboren am 25. Juni 1988

in Hannover

2018

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick  
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Markus Henke  
Vorsitz Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Tag der Promotion: 30.01.2018

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile,  
Hannover

Nr. 418

Modulare und  
skalierbare  
mehrsträngige  
Antriebssysteme für  
Elektrofahrzeuge



Institut für  
Antriebssysteme und  
Leistungselektronik

Müller-Deile, Felix

## **Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 418. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

160 Seiten, 105 Bilder, 41 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341821-3, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Elektromobilität – modulare Antriebssysteme – mehrsträngige Wicklungen – Oberschwingungsströme – Oberschwingungsverluste – thermische Modelle – Fahrzyklussimulation, Energieeffizienz – Herstellungskosten

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der elektrischen Antriebssysteme und Elektromobilität. Es werden modulare, skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorgestellt, welche für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingesetzt werden können. Ziel ist es, eine Leistungsskalierung zu ermöglichen, bei der der Strangstrom annähernd konstant bleibt, um eine Verwendung identischer Halbleitermodule für die unterschiedlichen Antriebssysteme zu ermöglichen. Dies wird durch eine Längen- und Strangzahlskalierung der E-Maschine erreicht. Zusätzlich werden die Vor- und Nachteile mehrsträngiger E-Maschinen analysiert, um die für das Konzept geeigneten Strangzahlen zu ermitteln. Hierbei wird speziell die Entstehung von Stromüberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen untersucht und ein Verfahren erarbeitet, welches eine Kompensation der Oberschwingungsströme ermöglicht. Abschließend werden Fahrzyklussimulationen durchgeführt und die Effizienz der Antriebsstränge in unterschiedlichen Fahrzyklen analysiert.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341821-3

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Leibniz Universität Hannover.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, der mir die Möglichkeit gab, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAL zu arbeiten. Die mit ihm geführten zahlreichen fachlichen Diskussionen trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke vom Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der Technischen Universität Braunschweig danke ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Koreferats.

Bei Herrn Johannes Heseding bedanke ich mich für die intensive wissenschaftliche Zusammenarbeit.

Ohne Unterstützung der Firma Robert Bosch GmbH, bei der die E-Maschinen-Prototypen gefertigt wurden, wäre eine messtechnische Validierung der Modelle nicht möglich gewesen.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die stets freundliche Atmosphäre und die hilfreichen fachlichen Gespräche bedanken.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichenkonvention</b>	<b>VII</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XVII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Baukastensysteme für Antriebsstrangkomponenten</b>	<b>4</b>
2.1 Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren . . . . .	4
2.2 Skalierungskonzept für die E-Maschine und die zugehörige Leistungselektronik . . . . .	9
2.3 Bewertungskriterien des Skalierungskonzepts . . . . .	12
2.3.1 Bauraum der E-Maschine . . . . .	12
2.3.2 Kosten der E-Maschine . . . . .	13
2.3.3 Bauraum der Leistungselektronik . . . . .	14
2.3.4 Kosten der Leistungselektronik . . . . .	16
2.3.5 Untersuchte Fahrzyklen . . . . .	16
<b>3 Stromberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen</b>	<b>18</b>
3.1 Oberschwingungsströme aufgrund von Sättigung . . . . .	18
3.2 dq-Ersatzschaltbilder . . . . .	23
3.2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine . . . . .	23
3.2.2 Induktionsmaschine . . . . .	28
3.3 Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung . . . . .	31
<b>4 Komponentenmodelle des Antriebsstrangs</b>	<b>38</b>
4.1 Fahrzeugmodell . . . . .	39
4.2 E-Maschine . . . . .	42
4.2.1 Elektromagnetische Modelle . . . . .	42
4.2.2 Thermische Modelle . . . . .	44
4.3 Wechselrichter . . . . .	65
4.4 Batterie . . . . .	70
<b>5 Baukastensystem für elektrische Fahrzeugantriebe</b>	<b>72</b>
5.1 Anforderungen an die E-Maschinen-Baureihe . . . . .	72

