

**Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems
mit Brennstoffzelle
für Personenkraftwagen**

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
vorgelegte Abhandlung

vorgelegt von
Björn Kattentidt
aus Hannover

Hauptberichter:	em. o. Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feser
Tag der mündlichen Prüfung:	28. Oktober 2002

Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe
der Universität Stuttgart

2003

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 10

Björn Kattentidt

**Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems
mit Brennstoffzelle für Personenkraftwagen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Kattentidt, Björn:

Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzelle
für Personenkraftwagen/ Björn Kattentidt.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe ; Bd. 10)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-1599-9

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1599-9

ISSN 1431-9888

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe (IEMA) der Universität Stuttgart.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. H.-J. Gutt aussprechen, der nicht nur den Hauptbericht übernommen hat, sondern meine Arbeit stets gefördert und unterstützt hat. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feser für das entgegengebrachte Interesse und die Anfertigung des Mitberichts.

Meinem Vater Reinhold und meiner Mutter Rosemarie danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung und ihre uneingeschränkte Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung.

Danken möchte ich auch Claudia Felske. Mit ihr als liebevolle Lebenspartnerin fand ich immer wieder den wichtigen Ausgleich zu meiner intensiven Arbeit und einen wertvollen Gesprächspartner in Bezug auf zukünftige Energiefragen und Verbrauch von Ressourcen.

Allen Mitarbeitern und Kollegen des Instituts für Elektrische Maschinen und Antriebe danke ich für die gute Atmosphäre und ihre tatkräftige Unterstützung: Besonders Dr. Kurt Reutlinger hatte immer ein offenes Ohr und Sachkenntnis in fachlichen Fragen.

Dr. Arkadi Grüner blieb in fachlichen Gesprächen nie eine gute Antwort schuldig. Auch Herr Lebsanft und Dr. Beisse standen mir mit Rat und Tat zur Seite.

Auch möchte ich Frau Annemarie Fischer danken für ihre Anteilnahme. Nicht nur in betriebs-internen Fragen konnte man sich stets vertrauensvoll an sie wenden.

Meßgeräte und auch außergewöhnliche Bauteile wurden zuverlässig von Herrn Dick beschafft. Herr Cszismarek ließ keine meiner feinmechanischen Problemstellungen ungelöst. Die hochwertige Arbeit von Herrn Sobing und Herrn Majewski am speziell umgerüsteten Motorprüfstand erlaubte zuverlässigen Betrieb bis zu höchsten Drehzahlen.

Besonderen Dank richte ich an die Firma Oswald und ihre Mitarbeiter in Miltenberg, die den Versuchsmotor nach Maßgabe mit ihrem spezifischen know how kostenlos hergestellt haben, sowie der DaimlerBenz AG, welche diese Arbeit angeregt hat.

Herzlichen Dank an meine Freunde Hannes Tuch und Frank Riffel, die mir in selbstlosen nächtlichen Einsätzen bei den englischen Übersetzungen halfen, und meinem Vater Reinhold, meinem Bruder Holger sowie Peter Geffert für die Sorgfalt und große Hilfe beim Korrekturlesen.

Nicht zuletzt danke ich allen nicht genannten, die mit ihrer Unterstützung zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Max Planck

23. April 1858 - 4. Oktober 1947

Physik-Nobelpreisträger 1918

für Arbeiten zur Wärmestrahlung vom Oktober 1900

In seiner wissenschaftlichen Autobiographie, Leipzig 1928:

**„Eine neue wissenschaftliche Wahrheit
pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen,
daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären,
sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben.“**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	vii
Formelzeichen.....	ix
Zusammenfassung.....	1
Abstract.....	3
1 Einleitung.....	13
2 Alternativen und Kriterien zur Auswahl der Komponenten des elektrischen Antriebssystems	17
2.1 Elektromotortypen und Umrichter	18
2.2 Vor- und Nachteile der Maschinentypen.....	21
2.3 Konzeption des elektrischen Antriebs	24
2.3.1 Der Umrichter.....	24
2.3.2 Die elektrische Maschine.....	26
3 Mechatronisches Berechnungsmodell des Elektromotors	30
3.1 Auswahl aus drei Läufervarianten und Polpaarzahl.....	30
3.2 Permanentmagnete.....	36
3.3 Elektrobleche.....	38
3.3.1 Verlustkennlinienmodell für Elektrobleche.....	39
3.3.2 Zusätzliche thermische Verluste	45
3.3.3 Magnetisierungskennlinien	48
3.4 Der Läufer	48
3.4.1 Elektromagnetische Eigenschaften	48
3.4.2 Mechanische Eigenschaften, Festigkeitsberechnungen	49
3.5 Der Ständer.....	54
4 Berechnung und Messungen am Motor.....	55
4.1 Verluste im Motor.....	55
4.1.1 Gemessene und berechnete Wirkungsgrade des Versuchsmotors.....	55
4.1.2 Verlustverteilung im Motor	61

