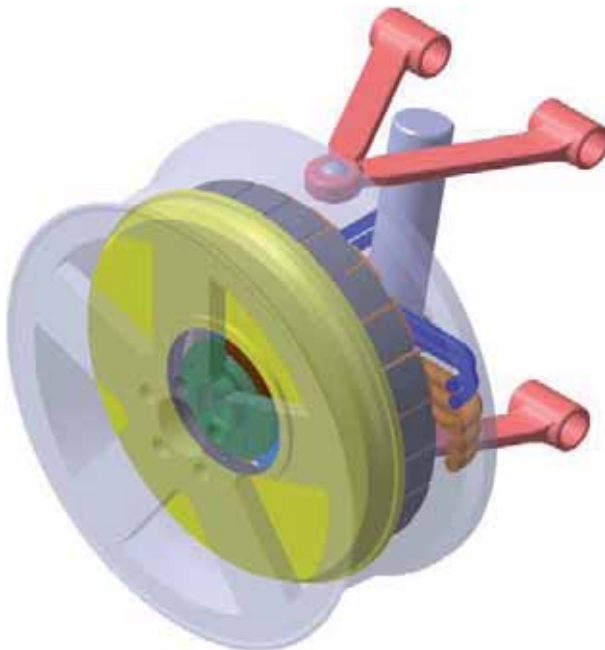


Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Benedikt Höfner

# Integrations- und Systemanalyse elektrischer Radnabenantriebe für zukünftige Pkw-Elektrofahrzeuge









# **Integrations- und Systemanalyse elektrischer Radnabenantriebe für zukünftige Pkw-Elektrofahrzeuge**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität der Bundeswehr München

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Benedikt Höfner



Neubiberg  
2010

Vorsitzender: Prof. Dr. rer.nat. Mathias Richter

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Berichterstatter: Prof. Dr. rer.nat. Werner Tillmetz

Tag der Promotion: 16.07.2010

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 7

**Benedikt Höfner**

**Integrations- und Systemanalyse  
elektrischer Radnabenantriebe für  
zukünftige Pkw-Elektrofahrzeuge**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9354-3

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)



## Danksagung

Den langen Weg einer Doktorarbeit geht man nie alleine. Daher will ich an dieser Stelle die Gelegenheit ergreifen, all den Personen zu danken, die mich während meines Promotionsvorhabens begleitet haben.

Zuallererst möchte ich Herrn Prof. Dr. Dieter Gerling einen besonders herzlichen Dank aussprechen. Er hat mich in seiner Rolle als Doktorvater stets bestens unterstützt, hatte zu jeder Zeit ein offenes Ohr für mich und hat durch zahlreiche wertvolle Anregungen und konstruktive Diskussionen einen entscheidenden Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit geleistet.

Zusätzlich danke ich den vielen Kollegen der Daimler AG, die mich unterstützt haben. Ganz besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Jürgen Friedrich, der mir vom ersten Tag an sowohl in organisatorischen, wie auch in fachlichen Aspekten stets tatkräftig zur Seite stand und ebenfalls mit vielen Beiträgen zum Gesamtergebnis der Arbeit beigetragen hat. Weiter möchte ich Herrn Rainer Bauer und Herrn Martin Gruber danken, die mir in ihren Teams genug Freiraum zur Umsetzung meiner Ideen und Vorhaben gegeben haben. Besonderer Dank gilt auch Herrn Volker Hartmann, mit dem ich viele Gespräche führen und gemeinsame Projekte beschreiten konnte, deren Ergebnisse sich nun ebenfalls in dieser Arbeit wiederfinden. Zusätzlich sei an dieser Stelle den Herren Joachim Kieserling, Helmut Luncz, Dr. Ralf Krause, Hartmut Goetzen, Prof. Dieter Ammon und Thomas Schirle für die zahlreichen Fachgespräche und Anregungen zu meiner Arbeit ein Dank ausgesprochen.

Zu guter letzt möchte ich meiner ganzen Familie danken, die mir auf privater Seite den nötigen Rückhalt gegeben hat. Abschließend entschuldige ich mich bei allen Personen, die ich vergessen haben sollte und ganz besonders bei meiner großen Liebe Lisa für die vielen Stunden, die ich am Wochenende vor dem Computer verbracht habe. Vielen Dank für Deine Geduld!