5.2	Dimensionierung der E-Maschinen- und der Leistungselektronik-Baureihe . . .	76
5.2.1	Dimensionierung der E-Maschinen-Baureihe . . . . .	76
5.2.2	Dimensionierung der Leistungselektronik-Baureihe . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Experimentelle Validierung</b>	<b>89</b>
6.1	Prüfstands Aufbau . . . . .	90
6.2	Leerlaufmessungen . . . . .	92
6.3	Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung . . . . .	94
6.3.1	Messverfahren zur Bestimmung der frequenzabhängigen Impedanz . . .	94
6.3.2	Messung und Berechnung der Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung . . . . .	99
6.4	Stromüberschwingungen im sechssträngigen Betrieb . . . . .	106
6.4.1	Stromüberschwingungen in permanentmagneterregten Synchronmaschinen . . . . .	106
6.4.2	Stromüberschwingungen in Induktionsmaschinen . . . . .	109
6.5	Lastmessungen . . . . .	111
6.5.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschine . . . . .	111
6.5.2	Induktionsmaschine . . . . .	117
<b>7</b>	<b>Simulationen im Fahrzyklus und Bewertung der Baureihen</b>	<b>122</b>
7.1	Simulationen im Fahrzyklus . . . . .	122
7.2	Bewertung der Baureihenkonzepte . . . . .	127
7.2.1	Kosten . . . . .	127
7.2.2	Bauraumbedarf . . . . .	129
7.2.3	Energieeffizienz im Fahrzyklus . . . . .	130
7.2.4	Gesamtbewertung . . . . .	132
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>136</b>

# Formelzeichenkonvention

## Allgemeine Definitionen

$a$	zeitabhängige Größe
$A$	Effektivwert
$\mathbf{A}$	Matrix
$\hat{a}$	Amplitudenwert
$\bar{a}$	Mittelwert
$\vec{a}$	Vektor
$\underline{A}$	komplexe Größe

# Formelzeichenverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

$A_{Ch}$	Chipfläche einer Halbbrücke
$A_F$	Stirnfläche des Fahrzeugs
$A_{Kühlkanal}$	Fläche eines Kühlkanals
$A_{L,ex}$	Fläche der externen Leistungsanschlüsse eines Bauelements
$A_{L,S}$	Fläche der internen Leistungs- und Steueranschlüsse eines Bauelements
$A_{LM,m3}$	Gesamtfläche eines dreiphasigen Leistungsmoduls
$A_{LM,m6}$	Gesamtfläche eines sechsphasigen Leistungsmoduls
$A_{\mu p}$	Magnetisierungshauptstrombelag
$a$	Anzahl der parallelen Zweige
$a_F$	Fahrzeugbeschleunigung
$B_{1,\mu}$	Flussdichte des Strangwechselfelds mit einer Frequenz der Ordnungszahl $\mu$
$B_{\mu}$	resultierende Luftspaltinduktion mit einer Frequenz der Ordnungszahl $\mu$
$\hat{B}_{wv',\mu}$	Amplitude des Stangwechselfelds der Ordnungszahl $v'$ und einer Frequenz der Ordnungszahl $\mu$
$b$	Breite
$C$	Kapazität
$C_{th}$	thermische Kapazität
$C_Z$	Kapazität einer Batteriezelle
$c$	spezifische Wärmekapazität
$c_r$	Rollwiderstandskoeffizient
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
$\cos \varphi_{\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor
$\cos \varphi_{1d\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor in der d-Achse
$\cos \varphi_{1q\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor in der q-Achse
$d_A$	Außendurchmesser des Stators

