

Erforschung von Designaspekten
bei „High-Speed“-Asynchronmaschinen
hinsichtlich der Verwendung in der Luftfahrt

Hans-Christian Lahne



Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

EAA Elektrische Antriebstechnik und Aktorik
Electrical Drives and Actuators

Chair: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 21

Hans-Christian Lahne

**Erforschung von Designaspekten
bei "High-Speed"-Asynchronmaschinen
hinsichtlich der Verwendung in der Luftfahrt**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4663-2

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

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Ergebnissen einer Machbarkeitsstudie der elektrischen Antriebstechnik im Bereich des hybriden Fliegens. Hierzu wird eine Asynchronmaschine als Turbogenerator mit einer Drehzahl von 50000 rpm in einer Leistungsklasse von 700 kW ausgelegt, um die Energieversorgung eines Flugzeugs zu gewährleisten.

Die Arbeit stellt die grundlegenden Designrichtlinien für schnell drehende elektrische Maschinen hoher Leistung dar und verschafft mit einem Topologievergleich elektrischer Maschinen einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik hinsichtlich des Hochdrehzahlbereichs. Zunächst werden analytische Berechnungen hinsichtlich der Betriebsdaten der Maschine sowie Geometrie- und Bauraumabschätzungen zur auszulegenden Asynchronmaschine vorgestellt. Anschließend werden mechanische Designbetrachtungen beschrieben. Hürden bei der mechanischen Konstruktion, wie die maximale Umfangsgeschwindigkeit und Größe des Rotors, werden hierzu näher untersucht. Des Weiteren werden Überlegungen zu möglichen Sicherheitsfaktoren unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen in Luftfahrtanwendungen thematisiert. Numerische Stabilitätsanalysen erweitern dieses Kapitel. Potentialabschätzungen für luftfahrt-taugliche Materialien hoher Leistungsfähigkeit werden ebenfalls vorgenommen. Ferner werden diverse Verlustbetrachtungen elektrischer Maschinen behandelt. Dazu zählen Eisen- und Leiterverluste sowie Reibungsverluste, die bei hohen Drehzahlen signifikant in Erscheinung treten. Zur Abführung der Verluste werden thermische Betrachtungen angestellt. Hierzu werden denkbare Kühlmedien auf ihre Eignung untersucht und etwaige Gefahren diskutiert. Schließlich wird eine Wasserstoff-Wasser-Kombination herausgearbeitet und durch Simulationen verifiziert. Die Ergebnisse werden genutzt, um elektromagnetische Betrachtungen durchzuführen und ein leistungsfähiges Generatormodell zu entwerfen. Das finale Design zeigt eine 6-phasige Asynchronmaschine, welche sich durch eine hohe Zuverlässigkeit auszeichnet. Der Wirkungsgrad der ausgelegten Asynchronmaschine übersteigt den ursprünglich geforderten Wert von 94% um mehr als 2%. Zur Vertiefung des elektromagnetischen Designs werden Ansätze zur Reduzierung der Simulationszeit numerischer Rechnungen beschrieben und Verbesserungsvorschläge zum Einschwingverhalten von Asynchronmaschinen in Betracht gezogen. Diese sind im Zusammenhang mit der Simulation dieser „High-Speed“-Asynchronmaschine zwingend notwendig, um Ergebnisse in akzeptabler Zeit verfügbar zu machen. Auslegungshinweise für „High-Speed“-Anwendungen schließen die Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	III
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Maxwell-Gleichungen	3
1.2 Die Asynchronmaschine.....	5
1.3 Motivation des Powerlab-Projekts	5
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2 ANALYTISCHE BERECHNUNGEN	10
2.1 Drehmoment und Polzahl.....	10
2.2 Leistungsfaktor und Wirkungsgrad	10
2.3 Größe des Luftspalts und Polteilung	13
2.4 Bauraumbetrachtungen.....	14
2.4.1 Drehmoment aus Volumen	14
2.4.2 Erforderlicher Bauraum.....	16
2.4.3 Weitere Abschätzungen	18
2.4.4 Neuer Ansatz zum erforderlichen Bauraum.....	18
2.5 Kippmoment und Kipp-schlupf.....	20
2.6 Strangspannung und Strangstrom	21
3 ÜBERBLICK UND BEWERTUNG DIVERSENER MASCHINENTOLOGIEEN	24
3.1 Arten von Maschinen.....	24
3.1.1 Überblick über „High-Speed“-Maschinen aus der Literatur.....	26
3.1.2 Bewertung der Rechercheergebnisse und Grenzen einiger Maschinentypen	32
3.2 Einzelne Bewertung der existierenden Maschinentopologien.....	33
3.2.1 ASM mit Käfigläufer und Solid-Rotor.....	34
3.2.2 Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	34
3.2.3 PMSM und BLDC.....	34
3.2.4 Fremderregte Synchronmaschine	35
3.2.5 Geschaltete Reluktanzmaschine.....	36
3.2.6 Synchrone Reluktanzmaschine	37
3.2.7 Gleichstrommaschine	37
3.2.8 Homopolar- und Heteropolar-Maschine	37
3.2.9 Transversalflussmaschine.....	38
3.2.10 Universalmotor	38
3.2.11 Piezoantrieb und Wanderwellenmotor.....	38
3.2.12 Linearmotoren	39
3.2.13 Auswahl der passenden Maschinentopologien.....	39
3.3 Anwendungsgebiete von „High-Speed“-Maschinen.....	41

