

Martin Voßwinkel

**Ganzheitliche Entwicklung eines
bauraumneutralen, getriebelosen
Radnabenantriebes mit integrierbarer
Leistungselektronik auf Basis einer Geschalteten
Reluktanzmaschine als Antriebseinheit für
hybridische und elektrische Personenkraftwagen**



Ganzheitliche Entwicklung eines bauraumneutralen,
getriebelosen Radnabenantriebes mit integrierbarer
Leistungselektronik auf Basis einer Geschalteten
Reluktanzmaschine als Antriebseinheit für hybridische
und elektrische Personenkraftwagen

-

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und
Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

Martin Voßwinkel, M.Sc.

aus Wipperfürth

-

Referent: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lohner

Tag der mündlichen Prüfung: 01. Februar 2023

Wuppertaler Schriftenreihe zu Elektromobilität und
Energiespeichersystemen

Band 5

Martin Voßwinkel

**Ganzheitliche Entwicklung eines bauraumneutralen,
getriebelosen Radnabenantriebes mit integrierbarer
Leistungselektronik auf Basis einer Geschalteten
Reluktanzmaschine als Antriebseinheit für
hybridische und elektrische Personenkraftwagen**

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9060-4

ISSN 2628-2003

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Am Anfang schaute ich mich um, konnte aber den Wagen, von dem ich träumte, nicht finden (..) Also beschloss ich, ihn mir selbst zu bauen.“

Dr.-Ing. h.c. Ferdinand Porsche
(1875-1951)

Danksagung

Eine Dissertation lässt sich in den seltensten Fällen allein realisieren. Neben Kompetenz, Durchhaltevermögen und Ehrgeiz der eigentlichen Person dieses Vorhaben durchzuführen, ist dies ohne das passende Forschungsumfeld, ohne den passenden Betreuer und vor allem ohne passenden Rückhalt von Freunden und vor allem der Familie nicht zum Erfolg zu führen. Aufgrund dessen möchte ich den Personen, die mich in den vergangenen Jahren meiner Labor- und Hochschultätigkeit nach Kräften unterstützt haben, an dieser Stelle herzlich danken.

Zunächst geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing Benedikt Schmülling, der im Verfahren der kooperativen Promotion zwischen der Bergischen Universität Wuppertal gemeinsamen mit der Technischen Hochschule in Köln mir die Möglichkeit unterbreitet hat, meine Forschungsarbeit im Kölner Labor in Wuppertal zur Dissertation einzureichen. Einen herzlichen Dank dafür.

Prof. Dr.-Ing. Lohner gebührt großer Dank für die großartige Möglichkeit, über all die Jahre hochspannende und inspirierende Forschung im Labor für Elektrische Antriebe durchführen zu dürfen. Dein grenzenloser Optimismus hat mich über all die Jahre geprägt, und die Begeisterung für die SRM hat auch bei mir Wurzeln geschlagen. Die Möglichkeit nahezu unbeschränkt wann, wo und wie ich es für richtig gehalten habe, zu arbeiten und zu forschen war und ist ein großes Privileg, welches ich sehr zu schätzen gelernt habe. Ich danke für das uneingeschränkte Vertrauen, welches ich stets genießen durfte und für die unzähligen Stunden gemeinsamer Forschung und Entwicklung.

Volkmar Platte M.Sc, Tobias Hirche M.Sc und vor allem Sascha Grzeschik B.Sc. danke ich herzlich für die gute Zeit, die wir gemeinsam im Fahrzeug-Labor hatten. Neben den wissenschaftlichen Gesprächen, die wir gemeinsam führen konnten, blieb der Spaß an allem was zwei oder vier Räder hatte nie auf der Strecke. Für die Freundschaft, die über den Labor-Betrieb hinaus ging, danke ich euch.

Des Weiteren Danke ich allen ehemaligen Studenten und Hilfskräften, die mich durch ihre Abschlussarbeiten in meiner Forschung unterstützt haben sowie allen Kollegen des Labors für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe für den stets freundlichen und lockeren Umgang miteinander.

Ich danke meinen Eltern Hans-Josef und Ingrid herzlichst für die bedingungslose Unterstützung seit dem ersten Tag meines Studiums. Ich konnte und kann mich in jeder Lebenssituation auf euch verlassen.

