

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Nr. 814

Dipl.-Ing. Andreas Zörnig,
Magdeburg

Methodische Konstruktion elektrischer Radnaben- motoren für Fahrzeuge





OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

MB

FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

Methodische Konstruktion elektrischer Radnabenmotoren für Fahrzeuge

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Andreas Zörnig

geb. am 07.06.1981 in Stendal

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Roland Kasper

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Promotionskolloquium am 22.03.2021

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Andreas Zörnig,
Magdeburg

Nr. 814

Methodische Konstruktion
elektrischer Radnaben-
motoren für Fahrzeuge

VDI verlag

Zörnig, Andreas

Methodische Konstruktion elektrischer Radnabenmotoren für Fahrzeuge

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 814. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

204 Seiten, 146 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18-381412-1, ISSN 0178-9449,

€ 71,00/VDI-Mitgliederpreis € 63,90.

Für die Dokumentation: Radnabenmotor – Radnabenantrieb – Einzelradantrieb – Direktantrieb – Luftspaltwicklung – Synchronmaschine – Methodisches Konstruieren – Elektrofahrzeug – Elektromobilität – Bremse

Keywords: wheel hub motor – wheel hub drive – single wheel drive – direct drive – air gap winding – synchronous machine – systematic design – electric vehicle – electromobility – brake

Mit elektrischen Radnabenmotoren kann ein Beitrag zur Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen und Kleinstfahrzeugen geleistet werden. In dieser Arbeit wird das methodische Konstruieren nach Pahl und Beitz angewandt, um neuartige Varianten von getriebelosen Radnabenmotoren zu erschaffen. Es sind permanenterregte Außenläufer-Synchronmaschinen mit Luftspaltwicklung. Ein Schwerpunkt ist der konzeptionelle und gestalterische Leichtbau. Weiterhin wird eine hohe Leistungsdichte durch einen möglichst geringen Luftspalt trotz radlastbedingter Deformation angestrebt. Eine geringe Verengung des Luftspalts wird durch eine sehr steife Radlagerung oder eine Ausgleichkupplung zwischen der Lagerung des Rades und des Rotors erzielt. Die Motorentwürfe unterscheiden sich hauptsächlich in der Radlagerung, der Bremse und der Radanbindung. Es folgen Messungen zur Reibung, Erwärmung und Leistung an den wasser- und luftgekühlten Prototypen.

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 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.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

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 0178-9449

ISBN 978-3-18-381412-1

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit ist ein Ergebnis aus der Forschungsaktivität der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) auf dem Gebiet der elektrischen Radnabenmotoren. Mein Schwerpunkt innerhalb der Forschergruppe lag insbesondere auf der Konstruktion, Berechnung und Vermessung der Motoren. Ich bedanke mich für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung der verschiedenen Förderprojekte. Insbesondere danke ich dem Land Sachsen-Anhalt, der Bundesrepublik Deutschland sowie der Europäischen Union, welche die Projekte *COMO* (Competence in Mobility) und *ELISA* (elektromobil, leicht, intelligent für Sachsen-Anhalt) ermöglicht haben. Darüberhinaus konnte durch die Unterstützung des Landes Sachsen-Anhalt die Fertigung von Radnabenmotoren für das Elektrofahrzeug *Editha-Drei* realisiert werden. Weiterhin bedanke ich mich bei der Firma Bergische Achsen (BPW) aus Wiehl für die industrielle Forschungsförderung, woraus der Generator zur Erzeugung elektrischer Energie im Sattelaufleger erst entstehen konnte. Einen ganz herzlichen Dank gilt der Firma Elektromotoren und Gerätebau Barleben (EMB) für die jahrelange finanzielle als auch praktische Unterstützung in all den Projekten. Ich danke der Aluminiumgießerei TRIMET aus Harzgerode und der Rapid-Prototyping Firma citim aus Barleben für die reibungslose Zusammenarbeit im Projekt *ELISA*.

Ich möchte mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Kasper für die intensive fachliche Betreuung, die gute Zusammenarbeit am Lehrstuhl für Mechatronik und die Anregungen zur Umsetzung neuartiger Ideen bedanken. Außerdem bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote für die bereitwillige Übernahme des Gutachtens und die gute Zusammenarbeit am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik.

Mein Dank gilt zudem Herrn Prof. Jan Bäse vom Institut für Industrial Design der Hochschule Magdeburg-Stendal für die gemeinschaftliche Erschaffung eines besonders schönen Radnabenmotors.