$d_{\text{Kühlkanal}}$	Durchmesser eines Kühlkanals
$E_{\text{Bat}}$	Energieinhalt der Traktionsbatterie
$E_{\text{D,off}}$	Schaltverlustenergie beim Ausschalten der Diode
$E_{\text{T,off}}$	Schaltverlustenergie beim Ausschalten des IGBT
$E_{\text{T,on}}$	Schaltverlustenergie beim Einschalten des IGBT
$f_1$	Grundfrequenz der Statorspannung und des Statorstroms
$f_{\mu}$	Frequenz einer Oberschwingung des Ausgangsspannungsspektrums eines Wechselrichters der Ordnungszahl $\mu$
$f_s$	Schaltfrequenz des Wechselrichters
$\mathbf{G}_{\text{th}}$	thermische Leitwertmatrix
$g$	Erdbeschleunigungskonstante
$h$	Höhe
$I_1$	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz
$I_{1\mu}$	Effektivwert des Oberschwingungsstroms mit einer Frequenz der Ordnungszahl $\mu$
$I_{\text{B}}$	Batteriestrom
$I_{\text{C}}$	Kollektorstrom
$I_{\text{m}3}$	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz der dreisträngigen E-Maschine
$I_{\text{m}6}$	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz der sechssträngigen E-Maschine
$I_{\mu}$	Effektivwert des Magnetisierungsstroms
$I_{\text{Z}}$	Zellenstrom
$i_1$	Strangstrom in der Statorwicklung
$i_d$	Statorstrom in der d-Achse
$i'_{\text{dr}}$	auf den Stator bezogener Rotorstrom in der d-Achse
$i_q$	Statorstrom in der q-Achse
$i'_{\text{qr}}$	auf den Stator bezogener Rotorstrom in der q-Achse
$J$	Massenträgheitsmoment
$\mathbf{J}$	Drehmatrix für einen Winkel von $90^\circ$
$J_1$	Stromdichte der Statorwicklung
$J_{\text{EM}}$	Massenträgheitsmoment der E-Maschine
$J_{\text{F}}$	Massenträgheitsmoment des Fahrzeugs bezogen auf die Antriebsachse
$J_{\text{Rad}}$	Massenträgheitsmoment der vier rotierenden Räder
$K_{\text{C}}$	Kosten eines Kondensators
$K_{\text{Ch}}$	Kosten der gesamten Chipfläche eines Leistungsmoduls

$K_{ES}$	Entwicklungskosten
$K_{FS}$	Fertigungskosten
$K_{MR}$	Materialkosten des Rotors
$K_{MS}$	Materialkosten des Stators
$K_{R,IM}$	Kosten des Rotors der Induktionsmaschine
$K_{R,PMSM}$	Kosten des Rotors der permanentmagneterregten Synchronmaschine
$K_S$	Kosten des Stators
$K_{WR}$	Kosten eines Wechselrichters
$k_{Cu}$	Nutfüllfaktor
$k_{Fe}$	Eisenfüllfaktor
$k_h$	frequenzabhängiger Faktor zur Berechnung der Oberschwingungsverluste durch ein Hauptfeld
$k_s$	frequenzabhängiger Faktor zur Berechnung der Oberschwingungsverluste durch ein Streufeld
$L$	Induktivität
$L_{lhd}$	Hauptinduktivität in der d-Achse
$L_{lhq}$	Hauptinduktivität in der q-Achse
$L_{lhw}$	Wechselfeldhauptinduktivität
$L_{l\sigma}$	Statorstreuinduktivität
$L_{l\sigma d}$	Streuinduktivität in der d-Achse
$L_{l\sigma q}$	Streuinduktivität in der q-Achse
$L_d$	Induktivität in der d-Achse
$\mathbf{L}_{dq}$	Induktivitätsmatrix im dq-System
$L'_{\sigma dr}$	auf den Ständer bezogene Rotorstreuinduktivität in der d-Achse
$L_q$	Induktivität in der q-Achse
$L'_{\sigma qr}$	auf den Ständer bezogene Rotorstreuinduktivität in der q-Achse
$L_{xx}$	Selbstinduktivität
$L_{xy}$	Gegeninduktivität
$L_{hxy}$	Gegeninduktivität über die Hauptwelle
$l_{Fe}$	Blechpaketlänge
$l_{Gehäuse}$	axiale Gehäuselänge
$l_{Kühlkanal}$	Länge des Kühlkanals in Fließrichtung des Mediums
$l_{Lager}$	Lagerabstand
$l_{WK,ax}$	axiale Wicklungskopfausladung
$M$	Modulationsgrad
$M$	Drehmoment