Nicht zuletzt möchte ich der wichtigsten Person in meinem Leben, meiner Frau Lena für all das Danken, was Sie mir in den letzten Jahren und speziell den letzten Wochen ermöglicht hat. Du hast mir stets den Rücken freigehalten, mir Rückhalt gegeben sowie Motivation geschenkt und mich mit Kräften bei meinem Vorhaben unterstützt. Du und unser Sohn Linus mussten viele Stunden auf mich verzichten, vielen Dank für dein Verständnis und deine entgegengebrachte Liebe.

Kurzfassung

Titel: Ganzheitliche Entwicklung eines bauraumneutralen, getriebelosen Radnabenantriebes mit integrierbarer Leistungselektronik auf Basis einer Geschalteten Reluktanzmaschine als Antriebseinheit für hybridische und elektrische Personenkraftwagen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines neuartigen getriebelosen Radnabenantriebes. Hierbei soll die Maschine magnetfrei ausgeführt werden und zudem so in den vorhandenen Bauraum eines Fahrzeuges integriert werden, dass keinerlei Modifikationen an originalen Fahrzeugteilen notwendig werden.

Die Arbeit gibt nach einer kurzen Einleitung einen Einblick in den aktuellen Stand der Technik und erläutert im Anschluss detailliert die Funktionsweise Geschalteter Reluktanzmaschinen und deren zugehöriger Leistungselektronik.

Nach einer ersten theoretischen Machbarkeitsstudie wird ein erstes Funktionsmuster real aufgebaut und erprobt.

Die so gewonnenen Erkenntnisse über die Entwicklung, den Bau sowie den Betrieb einer solchen Maschine werden verwendet, um nachfolgend zwei weitere Maschinengenerationen zu entwickeln und demonstrativ in ein auf dem Markt erhältliches Elektrofahrzeug ohne nennenswerte mechanische Modifikationen zu integrieren.

Die Erprobung der entwickelten Antriebseinheiten im realen Fahrbetrieb, sowie die ausführliche Vermessung des aufgebauten Prototypen in Bezug auf Effizienz sowie Akustik der neuen Antriebsquellen wird ebenso durchgeführt, wie die Applikation neuer Fahrdynamik-Algorithmen wie Torque Vectoring.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Fahrzeuges wird eine Analyse des potentiellen Zielmarktes und daraufhin eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Antriebseinheit hin zu einem gesamten Nachrüst-Kit durchgeführt. Eine Kostenabschätzung für geringe Stückzahlen rundet diese Arbeit ab.

Stichwörter: Radnabenmotor, Geschaltete Reluktanzmaschine, Elektromobilität, Elektrischer Antriebsstrang

Abstract

Title: Holistic Development of gearless Wheel-Hub-Motor with integrated power electronics based on a switched reluctance motor for hybrid and electric vehicles

This contribution deals with the development of a gearless wheel-hub motor. Beside the fact that the machine itself should not make use of permanent magnets, the installation of the machine should be doable without the need of changing original vehicle parts, a so called neutral-Installation-volume is required.

Starting with a short introduction, this thesis gives an overview about state-of-the-art technologies and afterwards diving deep into the mechanical and electrical construction of a switched reluctance machine including its power electronics.

After a first feasibility study, a proof of concept motor is built up and tested.

The gained knowledge during the design, manufacturing and testing of the machine is used to create two generations of magnet-free wheel hub motors. These motors will be implemented in a off the shelf battery electric vehicle without major mechanical changes.

Testing the new drivetrain, its efficiency and NVH-behaviour is as well part of this research as the application of vehicle dynamics algorithms like torque vectoring.

After the successful testing of the project demonstrator vehicle an analyse of the user-market is performed and in consequence the developed drivetrain is transformed into a retro-fitting electrification kit. A first cost estimation for a small series production closes the research work.