Ich hatte das Glück, auf ein sehr spannendes und herausforderndes Thema zu treffen, das mich in den dreieinhalb Jahren meines Promotionsvorhabens stets auf Trab gehalten hat und durch das ich viele faszinierende Persönlichkeiten kennenlernen konnte. Ich würde es wieder tun.

Benedikt Höfner im Juli 2010



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden elektrische Radnabenantriebe für zukünftige Pkw-Elektrofahrzeuge einer Integrations- und Systemanalyse unterzogen. Radnabenantriebe schaffen Bauraum im Rohbau eines Fahrzeugs, der für andere Antriebsstrangkomponenten genutzt werden kann, und bieten bei Einsatz an allen vier Rädern Mehrfunktionalitäten wie einen elektrischen Allradantrieb und radselektive Drehmomenten- und Drehzahlkoordination und damit Möglichkeiten des Torque-Vectoring, der aktiven Lenkunterstützung und eines erweiterten elektronischen Stabilitätsprogramms, das einzelne Räder nicht nur gezielt verzögern, sondern auch gezielt beschleunigen kann. Hinzu kommen eine dreifache Antriebsredundanz und ein im Vergleich zu einer zentralen Traktions-E-Maschine unkritischeres Verhalten im Fehlerfall.

Diesen Potentialen stehen folgende Nachteile gegenüber: Der Einsatz von vier Radnabendirektantrieben statt einer zentralen E-Maschine mit angeflanschem Getriebe hat eine hohe Systemkomplexität zur Folge. Neben vier E-Maschinen müssen zur Steuerung und Regelung auch vier Leistungselektroniken zum Einsatz kommen. Dies und der Umstand, dass durch den verteilten Einsatz im Rad der Leitungs- und Kontaktierungsaufwand stark ansteigen, führt zu deutlich höheren Systemkosten, was den ohnehin schon sehr hohen Kostenanspannungsgrad bei Elektrofahrzeugen weiter verschärft. Hinzu kommt, dass Radnabenantriebe durch den Wegfall eines Getriebes in ihrer elektromagnetischen Auslegung prinzipbedingt Nachteile gegenüber einer E-Maschine mit angeflanschem Getriebe besitzen und in der Folge einen geringeren Systemwirkungsgrad aufweisen, was sich wiederum negativ auf die Fahrzeugreichweite auswirkt. Um dies zu kompensieren, müsste eine größere HV-Batterie im Fahrzeug installiert werden, die den Bauraumvorteil durch Radnabenantriebe reduziert und weitere Kosten verursacht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es zielführende Konzepte gibt, Radnabenantriebe bei Erfüllung aller gestellten Anforderungen, wie ausreichende Performance und geringer Wartungsaufwand, zusammen mit einem mechanischen Bremssystem ins Rad zu integrieren. Ebenso wird gezeigt, dass Radnabenantriebe attraktive Mehrfunktionalitäten besitzen, die ein Antriebsstrang mit zentraler E-Maschine an einer Fahrzeugachse so nicht bieten kann. Ebenso lässt sich feststellen, dass die Auswirkungen von erhöhten ungefederten Radmassen bei einem Einsatz von Radnabenantrieben durch entsprechende Anpassung der Fahrwerks-Dämpfungssysteme kompensiert werden können. Auf der anderen Seite hat der Einsatz von Radnabenantrieben einen starken Anstieg der Antriebsstrangkosten zur Folge. Dieser Umstand und die Tatsache, dass Radnabenantriebe einen geringeren Systemwirkungsgrad bieten und weniger Bauraum im Fahrzeugrohbau schaffen als zunächst angenommen, führt zu der Schlussfolgerung, dass der Einsatz von vier Radnabenantrieben aus heutiger Sicht nicht empfehlenswert ist. Erst eine starke Senkung der Systemkosten kann die Potentiale von Radnabenantrieben wieder in den Fokus bringen und so einen Einsatz dieser Technologie begünstigen.



## Abstract

In this thesis, electric wheel hub motors for future electric passenger cars are subject to an integration- and system-analysis. Wheel hub motors create installation space in the bodyshell of a vehicle that can be used for other drivetrain components and – if installed at all four wheels – offer features like an electric four-wheel-drive, single-wheel torque- and speed-coordination and thus possibilities of torque-vectoring, active steering and an advanced electronic stability program that can not only decelerate, but also accelerate the wheels independently. Furthermore, there is also a triple drive redundancy and – compared to a central electric motor with flanged gearbox – an uncritical fault tolerance behavior.