Auch wenn nicht jeder einzeln benannt wird, danke ich all meinen Kollegen, der unterschiedlichen ingenieurwissenschaftlichen Institute der OVGU, für die theoretische, praktische und menschliche Unterstützung. Besonders dankbar bin ich für die intensive und hilfreiche Zusammenarbeit mit Ralf, Norman, Wolfgang, Olaf, Uwe und Fabian.

Ich möchte besonders die gute praktische Unterstützung durch Herrn Höhne und Sebastian von der Firma EMB betonen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinen Freunden Christian, Uta, Kati und Daniel sowie meinen Eltern und meiner Schwester Kerstin, die mich liebevoll in der ganzen Zeit unterstützt haben und somit entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Formelzeichenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XIV
Kurzfassung.....	XVII
Abstract.....	XVIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Entwicklungsziele und Vorgehensweise.....	2
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Einsatz und Verbreitung von Radnabenmotoren.....	5
2.2 Vergleichskriterien für Radnabenmotoren.....	8
2.3 Vorstellung von Radnabenmotoren.....	8
2.4 Vergleich elektrischer Radnabenmotoren.....	24
3 Bestandteile eines Radnabenmotors.....	26
3.1 Elektroantriebe.....	26
3.1.1 Gestaltelemente einer elektrischen Maschine.....	26
3.1.2 Elektrische Maschinenprinzipien.....	28
3.1.3 Grundlagen der Luftspaltwicklung.....	30
3.1.4 Angewandte Werkstoffe der Elektrotechnik.....	32
3.1.5 Zuverlässigkeit der elektrischen Bauteile.....	32
3.1.6 Erkennung von Luftspaltverengung.....	33
3.1.7 Gegenmaßnahmen bei Ausfall der elektrisch aktiven Einheit.....	34
3.2 Wälzlager.....	34
3.2.1 Wälzlagertypen.....	34
3.2.2 Radlager.....	36
3.2.3 Nachgiebigkeit.....	38
3.2.4 Tragfähigkeit.....	39
3.2.5 Ermüdungslebensdauer.....	40
3.2.6 Schädigende Einflüsse für Wälzlager in Radnabenmotoren.....	41
3.2.7 Reibung.....	42

3.2.8	Dynamische Dichtungen	43
3.2.9	Elemente zur starren axialen Festlegung	44
3.3	Maschinenelemente zur Drehmomentübertragung	45
3.3.1	Ausgleichskupplungen	45
3.3.2	Schaltbare Kupplungen	47
3.3.3	Welle-Nabe-Verbindungen	47
3.3.4	Starre Axialverbindungen zur Drehmomentübertragung.....	48
3.3.5	Reibung an querbelasteten Schraubenverbindungen	48
3.4	Bremsen.....	50
3.4.1	Bremsenarten	50
3.4.2	Innenumgriffene Bremsscheiben	52
3.4.3	Erwärmung der Bremse	53
3.4.4	Werkstoffe für Reibkörper	54
3.5	Berechnungsgrundlagen zur Kühlung und Strömung	55
3.5.1	Kühlungsarten	55
3.5.2	Wärmedurchgang.....	55
3.5.3	Strömung im Rohr	56
3.5.4	Strömung im Luftspalt	57
4	Anforderungen an Radnabenmotoren.....	59
4.1	Geometrische Randbedingungen	59
4.2	Energiefluss	61
4.3	Kinematik	61
4.4	Kräfte	61
4.5	Elektrische Funktionselemente.....	62
4.6	Umgebung	63
4.7	Lebensdauer und Sicherheit.....	63
4.8	Wahrnehmung.....	64
4.9	Fahreigenschaften	64
4.10	Materialkreislauf	65
5	Konzeption	66
5.1	Funktionsstruktur.....	66
5.2	Konzeption von Funktionseinheiten	67
5.2.1	Symbole für Funktionselemente	67
5.2.2	Radvarianten.....	69
5.2.3	Lagervarianten	70