Keywords: Wheel Hub Motor, Switched Reluctance Machine, Electro-Mobility, Electrical Powertrain

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockiersystem
ADC	Analog/Digital- Wandler
AP	Arbeitspunkt
ARMEVA	Advanced Reluctance Motors for Electric Vehicle Applications
ASM	Asynchronmaschine
ATC	Aldenhoven Testing Center
AVAS	Acoustic Vehicle Alerting System
BEV	Battery Electric Vehicle
BSB	Blockschaltbild
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CEO	Chief Executive Officer
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CVT	Continous Variable Transmission
DAC	Digital/Analog-Wandler
DGL	Differentialgleichung
DIFC	Direct Instantaneous Force Control
EG	Eigenlenkgradient
EMF	Electromotive Force
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESPS	Early Single Pulse Strategy
eTCM	electronic Traction Control Modul
EU	Europäische Union
EVO	Evolution
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
FM	Felgenmaschine
FSEM	Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HCC	Hysteresis Current Control
HREE	Heavy Rare Earth Element
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LE	Leistungselektronik
LED	Licht emittierende Diode
LREE	Light Rare Earth Element
LV-PEM	Low-Voltage Power Electronics Module
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NVH	Noise Vibration Harshness
PEM	Power Electronic Module
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PMSM	permanentmagnetische Synchronmaschine
PSA	Peugeot Société Anonyme

PVC	Polyvinylchlorid
PWM.....	Pulsdauermodulation
RNM	Radnabenmotor
RN-SRM.....	Radnaben-Reluktanzmaschine
SC	Schlupfkontrolle
SPI	Serial Peripheral Interface
SR4Wheel.....	Switched Reluctance fo(u)r wheel
SRMCU	Switched Reluctance Motor Control Unit
SUV	Sports Utility Vehicle
TH.....	Technische Hochschule
TST	Tiefsetzsteller
TV	Torque Vecotring
UK	United Kingdom
UN	United Nations
UNECE.....	United Nations Economic Comission for Europre
USB	Universal Serial Bus
VKM.....	Verbrennungskraftmaschine, Verbrennungskraftmaschine

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
A	Durchflutete Fläche
$A_{\text{Oberflächen}}$	Oberfläche des Körpers
B_1	Flussdichte bei unausgerichtetem Luftspalt
B_2	Flussdichte bei ausgerichtetem Luftspalt
C_{Dump}	C-Dump Kondensator
C_K	Wärmekapazität des Körpers
c_{Material}	Spezifische Wärmekapazität eines Materials
dW_{mag}	Änderung der magnetischen Energie
$d\delta_{\text{Luft}}$	Änderung der Luftspalllänge
dW_{mech}	Änderung der mechanischen Energie
D_{Buck}	Diode des Tiefsetzstellers
d_1	Länge des unausgerichteten Luftspaltes
d_2	Länge des ausgerichteten Luftspaltes
$E_{\text{Wärme,Spule}}$	In Wärme umgewandelte Energie einer Spule
F_{Maxwell}	Maxwellsche Kraft
F	Betriebsfrequenz der Maschine
F_{Zahn}	Kraft am Rotorzahn
F_{Ges}	Gesamtkraft
f_{Basis}	Grundfrequenz
f_{Aktiv}	Frequenz der aktiven Bestromung
g_M	Genauigkeitsklasse
H_1	Mag. Feldstärke bei unausgerichtetem Luftspalt
H_2	Mag. Feldstärke bei ausgerichtetem Luftspalt
$i(t)$	Phasenstrom
i_M	Stromniveau im Toleranzband
l	Länge des Eisenkerns
$L(\theta)$	Wicklungs-Induktivität
L_d	Ausgerichtete Induktivität einer Phase
L_q	Unausgerichtete Induktivität einer Phase
L_{Buck}	Induktivität des Tiefsetzstellers
l_{Fzg}	Radstand des Fahrzeuges
m	Anzahl der Stator-Stränge
M	Drehmoment der Maschine
M_{Ges}	Gesamtdrehmoment
M_{Nom}	Nominales Drehmoment
$m_{\text{Körper}}$	Masse eines Körpers
M_{Rippel}	Drehmomenten-Welligkeit
M_{Min}	Minimales Drehmoment

