



Florian Bittner

Modellgestützte multikriterielle Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge



Audi-Dissertationsreihe, Band 103





Modellgestützte multikriterielle Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Univ. Florian Rafael Bittner
aus Neumarkt i. d. Opf.



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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2015
Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 03. März 2015

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn
Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2015
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung
des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile
daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie)
zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2015

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-965-3
eISBN 978-3-7369-4965-2



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2011 bis 2013 während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung I/EA-231 „Entwicklung E-Maschine“ der *AUDI AG* in Ingolstadt.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn, für die großartige Betreuung meiner Arbeit bedanken. Aus zahlreichen Diskussionen konnte ich neue Denkanstöße und Impulse mitnehmen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer (Karlsruher Institut für Technologie, Elektrotechnisches Institut, Hybridelektrische Fahrzeuge) sehr herzlich für die Erstellung des Zweitgutachtens. Mein bester Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Willner und dem Vorsitzenden des Prüfungskollegiums, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß.

Sämtlichen Assistenten und Mitarbeitern des Lehrstuhls für elektrische Antriebe und Maschinen danke ich für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre und den fachlichen Austausch bei meinen Besuchen in Erlangen. Besonders hervorheben möchte ich die anregenden Diskussionen mit Andreas Böhm, Veronika Kräck und Jens Krotsch.

Auf Seiten der *AUDI AG* gilt mein Dank gleichermaßen meinem Abteilungsleiter Herrn Roman Straßer, der bereits während meiner Zeit als Diplomand Vertrauen in mich gesetzt und die Promotion bei der *AUDI AG* erst ermöglicht hat, sowie Herrn Dr.-Ing. Kai Brune für die hervorragende fachliche Betreuung rund um das Thema elektrische Maschine. Bei der Konstruktion und der Festigkeitsberechnung des Prototypen waren Maya Akoum, Jörg Hornischer, Max Possen und Josef Rusch eine sehr große Hilfe, vielen Dank hierfür. Ebenfalls danken möchte ich den Kollegen vom Versuch und der Applikation sowie den Prüfstandsfahrern für die Unterstützung bei der Inbetriebnahme und der Vermessung des Prototypen am Prüfstand.

Für die professionelle Zusammenarbeit und die Fertigung eines Prototypen in hoher Qualität möchte ich mich bei der Firma *ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH* in Leutkirch im Allgäu und dort insbesondere bei Herrn Markus Horn bedanken.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern und meiner Freundin Carina für die unablässige Unterstützung während der emotionalen Auf und Abs, die eine Promotion mit sich bringen.

Ingolstadt, im März 2015

Florian Bittner





Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit zwei Themenschwerpunkten: der Entwicklung eines neuen Optimierungsverfahrens und der Anwendung dieses Verfahrens bei der Auslegung und Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen für ein gegebenes Antriebskonzept eines Fahrzeugs. Bei der Auslegung elektrischer Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge stehen dem Entwickler einerseits zahlreiche Parameter zur Verfügung, andererseits muss er jedoch viele Randbedingungen einhalten. Außerdem muss die Maschine häufig nicht nur auf eine, sondern auf mehrere, meist gegenläufige Zielgrößen hin optimiert werden. Zur Ermittlung der Zielfunktionswerte empfiehlt sich bei den in dieser Arbeit untersuchten permanenterregten Synchronmaschinen mit vergrabenen Magneten die Durchführung numerischer Feldberechnungen. Der Nachteil dieser ziemlich genauen Berechnungsmethode ist ihr hoher Rechenzeitbedarf.