5.2.4	Varianten der elastischen Entkopplung	72
5.2.5	Bremsenkonzepte	74
5.2.6	Bauvarianten der elektrisch aktiven Einheit	76
5.2.7	Flüssigkeitskühlung der Wicklung.....	78
5.2.8	Rotorzylinder	79
5.2.9	Geometrische Maßnahmen gegen eine Berührung im Luftspalt	81
5.2.10	Seitendeckel des Rotors	81
5.3	Gesamtkonzepte	82
5.3.1	Konzeption des Elisa-Zwei-Motors	82
5.3.2	Darstellung ausgewählter Gesamtkonzepte	85
5.3.2.1	Außenrotierende Radlagerung	85
5.3.2.2	Innenrotierende Radlagerung.....	87
5.3.2.3	Beidseitige Radlagerung	89
5.3.2.4	Entkopplung durch versatzausgleichende Kupplung	90
6	Entwürfe von Radnabenmotoren	92
6.1	Radnabenmotoren mit außenrotierender Radlagerung.....	92
6.2	Radnabenmotoren mit innenrotierender Radlagerung	97
6.3	Radnabenmotoren mit beidseitiger Radlagerung.....	102
6.4	Radnabenmotoren mit versatzausgleichender Kupplung.....	104
6.5	Bewertungskriterien.....	109
6.6	Prototypenfertigung	110
7	Berechnung und Messung	113
7.1	Gewichtsverteilung.....	113
7.2	Lebensdauer und Steifigkeit der Radlagerung.....	120
7.3	Reibungsverluste	121
7.4	Erwärmungsprüfung	126
7.4.1	Erwärmungsprüfung des Elisa-Drei-Statots.....	126
7.4.2	Erwärmungsprüfung des Achsgenerators.....	132
7.4.3	Vergleich des Elisa-Drei-Motors mit dem Achsgenerator.....	135
7.5	Fahrversuche	137
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
A	Anhang	142
A.1	Radnabenmotoren	142
A.2	Anforderungen	143

A.3	Gesamtkonzepte	144
A.3.1	Außenrotierende Lagerung	144
A.3.2	Innenrotierende Lagerung	146
A.3.3	Beidseitige Lagerung.....	148
A.3.4	Elastische Entkopplung	151
A.4	Entwürfe der Motoren.....	154
A.5	Bauteile und Prototypen	161
A.6	Leistungsmessung des Elisa-Drei-Motors	164
	Literaturverzeichnis	165

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a_W	mm	mittlerer Lagerabstand
A_S	mm^2	Spannungsquerschnitt
a_1	—	Faktor für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Wälzlagers
a_{ISO}	—	Faktor für die Förderung der Lebensdauer des Wälzlagers
A	m^2	Fläche
A_K	mm^2	Kanaloberfläche
A_{KQ}	mm^2	Querschnittsfläche des Kanals
b_D	mm	Breite der Berührfläche der Dichtung
b_W	mm	Abstand zwischen den Wälzlagern
B_{eff}	T	effektive magnetische Flussdichte
B_{max}	T	Sättigungsflussdichte
B_W	mm	Wälzlagerbreite
c_p	$kJ/kg \cdot K$	spezifische Wärmekapazität
c_{Wr}	$N/\mu m$	radiale Lagersteifigkeit
C_W	N	dynamische Tragzahl des Kugellagers
C_0	N	statische Tragzahl des Kugellagers
C_{MU}	$W/m^2 \cdot K^4$	Strahlungsaustauschzahl
C^*	—	Bremsenkennwert
d_D	mm	Reibdurchmesser
d_K	mm	charakteristischer Rohrdurchmesser
d_{Ph}	mm	mittlerer Luftspaltwicklungsdurchmesser
d_{Sm}	mm	mittlerer mechanischer Luftspaltdurchmesser
d_W	mm	Lagerbohrungsdurchmesser
d_{WM}	mm	mittlerer Lagerdurchmesser
D_f	mm	Teilkreisdurchmesser der Schraubenverbindung

D_W	mm	Lageraußendurchmesser
D_{WK}	mm	Wälzkörperdurchmesser
f	Hz	Frequenz des Rotorumlafs
f_{kom}	Hz	Frequenz der Stromwendung
f_S	–	Rauhigkeitsfaktor des Stators
f_{Stur}	–	Rauhigkeitsfaktor für turbulente Strömung
f_Z	μm	Setzbetrag
\hat{f}_S	–	Rauhigkeitsfaktor des Rotors
F_{KR}	N	Restklemmkraft
F_{KRref}	N	erforderliche Restklemmkraft
F_r	N	Radiallast des Lagers
F_{Vmin}	N	minimale Vorspannkraft
F_z	N	vertikale Radlast
F_Z	N	Vorspannkraftverlust
G_{rr}	–	Rollreibungsgrundwert
i_W	–	Anzahl der Reihen des Wälzlagers
I	A	Strom
I_{radSO}	–	SJOEVALLSches Integral
k	$V \cdot s / rad$	Maschinenkonstante, elektrische Wandlungskonstante
k_{W0}	–	Faktor für die zulässige Wälzkörperbelastung
l_l	mm	Leiterlänge
l_{WR}	mm	Kontaktlinienlänge der Rolle
L_{el}	μH	Induktivität
L_K	mm	Kanallänge
L_{nm}	–	Ermüdungslebensdauer in Mio. Umdrehungen
m	kg	Masse
M_D	$N \cdot m$	Reibmoment der Dichtung
M_{drag}	$N \cdot m$	Planschverluste
M_{el}	$N \cdot m$	elektrisches Motordrehmoment
M_R	$N \cdot m$	Reibmoment des Wälzlagers
M_{rr}	$N \cdot m$	Rollreibung der Wälzkörper
M_{seal}	$N \cdot m$	Dichtungsreibung