M_{Max}	Maximales Drehmoment
N_{R}	Rotorpolanzahl
N_{S}	Statorpolanzahl
n	Drehzahl der Maschine
N	Wicklungsanzahl
p	Anzahl Zähne einer Phase
$P_{\text{Cu-Phase}}$	Kupferverluste einer Phase
$P_1(t)$	Verlustleistung des Körpers
Q_{SRM}	Ausnutzungsgrad einer SRM
R_{m}	Reluktanz
R	Wicklungswiderstand
R_{mL1}	Mag. Widerstand des unausgerichteten Luftspaltes
R_{mL2}	Mag. Widerstand des ausgerichteten Luftspaltes
$R_{\text{Luftspalt}}$	Luftspaltradius
r_{dyn}	Dynamischer Reifenradius
R_{Kurve}	Kurvenradius
s_{Rad}	Radschlupf
T_{Buck}	Schalter des Tiefsetzstellers
$t_{\text{Sim,gesamt}}$	Gesamte Simulationszeit
t_{AP}	Simulationszeit eines Arbeitspunktes
$u(t)$	Phasenspannung
U_{DC}	Zwischenkreisspannung
U_{Trac}	Traktionsbatteriespannung
$U_{\text{C-Dump}}$	Spannung des C-Dump Kondensators
V_1	Volumen des unausgerichteten Luftspaltes
V_2	Volumen des ausgerichteten Luftspaltes
v_{Rad}	Radgeschwindigkeit
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
W_{d}	gespeicherte magnetische Energie
W_1	Energie des unausgerichteten Luftspaltes
W_2	Energie des ausgerichteten Luftspaltes
W_{K}	Wärmeübergangswiderstand
x	Eingangsgröße des Einkörper-Modells
y	Ausgangsgröße des Einkörper-Modells
Z_{P}	Anzahl der gleichen magnetischen Felder
α_{L}	Wärmeleitung
α_{K}	Konvektion
α_{s}	Strahlung
α_{Gesamt}	Gesamter Wärmeübergangskoeffizient
ΔW^*	Magnetische Koenergie

ΔW	Energiedifferenz im Luftspalt
Δx	Translatorische Strecke des Rotorzahns
$\Delta \vartheta(t)$	Temperaturdifferenz des Körpers zur Umgebung
ΔL	Reduktion der Lautstärke
δ	Lenkwinkel
$\delta_{\text{Ackermann}}$	Ackermann-Lenkwinkel
θ_{el}	Elektrischer Winkel der Maschine
θ_{Schritt}	Schrittwinkel der Maschine
$\theta_{\text{Phase-Phase}}$	Winkelabstand zweier Phasen
$\theta_{\text{q}} ; \theta_{\text{Unaligned}}$	Unausgerichtete Position einer Phase
$\theta_{\text{d}} ; \theta_{\text{Aligned}}$	Ausgerichtete Position einer Phase
θ_{An}	Winkel der aktiven Bestromung
θ	Magnetische Durchflutung
λ	Schenkligkeit der Maschine
μ_0	Permeabilität des Vakuums
μ_{r}	Permeabilität eines Materials
Σ_{AP}	Gesamtanzahl der Arbeitspunkte
τ_1	Thermische Zeitkonstante des Körpers
Φ_1	Fluss bei unausgerichtetem Luftspalt
Φ_2	Fluss bei ausgerichtetem Luftspalt
$\dot{\psi}_{\text{Soll}}$	Soll-Gierate
Ψ	Verketteter magnetischer Fluss
ω	Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	12
1.1 Motivation und Ziel dieser Arbeit.....	13
1.2 Historie.....	17
1.3 Stand der Technik	19
1.3.1 Entwickelte Radnabenmaschinen	19
1.3.2 Geschaltete Reluktanzmaschinen in Zentral-Traktionsantrieben	28
1.3.3 Vergleich aktuell verbreiteter Traktionsmaschinen-Technologien	31
2 Aufbau und Funktionsprinzip der Geschalteten Reluktanzmaschine	34
2.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	34
2.1.1 Reluktanz.....	34
2.1.2 Reluktanzkraft	35
2.1.3 Bauweise.....	36
2.2 Energieumsatz und Drehmoment-Entwicklung.....	42
2.2.1 Drehmomentgleichung	50
2.3 Grundlegende Umrichtertopologien und deren Steuerungsverfahren	53
2.3.1 Halbgesteuerte H4-Brücken-Topologie.....	53
2.3.2 C- Dump Topologie.....	56
3 Forschungsprojekt SR4Wheel.....	60
3.1 Idee des Felgenantriebes und der Fahrzeugintegration.....	60
3.2 Projektübersicht und Forschungsinhalt.....	63
3.3 Festlegung von zu erreichenden Zielgrößen / Lastenheft	67
4 Machbarkeitsstudie und Voruntersuchungen // Evo 0	70
4.1 Konzeption, Konstruktion und Ausführung.....	74
4.1.1 Elektromagnetische Auslegung	75
4.1.2 Prototypische Leistungselektronik & Maschinensteuerung	86
4.1.3 Mechanische Konstruktion.....	89