$M_{\text{Besch}}$	Beschleunigungsmoment
$M_{\text{EM}}$	Drehmoment der E-Maschine
$M_{\text{Luft}}$	Luftwiderstandsmoment
$M_{\text{Rad}}$	Fahrwiderstandsmoment am Rad
$M_{\text{Roll}}$	Rollwiderstandsmoment
$M_{\text{S}}$	Fahrbahnsteigungswiderstandsmoment
$m_1$	Strangzahl der Statorwicklung
$m_{\text{F}}$	Fahrzeugmasse
$m_{\text{Rad}}$	Masse eines Rads
$N_1$	Statornutzahl
$N_2$	Rotornutzahl
$Nu$	Nusselt-Zahl
$n_{\text{B}}$	Anzahl der einzelnen Traktionsbatteriezellen
$n_{\text{C}}$	Stückzahl der Kondensatoren
$n_{\text{C,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Kondensatoren
$n_{\text{Ch}}$	Stückzahl der Leistungsmodule
$n_{\text{Ch,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Leistungsmodule
$n_{\text{EM}}$	Drehzahl der E-Maschine
$n_{\text{eck}}$	Eckdrehzahl der E-Maschine
$n_{\text{Kühlkanal}}$	Anzahl der Kühlkanäle
$n_{\text{Mag}}$	Anzahl der Magnete
$n_{\text{BP}}$	Anzahl der parallel geschalteten Traktionsbatteriezellen
$n_{\text{BR}}$	Anzahl der in Reihe geschalteten Traktionsbatteriezellen
$n_{\text{R}}$	Stückzahl der Rotoren
$n_{\text{R,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Rotoren
$n_{\text{S}}$	Stückzahl der Statoren
$n_{\text{S,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Statoren
$P$	Leistung
$Pr$	Prandtl-Zahl
$P_{\text{v}}$	Verlustleistung
$P_{\text{vd}}$	Durchlassverluste
$P_{\text{vs}}$	Schaltverluste
$P_{\text{v},\mu}$	hochfrequente Oberschwingungsverluste
$P_{\text{vw1}}$	Stromwärmeverluste in der Statorwicklung
$p$	Polpaarzahl
$q$	Anzahl der Nuten pro Pol und Stang (Lochzahl)

$R$	Bohrungsradius
$R_1$	Strangwiderstand der Statorwicklung
$R_{1\mu}$	frequenzabhängiger Strangwiderstand für die Oberschwingungsordnung $\mu$
$R_{20}$	Widerstand bei 20°C
$R_{d,Fe}$	Eisenverlustwiderstand in der d-Achse
$Re$	Reynolds-Zahl
$R_{Fe,\mu}$	frequenzabhängiger Eisenverlustwiderstand für die Oberschwingungsordnung $\mu$
$R_i$	temperaturabhängiger Innenwiderstand der Traktionsbatterie
$R_{LM}$	Widerstand eines Leistungsmoduls
$R_{m3}$	Strangwiderstand der dreisträngigen Statorwicklung
$R_{m6}$	Strangwiderstand der sechssträngigen Statorwicklung
$R_{q,Fe}$	Eisenverlustwiderstand in der q-Achse
$R'_r$	auf den Ständer bezogener Rotorwiderstand
$R_{th}$	thermischer Widerstand
$R_Z$	Innenwiderstand einer Zelle der Traktionsbatterie
$r_{A,1}$	Außenradius des Statorblechpakets
$r_{A,2}$	Außenradius des Rotorblechpakets
$r_D$	differentieller Widerstand der Diode
$r_{dyn}$	dynamischer Radradius
$r_{1,1}$	Innenradius des Stators
$r_{1,2}$	Innenradius des Rotorblechpakets (Wellenradius)
$r_T$	differentieller Widerstand des IGBT
$s$	Schlupf
$\mathbf{T}_{dq}$	dq-Transformationsmatrix
$t$	Zeit
$U_1$	Effektivwert der Strangspannung mit Grundfrequenz
$U_{1\mu}$	Effektivwert der Strangspannung mit einer Frequenz der Ordnungszahl $\mu$
$U_B$	Batteriespannung
$U_{CE}$	Kollektor- Emitter-Spannung
$U_{DC}$	Zwischenkreisspannung
$U_Z$	Zellenspannung
$U_{Z0}$	Leerlaufspannung einer Zelle
$u_1$	Strangspannung
$u_{D0}$	Diffusionsspannung der Diode
$u_d$	Spannung in der d-Achse