These potentials are facing the following disadvantages: The use of four wheel hub motors instead of a central electric motor with flanged gearbox results in a high system complexity. In addition to the four electric motors there is also the need for four power electronics to control and regulate these electric motors. This, and the fact that distributed motors and power electronics require a more complex wiring and contacting architecture, leads to significantly higher system costs, intensifying the already high tension level of costs for electric vehicles. In addition, wheel hub motors have disadvantages regarding the electromagnetic design compared to an electric motor with flanged gearbox and subsequently have a lower system efficiency, which in turn leads to a lower vehicle range. To compensate for this, a larger HV-battery would have to be installed which would reduce the space advantage in the bodyshell and add further costs.

In summary, there are feasible concepts to integrate wheel hub motors in addition to a mechanical braking system into the rim of a wheel in compliance with all requirements, such as adequate performance and low maintenance. It is also shown that wheel hub motors offer additional features that cannot be provided by a central electric motor. Furthermore, it is determined that the impact of increased unsprung wheel masses due to wheel hub motors can be compensated by adjusting the suspension damping systems. On the other hand, the use of four wheel hub motors increases the drivetrain costs. This, and the fact that wheel hub motors offer a lower system efficiency and create less space in the vehicle bodyshell than initially assumed, leads to the conclusion that the use of four wheel hub motors is not recommended from today's perspective. Only a strong reduction of system costs can bring the potentials of wheel hub motors back into focus and promote the use of this technology.



## INHALTSVERZEICHNIS

1	Motivation zur Untersuchung von Radnabenantrieben .....	5
1.1	Nachhaltige individuelle Mobilität durch Elektrifizierung .....	5
1.1.1	Wert der individuellen Mobilität.....	5
1.1.2	Globale Herausforderungen .....	5
1.1.3	Mögliche Lösungswege für die Automobilindustrie .....	6
1.2	Kraftfahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang .....	7
1.2.1	Verbrennungsmotor-Hybridfahrzeuge .....	7
1.2.2	Brennstoffzellen-Hybrid- und Batterie-elektrische Fahrzeuge .....	14
1.3	Aufgabenstellung .....	20
1.4	Struktur der Arbeit .....	23
2	Radkomponenten bei Einsatz von Radnabenantrieben.....	24
2.1	Elektrische Maschine.....	24
2.1.1	Grundlagen.....	24
2.1.2	Betriebsgrenzen .....	26
2.1.3	Gleichstrommaschinen .....	27
2.1.4	Drehstrom-Asynchronmaschinen .....	29
2.1.5	Drehstrom-Synchronmaschinen .....	31
2.1.6	Reluktanzmaschinen .....	34
2.1.7	Weitere E-Maschinenbauarten .....	36
2.2	Bremssystem .....	36
2.2.1	Aufgaben .....	36
2.2.2	Scheibenbremssystem .....	39
2.2.3	Trommelbremssystem .....	41
2.2.4	Elektrisches Bremssystem .....	42
2.3	Radaufhängung .....	43
2.3.1	Aufbau und Komponenten.....	43
2.3.2	Ungefederte Massen .....	44
2.3.3	Fahrwerkskinematik.....	45
3	Stand der Radnabenantriebstechnologie.....	47
3.1	Eine kurze Geschichte des Radnabenantriebs.....	47