Um derartige Aufgabenstellungen innerhalb akzeptabler Gesamtrechenzeit zu lösen, wird die *Kriging-gestützte multikriterielle Partikelschwarmoptimierung* (KG-MPSO) entwickelt. Bei diesem neuartigen Verfahren wird eine als Basisalgorithmus dienende multikriterielle Partikelschwarmoptimierung mit einem Kriging-Modell kombiniert. Letzteres erlaubt die Interpolation zwischen bereits berechneten Lösungen und ermöglicht die Bewertung neuer Lösungskandidaten bereits vor einer rechenzeitintensiven Funktionsauswertung (*Pre-Evaluation*). Weiterhin wird direkt auf dem analytischen Kriging-Modell mit geringem Rechenzeitaufwand nach guten Lösungen gesucht und neue Lösungskandidaten werden an vielversprechenden Positionen im Parameterraum platziert (*Spawning*). Das Verfahren zeichnet sich durch einen reduzierten Bedarf an exakten Funktionsauswertungen und eine gute Konvergenz aus – dies wird anhand akademischer Testfälle bestätigt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das neue Verfahren zur Optimierung unterschiedlicher permanenterregter Synchronmaschinen eingesetzt. Die Maschinen sollen ein hohes Drehmoment bei geringem Einsatz an Magnetmaterial liefern. In einer dritten Zielgröße sind Anforderungen an die Drehmomentwelligkeit, die Leistung und weitere Eigenschaften mit Hilfe von Straftermen zusammengefasst. Zwölf Maschinenvarianten, welche sich v. a. in ihrer Rotorausprägung, der Wicklungsart und der Polpaarzahl unterscheiden, werden bei identischen Randbedingungen mit dem neuen Verfahren optimiert und die Ergebnisse anschließend verglichen. Von den vier in Frage kommenden Maschinenvarianten wird schlussendlich das am besten geeignete Maschinendesign ausgewählt und als Prototyp aufgebaut.

Die Berechnungsergebnisse zeigen in weiten Betriebsbereichen eine gute Übereinstimmung mit den am Prüfstand ermittelten Werten. Die Maschine wird den Anforderungen gerecht. Damit kann die Praxistauglichkeit der neu entwickelten Methode zur Optimierung permanenterregter Synchronmaschinen ebenfalls bestätigt werden.





Abstract

The present dissertation is dealing with two main topics: the development of a new optimization method and the application of this method for the design and optimization of permanent magnet synchronous machines for a given drive concept of a vehicle. When designing an electrical machine for a hybrid or electric vehicle, the developer on the one hand has many parameters at his disposal, but on the other hand he has to obey several constraints. Moreover, the machine needs to be optimized not only for one, but for multiple, mostly conflicting objectives at the same time. For evaluation of the objective functions of permanent magnet synchronous machines with buried magnets, as they are investigated in the present work, it is advisable to use numerical field simulation methods. The drawback of this quite accurate calculation method is its high computational cost.

In order to solve such tasks within an acceptable overall computation time, the *Kriging-Assisted Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (KG-MPSO, German acronym) has been developed. This novel method is a combination of a multi-objective particle swarm optimization, which serves as the basic algorithm and a Kriging metamodel. The latter enables the interpolation between previously computed solutions and allows the assessment of new solution candidates prior to a time-consuming function evaluation (*Pre-Evaluation*). Furthermore, good solutions are searched for directly on the analytical Kriging model with low computational effort and new solution candidates are placed at promising positions in the parameter space (*Spawning*). The method excels in a reduced need for exact function evaluations and good convergence – this is confirmed with the help of academic test cases.

The new method is used for design optimization of different topologies of permanent magnet synchronous machines in the second part of the work. The machines shall have a high torque and a low magnet weight. The third objective assembles from requirements concerning the torque ripple, the power and further properties by means of penalty functions. Twelve machine topologies, which distinguish themselves mainly in the rotor design, the winding type and the number of pole pairs, are being optimized with the new method while obeying identical constraints. The optimization results are compared afterwards. Only four topologies come into closer consideration. Finally, the most suitable machine design is chosen and built up as a prototype.

The simulation results are in good agreement with the results from the test bench in a wide operating range. The machine is in compliance with the requirements. Therefore, the suitability for daily use of the new developed method for design optimization of permanent magnet synchronous machines could also be confirmed.





Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Optimierung rechenzeitintensiver Fragestellungen	7
2.1 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung	7
2.2 Optimierung elektrischer Maschinen	11
2.3 Methoden zur Reduzierung der Gesamtrechenzeit	13
3 Das Optimierungsverfahren KG-MPSO	15
3.1 Multikriterielle Partikelschwarmoptimierung	16
3.2 Umgang mit linearen Restriktionen des Parameterraums	20
3.3 Das Kriging-Interpolationsverfahren	23
3.4 Unterstützung der Partikelschwarmoptimierung	26
3.4.1 Pre-Evaluation	26
3.4.2 Spawning	28
3.4.3 Anpassung der Schwarmgröße	31
3.5 Ablauf der KG-MPSO	32
3.6 Untersuchung des Verfahrens mit akademischen Testfällen	34
4 Betriebsverhalten und Werkstoffe von permanenterregten Synchronmaschinen	39
4.1 Aufbau und Grundwellenmodell der PSM	39
4.2 Regelung permanenterregter Synchronmaschinen	44
4.2.1 Maschinen ohne Schenkligkeit $L_d = L_q$	44
4.2.2 Maschinen mit Schenkligkeit $L_d < L_q$	46
4.3 Permanentmagnete	48
4.3.1 Eigenschaften von Selten-Erd-Magneten	49
4.3.2 Herstellung mittels Korngrenzendiffusion	52
4.4 Elektroblech	54
4.5 Verlustmechanismen und Wirkungsgrad	57
4.6 Einflüsse auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	60
5 Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen	67
5.1 Anforderungen, Randbedingungen und Zielgrößen	67
5.2 Maschinenvarianten	70
5.2.1 Rotorvarianten und deren Parameter	71
5.2.2 Statorvarianten und deren Parameter	73
5.2.3 Untersuchte Maschinenvarianten	74



5.3	Voruntersuchungen	75
5.3.1	Zulässiger Parameterraum	77
5.3.2	Aktive Länge	77
5.3.3	Windungszahl	79
5.3.4	Staffelung	80
5.3.5	Transienter dreiphasiger Kurzschluss	83
5.3.6	Analytische Berechnung der mechanischen Spannung	87
5.4	Vorgehen bei der Optimierung	89
5.4.1	Festlegung zusätzlicher Maschinenparameter	89
5.4.2	Ermittlung der Zielfunktionswerte	90
5.4.3	Anpassung des Optimierungsverfahrens an die Problemstellung	91
5.5	Ergebnisse der Optimierung	91
5.5.1	Polpaarzahl 3, Lochzahl 3 mit Rotor T3 (p3q3T3)	92
5.5.2	Polpaarzahl 4, Lochzahl 2 mit Rotor T3 (p4q2T3)	93
5.5.3	Polpaarzahl 4, Lochzahl 2,5 mit Rotor T3 (p4q2,5T3)	93
5.5.4	Polpaarzahl 5, Lochzahl 2/5 mit Rotor T3 (p5q0,4T3)	95
5.5.5	Polpaarzahl 5, Lochzahl 2 mit allen Rotorvarianten	95
5.5.6	Polpaarzahl 6, Lochzahl 1/2 mit Rotoren V1 und T3	96
5.5.7	Polpaarzahl 6, Lochzahl 1,5 mit Rotor T3 (p6q1,5T3)	97
5.5.8	Polpaarzahl 7, Lochzahl 1 mit Rotor T3 (p7q1T3)	98
5.5.9	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	98
5.6	Vergleich ausgewählter Maschinenvarianten	102
5.6.1	Vergleich auf Basis der multikriteriellen Optimierung	102
5.6.2	Vergleich auf Basis des Verbrauchs in einem Fahrzyklus	104
5.6.3	Auswahl eines Maschinendesigns	107
6	Untersuchung der aufgebauten Maschine und Vergleich mit der Messung	109
6.1	Effiziente Nutzung des Magnetmaterials durch hohe Rotorfestigkeit	109
6.1.1	Bionischer Ansatz zur Reduzierung mechanischer Spannungen	110
6.1.2	Optimierung der Anordnung und Kontur der Stege	112
6.2	Aufbau eines Prototypen	113
6.3	Eigenschaften im Leerlauf	115
6.3.1	Induzierte Spannung	115
6.3.2	Verluste	116
6.4	Betriebsverhalten unter Last	118
6.4.1	Stromdichteverdrängung	118
6.4.2	Betriebskennfelder	119
6.4.3	Maximalkennlinie	120
6.4.4	Wirkungsgrad	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Anhang	129
A.1	Grundlagen zum magnetischen Kreis	129
A.2	Richtwerte bei der Maschinenauslegung	133
	Literaturverzeichnis	134



Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
AP	Arbeitspunkt
ASM	Asynchronmaschine
Dy	Dysprosium
FB1 / FB2	Feldschwächbereich 1 / 2
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Element Methode
FSM	Fremderregte Synchronmaschine
GDB	Grunddrehzahlbereich
GM	Gleichstrommaschine
KG-MPSO	Kriging-gestützte multikriterielle Partikelschwarmoptimierung
LHS	Latin Hypercube Sampling
MMPA	Maximales Moment pro Ampere
MMPV	Maximales Moment pro Volt
MPSO	Multikriterielle Partikelschwarmoptimierung
MPSO+Pre-Eval	um Pre-Evaluation erweiterte MPSO
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
p5q2T3	Maschine mit Polpaarzahl $p = 5$, Lochzahl $q = 2$ und der Rotorvariante T3
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PSO	Partikelschwarmoptimierung
SE	Seltene Erden
SmCo	Samarium-Kobalt
SSE	Schwere Seltene Erden
T2, T3	tangential angeordnete Magnete
Tb	Terbium
V1, V2	Magnete in V-Anordnung



Formelzeichen

Symbol	Erläuterung
a	Anzahl der parallelen Zweige
A	Fläche, Archiv
$ A $	Größe des Archivs
A_{\max}	Obergrenze der Archivgröße
A_{Nut}	Nutfläche
\underline{A}_r	Koeffizientenmatrix der linearen Restriktionen
b	Anzahl der Segmente bei Staffelung
\vec{b}	lokal beste Position (best local guide)
b_{m1}, b_{m2}, b_{m3}	Breite der Magnete
b_n	Nutöffnung
\vec{b}_r	Spaltenvektor der linearen Restriktionen
b_{s1}, b_{s2}	Breite der Stege
b_{sp}	Breite einer Spulenseite
b_z	Zahnbreite
B	magnetische Flussdichte
B_r	Remanenzflussdichte
c_1, c_2	Beschleunigungskoeffizienten
d	Abstand
\bar{d}	mittlerer Abstand
d_{f1}, d_{f2}, d_{f3}	vertikaler Abstand der Flussbarrieren
d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}	Abstand der Magnete zur Oberfläche
D	Menge der nicht-dominierten Lösungen in einem Hyperwürfel
D_{ra}	Rotoraußendurchmesser
D_{ri}	Rotorinnendurchmesser
D_{sa}	Statoraußendurchmesser
E	Ebene
f, \vec{f}	elektrische Frequenz, Zielfunktion, Vektor der Zielfunktionen
F	Kraft, Zielfunktionsraum
\mathcal{F}	Regressionsfunktion
\underline{F}	Regressionsfunktionen ausgewertet an den Stützstellen
F'	bezogene Kraft
F^*	Pareto-Front
\vec{g}	Schwarmführer
$g(\vec{x})$	Restriktionsfunktion
$g_r(\vec{x})$	lineare Restriktion
h_j	Jochhöhe
h_{m1}, h_{m2}, h_{m3}	Höhe der Magnete
H	magnetische Feldstärke
\mathcal{H}	dominiertes Hypervolumen
$\bar{\mathcal{H}}$	mittleres dominiertes Hypervolumen
H_{cB}	Koerzitivfeldstärke bzgl. der Flussdichte
H_{cJ}	Koerzitivfeldstärke bzgl. der Polarisierung