$u_q$	Spannung in der q-Achse
$u_{T0}$	Schleusenspannung des IGBT
$\hat{u}_\mu$	Amplitude der Spannungsüberschwingung der Ordnungszahl $\mu$
$i_i$	Getriebeübersetzung
$V$	Volumen
$V_C$	Kondensatorvolumen
$V_{EM}$	Bauvolumen der E-Maschine
$V_{LM,m3}$	Gesamtvolumen eines dreiphasigen Leistungsmoduls
$V_{WR,m3}$	Gesamtvolumen eines dreiphasigen Wechselrichters
$v$	Durchflussgeschwindigkeit
$v_F$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$w$	spannungshaltende Windungszahl
$w_{sp}$	Windungszahl einer Spule
$X_{1\mu}$	frequenzabhängige Impedanz für die Oberschwingungsordnung $\mu$
$x_{\text{äq1}}$	äquivalente Breite der Isolationsschicht der Ständerwicklung
$x_{\text{Gehäuse}}$	Gehäusewandstärke
$x_{\text{Kont}}$	Spalthöhe zwischen zwei Kontaktflächen
$Z_{1\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz
$Z_{1d\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz in der d-Achse für die Oberschwingungsordnung $\mu$
$Z_{1q\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz in der q-Achse für die Oberschwingungsordnung $\mu$
$Z_d$	Impedanz in der d-Achse (Längsimpedanz)
$Z_q$	Impedanz in der q-Achse (Querimpedanz)

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{20}$	Temperaturkoeffizienten bei 20°C
$\alpha_{\text{free}}$	Wärmeübergangskoeffizient für freie Konvektion
$\alpha_{\text{Kühlkanal}}$	Wärmeübergangskoeffizient im Kühlkanal
$\alpha_S$	Fahrbahnsteigungswinkel
$\gamma$	elektrischer Winkel zwischen dem statorfesten $\alpha$ - $\beta$ -Koordinatensystem und dem rotorfesten dq-Koordinatensystem
$\gamma'$	Winkelkoordinate
$\Delta\varphi_{d1,d2}$	Phasendifferenz zwischen den beiden d-Systemen des sechssträngigen dq-Ersatzschaltbilds

$\delta$	Luftspaltlänge
$\varepsilon'$	Ordnungszahl einer Leitwertdrehwelle
$\bar{\eta}$	mittlerer Wirkungsgrad im Fahrzyklus
$\vartheta$	Temperatur
$\vartheta_B$	Temperatur der Batterie
$\vartheta_F$	mittlere Kühlmitteltemperatur der Wassermantelkühlung
$\vartheta_{Öl}$	Öltemperatur der Rotorkühlung
$\vartheta_{\text{Umgebung}}$	Umgebungstemperatur
$\lambda$	thermische Leitfähigkeit
$\lambda_{BL}$	Wärmeleitfähigkeit des Elektrolechs
$\lambda_{\delta 0}$	mittlerer Luftspaltleitwert
$\lambda_{\delta s}$	Luftspaltleitwert aufgrund von Eisensättigung
$\mu$	Ordnungszahl einer Oberschwingung
$\nu$	Viskosität
$\nu'$	Ordnungszahl einer Oberwelle
$\xi_{gr, \nu'}$	Zonenwicklungsfaktor der Ordnungszahl $\nu'$
$\xi_{\nu'}$	Wicklungsfaktor der Ordnungszahl $\nu'$
$\rho$	Dichte
$\rho_{\text{Luft}}$	Luftdichte
$\tau_{\text{Nut1}}$	Statornutteilung
$\tau_{\text{Nut2}}$	Rotornutteilung bei der Induktionsmaschine
$\varphi_I$	Phasenwinkel des Carriersignals
$\varphi_i$	Phasenwinkel des Strangstroms
$\varphi_{s, \varepsilon'}$	Phasenwinkel der Leitwertdrehwelle
$\Psi$	magnetischer Verkettungsfluss
$\Psi_d$	resultierender Verkettungsfluss in der d-Achse
$\Psi'_{dr}$	auf den Stator bezogener Rotorverkettungsfluss in der d-Achse
$\Psi_{ges}$	Gesamtverkettungsfluss
$\Psi_L$	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss
$\Psi_{L,d}$	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss in der d-Achse
$\Psi_{L,q}$	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss in der q-Achse
$\Psi_{PM}$	resultierender Verkettungsfluss des Permanentmagnetfelds
$\Psi_q$	resultierender Verkettungsfluss in der q-Achse
$\Psi'_{qr}$	auf den Ständer bezogener Rotorverkettungsfluss in der q-Achse
$\Omega$	Winkelgeschwindigkeit
$\omega$	Kreisfrequenz