M_{sl}	$N \cdot m$	Gleitreibung der Wälzkörper
M_T	$N \cdot m$	übertragbares Drehmoment der Schraubenverbindung
n	U/min	Drehzahl
n_f	–	Anzahl der Schrauben
Nu	–	Nusseltzahl
p	N/m^2	Druck
p_D	N/m^2	Anpressdruck der Dichtung
p_P	–	Anzahl magnetischer Pole
p_W	–	Lebensdauerexponent des Wälzlagers
P	W	Wärmeleistung
P_{Ohm}	W	ohmsche Verlustleistung
Pr	–	Prantlzahl
P_{VL}	W	Verlustleistung des Wälzlagers
P_W	N	dynamisch äquivalente Belastung des Wälzlagers
Q_{Achse}	N	Achsschenkelbelastung
Q_{rot}	N	Gewichtskraft der rotierenden Radmodulbauteile
Q_W	N	Wälzkörperbelastung
Q_{Wmax}	N	Kontaktkraft des höchst belasteten Wälzkörpers
r_{Ph}	mm	mittlerer Hebelarm der Luftspaltwicklung
R_{el}	Ohm	elektrischer Widerstand
R_S	–	Hilfsfaktor des Luftspaltwärmeübergangs
Re	–	Reynoldszahl
s	mm	Einzelschichtdicke
s_W	mm	Stützweite
S_R	–	Sicherheit gegen Durchrutschen
t	s	Zeit
T	$^{\circ}C$	Temperatur
T_M	$^{\circ}C$	Körpertemperatur
T_U	$^{\circ}C$	Umgebungstemperatur
U_n	–	Gewichtungsfaktor des Wälzlagers
U_K	mm	Umfang des Kanals
v_D	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Dichtung

v_K	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
v_S	m/s	Luftspaltrelativgeschwindigkeit
z_P	—	Anzahl stromführender Phasen
z_{PG}	—	Anzahl Phasen
z_W	—	Anzahl Wälzkörper

Griechische Buchstaben

α	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangskoeffizient
α_A	—	Anziehungsfaktor
α_K	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangszahl im Kanal
α_S	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangszahl im Luftspalt
α_W	°	Druckwinkel
α_{W0}	°	Nenndruckwinkel
γ_S	—	Spannungserhöhungsfaktor
δ_P	$\mu m/N$	Elastizität der gespannten Platten
δ_{rK}	μm	Kontakteinfederung einer Kugel mit Schale
δ_{rR}	μm	Kontakteinfederung einer Rolle mit Schale
δ_S	$\mu m/N$	Elastizität der gespannten Schraube
δ_{Sme}	mm	mechanische Luftspalthöhe
δ_{Sel}	mm	elektrische Luftspalthöhe
Δp	bar	Druckdifferenz
ΔT	K	Temperaturgradient
ζ	—	Widerstandsbeiwert
λ	$W/m \cdot K$	Wärmeleitkoeffizient
μ_D	—	Reibungszahl der Dichtung
μ_f	—	Reibungszahl in der Trennfuge
μ_G	—	Gewindereibungszahl
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ξ	—	Rohrreibungszahl

ρ	g/cm^3	Dichte
$\sigma_{0,2}$	N/mm^2	0,2-Dehngrenze
Φ_{ish}	—	Schmierfilmdickenfaktor
Φ_{rs}	—	Schmierstoffverdrängungsfaktor
ω_{res}	rad/s	effektive Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungsverzeichnis

ASR	Antriebsschlupfregelung
BLDC	Brushless Direct Current Motor (Bürstenloser Gleichstrommotor)
BEV	Battery Electric Vehicle (Elektrofahrzeug mit Batterie)
BPW	Bergische Achsen KG
BugEE	Bugracer Electric Energy (Versuchsfahrzeug des Lehrstuhls für Mechatronik)
CAD	Computer Aided Design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Co	Kobalt
COMO	Competence in Mobility
C/C	kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff
C/SiC	Siliziumkarbid-Verbundkeramik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond Like Carbon (amorphe Kohlenstoffschicht)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ELISA	elektromobil, leicht, intelligent für Sachsen-Anhalt
EMB	Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH
EMK	elektromotorische Kraft
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ET	Einpresstiefe
EV	Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
FAG	Fischers Aktien-Gesellschaft
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FEM	Finite-Element-Methode
FMB	Fakultät für Maschinenbau
FMEA	Fehler-Möglichkeits-Einflussanalyse
GEN	Generation einer Radlagereinheit
HV	Hochvolt

IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
IC	International Cooling (Kühlungsart)
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
IISB	Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie
IKAM	Institut für Kompetenz in AutoMobilität
IMS	Institut für Mobile Systeme
IP	International Protection (Schutzart)
ISO	International Standards Organization (Internationale Organisation für Normung)
KRL	Kegelrollenlager
LKW	Lastkraftwagen
LOM	Laminated Object Manufacturing (Generative Fertigung mittels Papier)
LSW	Luftspaltwicklung
M	metrisches DIN-Gewinde
MMC	Metal Matrix Composite (Metall-Matrix-Verbundwerkstoff)
MTK	Lehrstuhl für Mechatronik
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
Ni	Nickel
NO20	nicht kornorientiertes Dynamoblech in einer Dicke von 0,2 mm
OVGU	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
O-Anordnung	Anordnung zweier Schräglager mit hoher Verkippteifigkeit
PKW	Personenkraftwagen
PLEV	Personal Light Electric Vehicle (elektrisches Kleinstfahrzeug)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (permanenterregte Synchronmaschine)
P3G	Polygonprofil mit drei Seiten
P4C	Polygonprofil mit vier Seiten
RNM	Radnabenmotor
RRKL	Radialrillenkugellager
RWDR	Radialwellendichtring
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

SKF	Svenska Kullagerfabriken AB (Schwedische Kugellagerfabriken AG)
SKL	Schräggkugellager
SLM	Selective Laser Melting (Generative Fertigung mittels Laser)
S235	Baustahl mit einer Streckgrenze von 235 N/mm ²
S355	Baustahl mit einer Streckgrenze von 355 N/mm ²
TU	Technische Universität
UMD	Universität Magdeburg
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WNV	Welle-Nabe-Verbindung
ZF	Zahnradfabrik Friedrichshafen AG

Kurzfassung

Elektrische Radnabenmotoren können als Antriebe für verschiedene Elektrofahrzeuge eingesetzt werden. In dieser Arbeit wird das methodische Konstruieren nach Pahl und Beitz angewandt, um getriebelose Radnabenmotoren zu entwickeln. Es wird mit der Analyse vorhandener Radnabenmotoren begonnen, um anschließend auf anwendbare Elemente des Elektromaschinenbaus und der Fahrzeugtechnik einzugehen. Die Anforderungen an die zu konstruierenden Motoren sind von der Verwendung einer nutenlosen Luftspaltwicklung in Radialflussanordnung geprägt. In der Konzeptphase wird schwerpunktmäßig die Lagerung und die Kraftleitung betrachtet, um die luftspaltrelevante Verformung zu minimieren. Je geringer der elektrische Luftspalt, desto höher ist das Drehmoment. Die Luftspaltänderung kann mit einer sehr steifen Radlagerung oder einer Ausgleichkupplung zwischen der Lagerung des Rades und des Rotors minimiert werden. Es werden Gesamtkonzepte vorgestellt, die sich im Wesentlichen in der Lagerung, der Bremse und der Radanbindung unterscheiden. Anschließend werden die Entwürfe von Außenläufer-Radnabenmotoren erläutert. Es erfolgt ein Vergleich des berechneten Motorgewichts, welches maßgeblich in der Konzeptionsphase festgelegt worden ist. An flüssigkeits- und luftgekühlten Prototypen werden Messungen zur Bestimmung des Reibungsverlusts und der elektrischen Erwärmung durchgeführt.

Abstract

Electric wheel hub motors can be used as drives for different electric vehicles. In this thesis the systematic design by Pahl and Beitz will be applied to develop gearless wheel hub motors. At the beginning wheel hub motors will be analysed. Next to this applicable elements of the electrical machine and the vehicle engineering will be explained. The specifications of the motors, that have to be designed, are influenced by a slotless air gap winding in radial flux arrangement. In the conceptual design phase the main focus is on the bearing and the transmission of force in order to minimise the deformation relevant for the air gap. The lower the electrical air gap, the higher is the torque. The change of the air gap can be reduced with a very stiff wheel bearing or a compensating coupling. Whole concepts are shown, that have mainly differences in the bearing, the brake and the mounting of the wheel. Thereupon designs of outer runner wheel hub motors are explained. A comparison is made of the calculated motor weight, which was mainly determined in the conceptual design phase. Measurements are performed on liquid and air-cooled prototypes to determine friction loss and electrical heating.