4	MECHANISCHE DESIGNBETRACHTUNGEN	42
4.1	Die maximale Umfangsgeschwindigkeit des Rotors	42
4.1.1	Streckgrenze und Zugfestigkeit	42
4.1.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl ..	44
4.1.3	Beispielrechnung zum Rotoraußendurchmesser	45
4.2	Analyse der Möglichkeiten eines Außenläufers und eines Getriebeeinsatzes	47
4.2.1	Bewertung eines Außenläufers	47
4.2.2	Bewertung eines Getriebes im Vergleich zum Direktantrieb	48
4.3	Sicherheitsfaktor bei der Auslegung des Turbogenerators	50
4.3.1	Maximale Drehzahl von (Gas-)Turbinen	52
4.3.2	Neubewertung des Sicherheitsfaktors und der damit verbundenen Schleuderprobe	52
4.4	Maximaler Außendurchmesser von Rotoren	53
4.5	Rotoraußendurchmesser und axiale Baulänge	54
4.6	Numerische Spannungsanalyse mittels Ansys Mechanical	55
4.6.1	Grundlegende Überlegungen zur Modellierung in Ansys Mechanical	55
4.6.2	Stabilitätsanalyse des ausgelegten Modells	60
4.6.3	Optimierungsansätze für weitere Arbeiten	63
4.6.4	FKM-Richtlinie	65
4.6.5	Bewertung der Stabilität	65
4.7	Critical Speed – Biege- und Torsionsschwingungen	66
4.7.1	Berechnung der kritischen Drehzahl – Rotor und Welle	69
4.7.2	Berechnung der kritischen Drehzahl – nur Welle	70
4.7.3	Vergleich und Bewertung der Ansätze	71
4.7.4	Validierung der analytischen Ergebnisse mittels FEM	73
4.8	Welle-Nabe-Verbindung	76
5	VERLUSTBETRACHTUNGEN ZU EISEN- UND KUPFERVERLUSTEN	80
5.1	Verluste im Betrieb elektrischer Maschinen	80
5.1.1	Berechnung der Eisenverluste	81
5.1.2	Berechnung der Zusatzverluste	84
5.1.3	Skin-Effekt	84
5.1.4	Proximity-Effekt	86
5.1.5	Stromverdrängung aufgrund des Nutenquerfeldes	86
5.1.6	Abschätzung des Skin-Effekts anhand der Daten des Lastenhefts	90
5.2	Maßnahmen zur Minimierung der Verluste in elektrischen Maschinen	91
5.2.1	Abschätzung des Skin-Effekts anhand des Wicklungsdesigns des Turbogenerators	91
5.2.2	Drahtmischung aus Litzen	92