---

3.1.1	Die Geburt des Automobils .....	47
3.1.2	Lohner-Porsche .....	48
3.1.3	Lunar Roving Vehicle.....	50
3.1.4	Heutige Systeme aus dem nicht-automobilen Bereich .....	51
3.2	Marktübersicht der Pkw-Radnabenantriebskonzepte.....	53
3.2.1	Bluwav Systems.....	53
3.2.2	Bridgestone .....	54
3.2.3	Eliica .....	57
3.2.4	General Motors .....	59
3.2.5	LineCar .....	60
3.2.6	Magnet Motor.....	62
3.2.7	Michelin.....	63
3.2.8	Mitsubishi .....	65
3.2.9	PML-Flightlink .....	67
3.2.10	TM4.....	68
4	Einschränkung des Untersuchungsgebietes .....	70
4.1	Zielführende E-Maschinenbauarten .....	70
4.2	Schlussfolgerungen aus der Radnabenantriebs-Marktübersicht.....	73
4.3	Zu untersuchende geometrische Bauformen .....	77
4.4	Zu untersuchende Bremssysteme.....	78
4.5	Fazit .....	78
5	Neue Konzepte zur Integration von Radnabenantrieben .....	79
5.1	Generierung von Topologien.....	79
5.2	Bewertungsstufe 1 .....	80
5.3	Generierung von Varianten .....	81
5.4	Bewertungsstufe 2 .....	84
5.5	Generierung von Untervarianten .....	85
5.6	Bewertungsstufe 3 .....	88
5.7	Bewertungsstufe 4 .....	92
5.7.1	Gewichtung der Hauptkategorien und Bewertungskriterien .....	92
5.7.2	Aufbau der Bewertungsmatrix.....	95
5.7.3	Beschreibung der einzelnen Bewertungskriterien.....	97



---

5.7.4	Bewertungsergebnis.....	111
6	3D-Konstruktionen der besten Untervarianten in CATIA .....	125
6.1	Vorbemerkung .....	125
6.2	Performanceanforderungen an einen Radnabenantrieb .....	126
6.3	Untervariante 1.1.3d .....	127
6.4	Untervariante 1.1.2a / 1.1.2b .....	130
6.5	Untervariante 1.1.4 .....	133
6.6	Untervariante 1.2.3c .....	136
6.7	Untervariante 5.1.1c .....	139
6.7.1	Ausführungsbeispiel 1 .....	139
6.7.2	Ausführungsbeispiel 2 .....	141
6.8	Fazit.....	142
6.8.1	Plausibilisierung der Bewertung .....	142
6.8.2	Das beste Integrationskonzept.....	148
7	Zentrale E-Maschine gegenüber vier Radnabenantrieben .....	149
7.1	Zielsetzung und Performanceanforderungen .....	149
7.2	Antriebsstrang mit zentraler E-Maschine.....	152
7.2.1	Fahrzeugarchitektur.....	152
7.2.2	Zentrale E-Maschine mit angeflanschem Getriebe .....	153
7.2.3	Leistungselektronik.....	154
7.2.4	HV- und Kühlleitungen.....	155
7.3	Antriebsstrang mit vier Radnabenantrieben .....	156
7.3.1	Fahrzeugarchitektur.....	156
7.3.2	Radnabendirektantrieb .....	157
7.3.3	Leistungselektroniken.....	159
7.3.4	HV- und Kühlleitungen.....	160
7.4	Bewertung .....	160
7.4.1	Vorbemerkung.....	160
7.4.2	Komponentenanzahl .....	161
7.4.3	Bauraumvolumen .....	162
7.4.4	Gesamtgewicht.....	164
7.4.5	Gesamtkosten .....	165

7.4.6	Wirkungsgrad.....	168
7.4.7	Funktionalität.....	171
7.4.8	Sicherheit.....	174
7.5	Ergebnis des Vergleichs im Überblick.....	183
8	Offene Analysepunkte und Ausblick.....	186
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	188
9.1	Grundlegendes.....	188
9.2	Fazit der Integrationsanalyse .....	189
9.3	Fazit der Systemanalyse und des Antriebsstrangvergleichs.....	189
9.4	Schlussbemerkung.....	191

## ANHANGSVERZEICHNIS

Formelverzeichnis.....	A1
Quellenverzeichnis.....	A2
Abbildungsverzeichnis.....	A3
Tabellenverzeichnis.....	A4
Radnabenantriebe im Pkw- und Busbereich.....	A5
Übersicht aller Untervarianten.....	A6
Gewichtung der Bewertungskriterien.....	A7
Ergebnismatrix der Bewertungsstufe 4.....	A8
Untervariante 1.1.3d.....	A9
Untervariante 1.1.2a / 1.1.2b.....	A10
Untervariante 1.1.4.....	A11
Untervariante 1.2.3c.....	A12
Untervariante 5.1.1c – Ausführungsbeispiel 1.....	A13
Untervariante 5.1.1c – Ausführungsbeispiel 2.....	A14
Radnabenantriebsprototyp.....	A15