4.2 Einfluß der Zwischenkreisspannung auf den Wirkungsgrad.....	64
4.3 Einfluß der Baugröße auf den Wirkungsgrad.....	65
4.4 Einfluß der Blechqualität auf den Wirkungsgrad.....	67
5 Fahrzeugmodell zur Wirkungsgradermittlung.....	68
5.1 Referenzmodell des Kraftfahrzeugs.....	70
5.1.1 Energiefluß und Systemgleichungen des Fahrzeugmodells.....	75
5.1.2 Die elektrische Maschine.....	77
5.1.3 Der Umrichter.....	79
5.2 Energetisches Optimierungspotential des Fahrzeugsystems.....	83
5.2.1 Fahrzyklen.....	84
5.2.2 Motorwirkungsgrad.....	93
5.2.3 Leistungsfaktor, Umrichterwirkungsgrad und Brennstoffzelle.....	97
5.2.4 Getriebewirkungsgrad.....	100
5.2.5 Rollreibung.....	101
5.2.6 Luftwiderstandsfläche.....	102
5.2.7 Nebenverbraucher.....	103
5.2.8 Übersicht über Verluste und Verbrauch im Gesamtsystem.....	107
5.2.9 Zusammenfassung: Optimierungen im Fahrzeugsystem.....	109
5.3 Besondere Systemeigenschaften mit Brennstoffzelle.....	114
5.3.1 Rekuperation und Kurzzeitergiespeicher.....	114
5.3.2 Totzeiten.....	118
Anhang A.....	120
Maschinendaten.....	120
Anhang B.....	121
B.1 Systemgleichungen Fahrzeugmodell.....	121
B.2 Kennlinien Fahrzeugmodell.....	123
B.3 Fahrzyklen.....	124
B.4 Häufige Betriebspunkte in den Fahrzyklen.....	126
Literaturverzeichnis.....	128
Lebenslauf.....	135

Formelzeichen

a	parallele Zweige, Koeffizient, Beschleunigung
A	Querschnittsfläche, Regressionskoeffizient
b	Breite
B	magnetische Induktion, Regressionskoeffizient
c_f, c_B, c_{PV}	Koeffizienten, Exponenten
d	Dicke
dyn	dynamisch
D	Durchmesser
f	Frequenz, Koeffizient, Faktor
g	Erdbeschleunigung
F	Kraft
H	magnetische Feldstärke
i	mechanisches Übersetzungsverhältnis
J	rotatorisches Massenträgheitsmoment
k	Koeffizienten
I	elektrischer Strom
$k_{\phi geom}$	geomtrischer Polbedeckungsfaktor
m	Phasenzahl, Masse
M	Drehmoment
n	mechanische Drehzahl, Anzahl Wertepaare
N	Nutzahl
p	Polpaarzahl, spezifische Leistung
P	Leistung
q	Lochzahl
r	Korrelationskoeffizient, Radradius
R	elektrischer Widerstand
S	elektrische Scheinleistung
t	Zeit
T	Temperatur
U	elektrische Spannung

v	Geschwindigkeit
V	magnetische Spannung
w	Windungszahl, spezifische Energie
W	Energie
x/y	Wertepaare ($\hat{y}$: Schätzwert)
α	Polbedeckungsfaktor, Kerbwirkungszahl, Steigungswinkel
δ	Luftspaltlänge
Δ	prozentuale Abweichung
η	Wirkungsgrad
θ	elektrische Durchflutung
κ	Umrichterausnutzung, elektrische Leitfähigkeit
λ	elektrischer Leistungsfaktor
μ	Permeabilität
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand, Massendichte
σ	mechanische Spannung
τ	Polteilung, mechanische Schubspannung
φ	elektrischer Winkel von Strangspannung zu Strangstrom
ϕ	magnetischer Fluß

Indizes:

0	Bezugswert, auf ein Schaltspiel bezogen
1	Grundwelle
1,5	bez. 1,5 T in $p_{V1,5}$ (Verlustkennziffer für Elektroblech)
2	auf I äufer bezogen
20; 35; 50	Bezugswerte, Blechdicke in 1/100 mm
δ	auf Luftspalt bezogen
ab	abgegeben
A	Fläche, Antrieb
b	Blind- (Leistung, Strom)
B	auf Induktion bezogen, Bahn- (IGBT)
Bl	Blech
BZ	Brennstoffzelle
c	koerzitiv
co	conduct, Leitungs- (IGBT)
C	Kollektor (IGBT), case (IGBT-Gehäuse)

