

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. 814

Dipl.-Ing. Andreas Zörnig,  
Magdeburg

## Methodische Konstruktion elektrischer Radnaben- motoren für Fahrzeuge





# Methodische Konstruktion elektrischer Radnabenmotoren für Fahrzeuge

## Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Andreas Zörníg

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 – Luftspaltentwicklung – 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 Luftspaltentwicklung. 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 Ausgleichskupplung 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](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 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 *EL/SA* (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 Sattelauflieder 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 *EL/SA*.

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 Luftspaltentwicklung .....	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	Bremsarten .....	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-Stators.....	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 Luftspaltwicklungs durchmesser
$d_{Sm}$	$mm$	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 Rotorumlaufs
$f_{kom}$	Hz	Frequenz der Stromwendung
$f_s$	–	Rauigkeitsfaktor des Stators
$f_{stur}$	–	Rauigkeitsfaktor für turbulente Strömung
$f_z$	$\mu m$	Setzbetrag
$f^*_s$	–	Rauigkeitsfaktor des Rotors
$F_{KR}$	N	Restklemmkraft
$F_{KRerf}$	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 Wälzlers
$I$	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
$L_{el}$	$\mu H$	Induktivität
$L_K$	mm	Kanallänge
$L_{nm}$	–	Ermüdungsliebensdauer 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 Wälzlers
$M_{rr}$	$N \cdot m$	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 Wälzlers
$P$	$W$	Wärmeleistung
$P_{Ohm}$	$W$	ohmsche Verlustleistung
$Pr$	–	Prantlzahl
$P_{VL}$	$W$	Verlustleistung des Wälzlers
$P_W$	$N$	dynamisch äquivalente Belastung des Wälzlers
$Q_{Achs}$	$N$	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 Wälzlers
$U_K$	$mm$	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

$\alpha$	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_A$	—	Anziehfaktor
$\alpha_K$	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangszahl im Kanal
$\alpha_s$	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangszahl im Luftspalt
$\alpha_w$	°	Druckwinkel
$\alpha_{w0}$	°	Nenndruckwinkel
$\gamma_s$	—	Spannungserhöhungsfaktor
$\delta_p$	$\mu m/N$	Elastizität der verspannten Platten
$\delta_{rK}$	$\mu m$	Kontakteinfederung einer Kugel mit Schale
$\delta_{rR}$	$\mu m$	Kontakteinfederung einer Rolle mit Schale
$\delta_s$	$\mu m/N$	Elastizität der verspannten Schraube
$\delta_{sme}$	$mm$	mechanische Luftspalthöhe
$\delta_{sel}$	$mm$	elektrische Luftspalthöhe
$\Delta p$	bar	Druckdifferenz
$\Delta T$	$K$	Temperaturgradient
$\zeta$	—	Widerstandsbeiwert
$\lambda$	$W/m \cdot K$	Wärmeleitkoeffizient
$\mu_D$	—	Reibungszahl der Dichtung
$\mu_f$	—	Reibungszahl in der Trennfuge
$\mu_G$	—	Gewindereibungszahl
$\nu$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\xi$	—	Rohrreibungszahl

---

$\rho$	$g/cm^3$	Dichte
$\sigma_{0,2}$	$N/mm^2$	0,2-Dehngrenze
$\Phi_{ish}$	–	Schmierfilmdickenfaktor
$\Phi_{rs}$	–	Schmierstoffverdrängungsfaktor
$\omega_{res}$	$rad/s$	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 Verkippsteifigkeit
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	Schrägkugellager
SLM	Selective Laser Melting (Generative Fertigung mittels Laser)
S235	Baustahl mit einer Streckgrenze von 235 N/mm <sup>2</sup>
S355	Baustahl mit einer Streckgrenze von 355 N/mm <sup>2</sup>
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 nutzenlosen Luftspaltentwicklung 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 Ausgleichskupplung 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.