

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

**Systematischer Vergleich von BLDC-Motorkonzepten mit
Anwendung auf nass laufende Wasserpumpen kleiner
Leistung**

Heiko Hembach

Vorsitzender des Promotionsausschuss:	Prof. Dr.-Ing. S. Lindenmeier
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D. Gerling
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.rer.nat. S. Schäffler

Tag der Prüfung: 18.10.2007

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 28.11.2007

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 4

Heiko Hembach

**Systematischer Vergleich von BLDC-Motorkonzepten
mit Anwendung auf nass laufende Wasserpumpen
kleiner Leistung**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6735-3

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH als Doktorand in dem Geschäftsbereich Energy and Body Systems. An dieser Stelle möchte ich allen Mitarbeitern des Standorts danken die mich während dieser Zeit unterstützen. Danken möchte ich zudem Herrn Dr.-Ing. S. Beyer für die Ermöglichung dieser Dissertation. Mein besonderer Dank gilt den Betreuern dieser Arbeit, Dr.-Ing. E. Nipp, Dr.-Ing. S. A. Evans sowie S. Evans. Sie trugen durch ihre stetige Unterstützung und die gegebenen Ratschläge maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Gerling danke ich für die Übernahme des Referates und das meiner Arbeit entgegen gebrachte Interesse. Zudem möchte ich mich auch für die wertvollen und freundlichen Treffen sowie die damit verbundene gute universitäre Betreuung bei technischen und organisatorischen Fragestellungen bedanken.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.rer.nat. S. Schäffler für das Interesse an dieser Arbeit und das übernommene Koreferat. Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Lindenmeier danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ausdrücklich danke ich S. Scheithauer für ihr Verständnis und ihre stetige Unterstützung während der Arbeit. Letztendlich möchte ich mich bei meinen Eltern für die Unterstützung während der gesamten Studienzeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Inhaltliche Gliederung	2
1.2 Niedrigkostenkonzept	3
2 Kleinantriebe im Kraftfahrzeug (Kfz)	5
2.1 Verteilung der Kleinantriebe im Kfz	6
2.2 Allgemeine Anforderungen an Kleinantriebe	8
2.3 Anforderungen an bestimmte Kleinantriebe	9
2.3.1 Pumpen	10
2.3.2 Gebläse	11
2.3.3 Stellantriebe	11
2.3.4 Sonstige Kleinantriebe	12
3 BLDC-Motoren	15
3.1 Funktionsprinzip	15
3.2 Betriebsverhalten	18
3.3 Motoreigenschaften	21
3.4 Baugruppen	24
3.5 Motorkonzepte	25
3.5.1 Genuteter Stator	25
3.5.2 Klauenpolkonzept	26
3.5.3 Innenläuferausführung	27
3.5.4 Außenläuferausführung	27
4 Komponentenanalyse	29
4.1 Allgemeine Hinweise	29
4.2 Konzeptunabhängige Komponenten	30
4.2.1 Statorblechpaket	31
4.2.1.1 Material	31
4.2.1.2 Statorfertigung	32
4.2.1.3 Statorisolation	32
4.2.2 Verschaltung	34
4.2.3 Lager	36
4.2.4 Gehäuse	39

4.3 Konzeptabhängige Komponenten.....	41
4.3.1 Wicklung.....	41
4.3.1.1 Füllfaktor.....	41
4.3.1.2 Wicklungsfertigung.....	41
4.3.1.3 Wickeldraht.....	44
4.3.2 Statorsegmentierung.....	45
4.3.2.1 Statorsegmentierung mit Spulenwickeltechnik.....	46
4.3.3 Permanentmagnete.....	47
4.3.4 Rotorlageerfassung.....	50
4.3.5 Leistungselektronik.....	53
5 Konzeptabschätzungen für nass laufende Wasserpumpen.....	59
5.1 Bestromungsstrategie.....	59
5.2 Innen- und Außenläuferkonzept.....	59
5.3 Klauenpolkonzept und dessen Grenzen.....	62
6 Pumpenausführung mit dem Nutkonzept.....	71
6.1 Dreisträngige Ausführungen.....	71
6.1.1 Elektromagnetische Auslegung.....	71
6.1.2 Konstruktive Gestaltung & wirtschaftliche Betrachtung.....	73
6.2 Zweisträngige Ausführungen.....	80
6.2.1 Elektromagnetische Auslegung.....	80
6.2.2 Konstruktive Gestaltung & wirtschaftliche Betrachtung.....	83
6.3 Einsträngige Ausführungen.....	88
6.3.1 Elektromagnetische Auslegung.....	88
6.3.2 Konstruktive Gestaltung & wirtschaftliche Betrachtung.....	91
7 Pumpenausführung in Klauenpolgeometrie.....	97
7.1 Elektromagnetische Auslegung.....	98
7.2 Konstruktive Gestaltung & wirtschaftliche Betrachtung.....	112
8 Konzeptvergleich.....	123
8.1 22 W Wasserpumpen.....	123
8.2 Konzeptabschätzungen für Wasserpumpen abweichender Leistungen ..	128
9 Zusammenfassung & Ausblick.....	131
10 Literaturverzeichnis.....	135
 Anhang:	
A Verwendete Formelzeichen.....	139
B Auslegung des Dreifachklauenpolmotors.....	145