4.1.4	Ausführung	90
4.2	Validation der FEM-Simulation	92
4.2.1	Statische Vermessung der Maschine	94
4.2.2	Dynamische Vermessung der Maschine.....	97
4.3	Verifikation des mechanischen / elektrischen / thermischen Konzeptes	102
5	Software-Tools zur ganzheitlichen Entwicklung einer RN-SRM.....	106
5.1	Entwicklung eines Mehrkörper-Temperaturmodells in MATLAB Simulink	106
5.1.1	Konzeption und Entwicklung	106
5.1.2	Validierung mittels realer Messergebnisse.....	115
5.1.3	Verwendung zur thermischen Auslegung der Maschine.....	116
5.2	Entwicklung eines Maschinenmodells auf Basis von MATLAB-Simulink..	118
5.2.1	Problemstellung der FEM-Simulation.....	118
5.2.2	Konzeption und Entwicklung	119
5.2.3	Validierung des Modells durch Vergleich mit der FEM-Simulation	124
5.2.4	Zeiteffiziente Untersuchung bestehender Maschinen-Geometrien	127
6	Entwicklung einer bauraumneutralen getriebelosen RN-SRM // Evo I.....	130
6.1	Konzeption der integrierten Leistungselektronik.....	130
6.1.1	Power Electronic Module // PEM.....	131
6.1.2	Switched Reluctance Motor Control Unit // SRMCU	138
6.2	Elektromagnetisches Design	143
6.3	Mechanisches Design.....	153
6.4	Fertigungsverfahren	162
6.5	Prüfstands-Vermessung und Validation der Simulationsergebnisse	164
6.6	Installation und Inbetriebnahme im Fahrzeug	167
7	Weiterentwicklung der RN-SRM zum Verbau auf der Vorderachse // Evo 2	170
7.1	Elektromagnetisches Design	170
7.2	Mechanisches Design.....	172
7.3	Fertigung, Inbetriebnahme & Installation im Fahrzeug.....	176
8	Systemüberblick.....	182
8.1	Hochvolt-Topologie.....	182
8.2	Steuergeräte-Topologie.....	184
8.3	Implementierte Fahrdynamik-Algorithmen der eTCM	186
9	Validierung und Evaluierung grundlegender Funktionen.....	192

9.1	Überprüfung auf Erfüllung der definierten Ziele	192
9.2	Versuchs- sowie Applikationsfahrten	195
9.2.1	Effizienz-Vermessung sowie Verbesserungsansätze.....	195
9.2.2	Applikation Schlupfkontrolle	200
9.2.3	Applikation Torque-Vectoring	202
10	NVH-Verhalten der Radnaben-SRM	208
10.1	Geräuschübertragungspfade der SRM	208
10.2	Unterschiedliche Möglichkeiten der Akustik-Einflussnahme.....	215
10.2.1	Möglichkeiten des Hardware Designs	215
10.2.2	Möglichkeiten des Software Designs.....	220
10.3	Validation des Single-Pulse Betriebes durch Akustik-Vermessung	226
10.4	Übersicht über die Wirksamkeit der Maßnahmen.....	228
11	Ergebnis des Forschungsprojektes SR4Wheel.....	230
11.1	Fazit der Forschung.....	230
11.2	Ansätze zur Weiterentwicklung	232
11.2.1	Analyse des potentiellen Zielmarktes	232
11.2.2	Mechanische und elektrische Weiterentwicklungsansätze	234
11.2.3	Kostenanalyse eines Antriebsstranges in Vorserie	242
12	Zusammenfassung und Ausblick	244
A	Abbildungsverzeichnis	I
B	Tabellenverzeichnis	VIII
C	Literaturverzeichnis	X
Anhang	XIV
	Lebenslauf.....	XXV
	Aufstellung der Publikationen im Projekt-Kontext.....	XXVII
	Weitere Publikationen	XXVII
	Liste aller Veröffentlichungen (inkl. Print- und Digital-Medien).....	XXVIII
	Aufstellung der betreuten Abschlussarbeiten.....	XXXI