Symbol	Erläuterung
\mathcal{H}_j	Zuwachs des dominierten Hypervolumens
H_{\max}	maximal zulässige Feldstärke
$\mathcal{H}_{\text{opt},j}$	optimistischer Zuwachs des dominierten Hypervolumens
H_{pm}	Feldstärke im Magnet
i	Zählindex
\vec{i}	Statorstromzeiger
i_a, i_b, i_c	Strangströme
i_d, i_q	Statorströme im dq-System
i_{ks}	stationärer Kurzschlussstrom
i_{\max}	maximaler Strangstrom
I	Strangstrom (Effektivwert)
I_{ph}	Phasenstrom (Effektivwert)
j	Zählindex
J	Stromdichte, magnetische Polarisierung
J_s	Sättigungspolarisierung
k	Zählindex, Iteration, Anzahl der Terme der Regressionsfunktion
$k_{\text{cu,v}}, k_{\text{cu,k}}$	Kupferfüllfaktor verteilte und konzentrierte Wicklung
k_f	Umformbarkeit des Wickelkopfes
k_{fe}	Eisenfüllfaktor bzw. Stapelfaktor
k_j	Verhältnis Jochhöhe zu Zahnbreite
k_{\max}	maximale Anzahl an Iterationen
k_r	Widerstandserhöhung
k_{s1}, k_{s2}	Faktor der mechanischen Spannungsüberhöhung
k_u	Verhältnis zwischen der induzierten Spannung bei T_{\min} und T_0
l_{fe}	aktive Länge (des Statorblechpakets)
l_{ges}	Gesamtlänge inkl. Wickelkopf
l_{rel}	relative Windungslänge
l_{rot}	axiale Länge des Rotors
l_{st}	axialer Abstand zwischen Wickelkopf und Blechpaket
l_{vs}	axiale Länge der Verschaltung
l_w	Wickelkopflänge
l_{wk}	axiale Länge des Wickelkopfes
l_{FEM}	aktive Länge in der FEM-Rechnung
L	Statorinduktivität
L_a, L_b, L_c	Stranginduktivitäten
$L_{\text{ab}}, L_{\text{bc}}, L_{\text{ca}}$	Gegeninduktivitäten
L_d	Induktivität in der Längsachse
L_h	Hauptinduktivität
L_{oR}	Induktivität ohne Rotor
L_q	Induktivität in der Querachse
L_σ	Streuinduktivität
$L_{\sigma w}$	Wickelkopfstreuinduktivität
m	Anzahl der Zielgrößen, Masse
m_{pm}	Magnetmasse
m_s	Strangzahl
M	Drehmoment



Symbol	Erläuterung
M_0	gefordertes Drehmoment
M_{el}	inneres Drehmoment
M_{ks}	stationäres Kurzschlussmoment
M_{norm}	normiertes Drehmoment
M_{rel}	Reluktanzmoment
M_{ripp}	Drehmomentwelligkeit
M_{syn}	Synchronmoment
M_{La}	Lagermoment
n	Drehzahl, Anzahl der Parameter
\vec{n}	Normalenvektor
n_c	Anzahl der Rechenkerne
n_{e1}	Eckdrehzahl (Übergang GDB \rightarrow FB1)
n_{e2}	Eckdrehzahl 2 (Übergang FB1 \rightarrow FB2)
n_k	Anzahl der Restriktionsfunktionen
n_{max}	Maximaldrehzahl
n_{norm}	normierte Drehzahl
n_r	Anzahl der linearen Restriktionsfunktionen
N	spannungshaltende Windungszahl, Menge der nicht-dom. Lösungen
$ N $	Anzahl der nicht-dominierten Lösungen
N_e	Anzahl an Funktionsauswertungen
N_{sp}	Spulenwindungszahl
N_{spn}	Menge der Startpunkte für das Spawning
p	Polpaarzahl, Anzahl der Stützstellen des Kriging-Modells
\vec{p}	persönlich beste Position
P	Leistung, Menge von Lösungen
P_0	geforderte mechanische Leistung
P_b	anomale Wirbelstromverluste
P_{cu}	ohmsche Verluste
P_{el}	elektrische Leistung
P_{fe}	Eisenverluste bzw. Ummagnetisierungsverluste
P_h	Hystereseverluste
P_{me}	mechanische Leistung
P_{norm}	normierte, mechanische Leistung
P_{pm}	Wirbelstromverluste im Magnet
P_v	Verlustleistung
P_w	Wirbelstromverluste
P_{La}	Lagerreibungsverluste
P_{Lu}	Luftreibungsverluste
$P_{v,me}$	mechanische Verluste
q	Lochzahl, Anzahl an Partikel, Schwarmgröße
Q	Menge der Partikel des Schwarms
r	Abstand des Schwerpunktes von der Rotationsachse
\vec{r}_1, \vec{r}_2	gleichverteilte Zufallszahlen
R, R_a, R_b, R_c	Strangwiderstände
\underline{R}	Korrelationsmatrix
\mathcal{R}	Korrelation