<i>CE</i>	Kollektor-Emitter (IGBT)
<i>Cu</i>	Kupfer
<i>dyn</i>	dynamisch
<i>D</i>	Diffusion (IGBT), Diesel
<i>DC</i>	Gleichstrom (direct current)
<i>f</i>	auf Frequenz bezogen
<i>fix</i>	fester Bezug
<i>Fe</i>	Eisen
<i>Fz</i>	auf Fahrzeug bezogen
<i>GD</i>	auf Getriebe und Differential bezogen
<i>geom</i>	geometrisch
<i>hyst</i>	auf Hysterese bezogen
<i>H₂</i>	gasförmiger Wasserstoff
<i>i</i>	innen (Innenwiderstand)
<i>j</i>	junction, Sperrschicht
<i>J</i>	auf Polarisation bezogen, Ständerjoch
<i>k</i>	korrigiert
<i>Ko</i>	auf Luftkompressor bezogen
<i>Komp</i>	Komponente
<i>Kü</i>	auf Kühler bezogen
<i>lin</i>	linear
<i>L</i>	auf Läufer bezogen, Last, Luft, Lager
<i>Lü</i>	auf Kühlerlüfter bezogen
<i>max</i>	Maximalwert
<i>mech</i>	mechanisch
<i>M</i>	Motor
<i>norm</i>	normiert (1,5T; 50Hz)
<i>N</i>	Nennwert
<i>NV, NA</i>	Nebenverbraucher, Nebenaggregate
<i>on</i>	eingeschaltet
<i>p</i>	auf Pol bezogen
<i>par</i>	parallel
<i>pos</i>	positiv zählend
<i>P</i>	Pumpe
<i>PM</i>	auf Permanentmagnet bezogen

<i>quad</i>	quadratisch
<i>r</i>	relativ, remanent (Induktion), auf das Abrollen der Reifen bezogen
<i>rek</i>	rekuperiert (wiedergewonnen)
<i>rot</i>	rotierend
<i>R</i>	auf Rad bezogen
<i>R_w</i>	auf Reinstwasserpumpe bezogen
<i>s</i>	Schein- (Leistung, Strom)
<i>sat</i>	Sättigung
<i>schr</i>	Schrägung
<i>spez</i>	spezifisch
<i>stat</i>	statisch
<i>sw</i>	switch, Schalt- (IGBT)
<i>S</i>	auf Ständer bezogen, Straße
<i>Si</i>	auf Sicherheit bezogen
<i>SK</i>	Schnittkante
<i>St</i>	auf Kontakt zwischen Straße und Reifen bezogen
<i>Str</i>	Strang
<i>T</i>	Temperatur, temperaturabhängig
<i>U</i>	Umrichter
<i>V, v</i>	thermische Verluste, auf thermische Verluste bezogen
<i>VS</i>	Verschleißstab
<i>w</i>	Wirk- (Leistung, Strom), auf Welle bezogen, bezüglich Fahrtwind
<i>W</i>	auf die Energie bezogen
<i>wirb</i>	auf Wirbelstrom bezogen
<i>Z</i>	Zwischenkreis, Zentrifugal, Ständerzähne
<i>ZwSp</i>	Zwischenspeicher

Zusatzzeichen

<i>X</i>	Effektivwert
$\hat{X}$	Amplitude, Scheitelwert

Abkürzungen

BZ	Brennstoffzelle
BZU	zwischen Brennstoffzelle und Umrichtereingang
CSG	Kurbelwellen-Startergenerator (Crankshaft Starter Generator)
CVT	stufenloses Umschlingungsgetriebe (Continuously Variable Transmission)
DC	Gleichstrom (Direct Current)

GM	Gleichstrommaschine
DAM	Drehstromasynchronmaschine
DSM	Drehstromsynchronmaschine
ECE15	Europäischer Stadt-Fahrzyklus (Economic Commission for Europe)
EUDC	Europäischer Überland-Fahrzyklus (Extra Urban Drive Cycle)
FSB	Feldschwächbereich
FTP	Fahrzyklus (Federal Test Procedure)
I-	Strom-
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPM	PSM mit eingebetteten Magneten (Interior Permanent magnet Motor)
MDM	Modulare Dauermagnetmaschine
MM	Magnetmotor
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor, Seltenerd-Permanentmagnetmaterial
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Pkw	Personenkraftwagen
PEMFC	Membran-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membran Fuel Cell)
PM	Permanentmagnet
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine (hier: mit Ferritmagneten)
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
SAE	Viskositätsklasse (Society (Standard) of Automotive Engineers)
SPM	PSM mit Oberflächenmagneten (Surface Permanent magnet Motor)
SRM	geschaltete Reluktanzmaschine (Switched Reluctance Machine)
TFM	Transversalflußmaschine
U-	Spannungs-
USA	United States of America
VKM	Verbrennungskraftmaschine