## Indizes

1	Stator
2	Rotor
A	außen
ax	axial
äq	äquivalent
B1	Rotorbereich 1
B2	Rotorbereich 2
B3	Rotorbereich 3
Cu	Kupfer
Ch	Chip des Leistungsmoduls
D	Diode
d1	d-Achse des ersten Systems
d2	d-Achse des zweiten Systems
F	Fluid
Fe	Eisen
ges	gesamt
I	innen
Joch1	Statorjoch
Joch2	Rotorjoch
Kont	Kontakt
Konv	konvektiv
LM	Leistungsmodul
M	Mitte
Mag	Magnet
m3	dreisträngige Wicklung
m6	sechsstängige Wicklung
max	Maximum
min	Minimum
Nut1	Statornut
Nut2	Rotornut
Ob	Oberschwingungen
PU	Vergussmaterial
q1	q-Achse des ersten Systems

q2	q-Achse des zweiten Systems
r	Rotorgröße im dq-System
rad	radiale Richtung
Ring	Kurzschlussring des Käfigläufers der Induktionsmaschine
Stab	Stab des Käfigläufers der Induktionsmaschine
Sys	Antriebssystem (E-Maschine und Leistungselektronik)
T	Transistor
th	thermisch
Welle	Rotorwelle
Wk	Wicklungskopf
WL	Wärmeleitung
WR	Wechselrichter
Z	Zylinder
Zahn1	Statorzahn
Zahn2	Rotorzahn

## Abkürzungen

BP	Betriebspunkt
BDL	Temperaturmessgerät
DMW	Drehmomentmesswelle
E-Maschine	elektrische Maschine
IAL	Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IM	Induktionsmaschine
LMG	Leistungsmessgerät
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PMSM	permanentmagneterregte Synchronmaschine
PWM	Pulsdauermodulation
SMZ	Strommesszangen
SoC	State of Charge (Ladezustand der Batterie)
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
BS-Zyklus	kundennaher Fahrzyklus der TU Braunschweig

# Kurzfassung

Die Herstellungskosten von batterieelektrischen Fahrzeugen sind bis heute im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sehr hoch. Konventionelle Fahrzeuge basieren auf Baukastensystemen, die zu einer Stückzahlerhöhung auf Komponentenbasis und damit zu einer Kostenreduktion führen. Für batterieelektrische Fahrzeuge ist zurzeit kein vergleichbares Konzept verfügbar.

In dieser Arbeit werden modulare, skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorgestellt, welche für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingesetzt werden können. Für das modulare Konzept werden Induktionsmaschinen (IM) und permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) verwendet. Ziel ist es, eine Leistungsskalierung zu ermöglichen, bei der der Strangstrom annähernd konstant bleibt, um eine Verwendung identischer Halbleitermodule für die unterschiedlichen Antriebssysteme zu ermöglichen. Dies wird durch eine Längen- und Strangzahlskalierung der E-Maschine erreicht. Dazu werden die Vor- und Nachteile mehrsträngiger E-Maschinen analysiert, um die für das Konzept geeigneten Strangzahlen zu ermitteln. Hierbei wird speziell die Entstehung von Stromüberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen untersucht und ein Verfahren erarbeitet, welches eine Kompensation der Oberschwingungsströme ermöglicht. Dabei stellt sich heraus, dass für das Konzept drei- und sechssträngige Antriebssysteme am besten geeignet sind. Aus diesem Grund werden die Verluste bei Wechselrichterspeisung in diesen Maschinentypen detailliert untersucht. Die Grundsicherungsverluste der sechssträngigen E-Maschinen sind aufgrund des höheren Hauptwellenwicklungsfaktors geringer als die der dreisträngigen Varianten. Die durch die Wechselrichterspeisung entstehenden Oberschwingungsverluste sind dagegen in den sechssträngigen E-Maschinen höher als in den dreisträngigen Varianten. Es werden die Wirkungsgradunterschiede der beiden Maschinentypen (IM und PMSM) in drei- und in sechssträngiger Ausführung analysiert. Mithilfe der erarbeiteten Teilmodelle für Fahrzeug, E-Maschine, Wechselrichter und Batterie wird eine Fahrzeugsimulation durchgeführt und der Energiebedarf des Antriebssystems bestimmt. Zusätzlich werden thermische Modelle der E-Maschinen erarbeitet, mit denen das thermische Verhalten im Fahrzyklus berechnet werden kann. Durch zahlreiche Messungen an zwei Prototypen (IM und PMSM) konnten die Komponentenmodelle validiert werden. Anhand der erarbeiteten Kostenmodelle und der Fahrzeugsimulationen wird gezeigt, dass das modulare, skalierbare mehrsträngige Konzept Kostenvorteile gegenüber nicht modularen Bauweisen hat. Das Bauvolumen der modularen Antriebssysteme ist minimal größer als das der nicht modularen Systeme. Die Energieeffizienz beider Systeme ist annähernd gleich.

## Schlagworte:

Elektromobilität, modulare Antriebssysteme, mehrsträngige Wicklungen, Oberschwingungsströme, Oberschwingungsverluste, thermische Modelle, Fahrzyklussimulation, Energieeffizienz, Herstellungskosten

# Abstract

The production cost of battery-electric vehicles is still very high compared to conventional vehicles with internal combustion engines. Conventional vehicles are based on modular systems that lead to unit increase of their components and to cost reduction. A similar concept for battery-powered vehicles is currently not available.

In this thesis, modular scalable multiphase drive systems for electric vehicles are developed which can be used for different vehicle classes. For this modular concept, induction machines (IM) and permanent magnet synchronous machines (PMSM) are used. The aim is to enable a power scaling in which the phase current remains approximately constant in order to use identical semiconductor modules for different drive systems and power ratings. This is achieved by scaling the length and the number of phases of the electric machine. Thus, the advantages and disadvantages of multiphase electric machines are analyzed in order to determine the appropriate phase numbers for this concept. In particular, current harmonics in multiphase windings are investigated and a method to compensate these current harmonics is developed. Three-phase and six-phase drive systems proved to be best suited for this concept. Therefore, the power losses of inverter fed multiphase IM and PMSM are examined in detail. The fundamental losses of six-phase machines are lower than those of three-phase machines due to the higher winding factor. On the other hand, harmonic losses of six-phase machines due to the inverter supply are higher than those of three-phase machines. The efficiency values of the machines (IM and PMSM) are analyzed for three-phase and six-phase windings.

Component models of the car, the electric machine, the inverter and the battery are developed in this thesis and are used to simulate the energy efficiency of the drive system. In addition, thermal models of the electric machines are developed and the thermal behavior in driving cycles is examined. Measurements on two prototypes (IM and PMSM) were made in order to validate the component models. Based on cost models and vehicle simulations, the modular scalable multiphase concept has cost advantages over non-modular concepts. The dimensions of modular drive systems are minimally larger compared to non-modular systems. However, the energy efficiency of both systems is almost the same.

## Key words:

electric mobility, modular drive systems, multiphase windings, current harmonics, harmonic losses, thermal models, driving cycle simulations, energy efficiency, manufacturing cost