6	„HIGH-SPEED“-MASCHINEN – SCHNELL DREHENDE MASCHINEN	94
6.1	Größe und Anzahl der Stator- und Rotornuten	95
6.2	Stromdichte im Leiter	95
6.3	Material in den Rotorstäben.....	96
6.4	Grenzen der Umfangsgeschwindigkeit von Rotoren – Stand der Technik	99
6.5	Massive Rotoren – Solid-Rotor	102
6.5.1	Schlitze in massiv gefertigten Rotoren	103
6.5.2	Coating als Optimierungsverfahren für massiv gefertigte Rotoren	103
6.5.3	Verwendetes Eisenmaterial in massiv gefertigten Rotoren aus der Literatur	104
6.5.4	Ältere Versuche zu massiv gefertigten Rotoren	105
6.6	Materialvergleich und Bewertung verschiedener Legierungen.....	105
6.6.1	Kobalt- und Silizium-Eisenlegierungen im Vergleich	107
6.6.2	Verlustvergleich von M270-35A und Vacoflux 50	108
6.6.3	Arten von Vacodur 50 im direkten Vergleich	111
6.6.4	Statoreisenmaterial Vacoflux 48	112
6.6.5	Graphischer Vergleich mehrerer Eisenmaterialien	112
6.6.6	Weitere weichmagnetische Werkstoffe und Ausschlussmatrizen anhand der Materialarten.....	113
6.7	Verluste bei höheren Drehzahlen	116
6.7.1	Reibungsverluste – Theorie Teil 1.....	117
6.7.2	Reibungsverluste – Theorie Teil 2.....	119
6.7.3	Reibungsverluste – Werte aus der Praxis.....	120
7	THERMISCHE DESIGNBETRACHTUNGEN	121
7.1	Grundlagen der Kühlmittel	121
7.1.1	Vergleich von Luft, Helium und Wasserstoff	121
7.1.2	Entflammbarkeit und Explosionsgefahr	122
7.2	Thermische Auslegung	123
7.2.1	Analytische Vorbetrachtungen	123
7.2.2	Thermische Modellierung in Motor-CAD	127
7.2.3	Eingangs-/Ausgangsverhältnisse und Ergebnisse der Temperaturanalyse	128
8	ELEKTROMAGNETISCHE BETRACHTUNGEN	132
8.1	Die magnetischen Beanspruchungen	132
8.1.1	Grenzen der maximalen magnetischen Flussdichte.....	132
8.1.2	Pulsationsverluste.....	133
8.1.3	Einfluss von neuen Materialien auf die maximale magnetische Flussdichte	133
8.1.4	Sättigungseffekte.....	133
8.1.5	Offene, halbgeschlossene und geschlossene Nutformen im Stator und Rotor	135
8.2	Entstehung von Oberwellen	139

8.3	Auswirkungen von Schrägung.....	139
8.4	Wicklungstopologie.....	140
8.5	Wicklungswiderstand.....	142
8.6	Leiter- bzw. Kupferverluste.....	143
8.7	Wickelkopfinduktivität.....	144
8.8	Betriebsdaten des Designs inklusive zugehöriger Maschinenkennfelder	144
8.9	Ergebnisevaluation.....	147
8.10	Vergleich mit einem PMSM Design.....	148
9	SIMULATIONSSPEZIFISCHE ASPEKTE FÜR ANSYS MAXWELL	149
9.1	Vergleich von 2D- und 3D-Simulationen.....	149
9.2	Signalabtastung in Ansys Maxwell.....	151
9.3	Möglichkeiten zur Reduktion der Simulationszeit bzw. zum schnelleren Erreichen eines stationären Zustands	155
9.3.1	Definition von Anfangsstromwerten	155
9.3.2	Vorgabe eines Rotorstartwinkels	156
9.3.3	Verwendung einer Cos-Funktion	157
9.3.4	Eingabe einer Exponentialfunktion	157
9.3.5	Optimierung der Zeitschrittweite.....	158
9.3.6	Auswahl eines Ansatzes und Gesamtbewertung	159
10	AUSLEGUNGSHINWEISE BEI „HIGH-SPEED“-MASCHINEN	161
10.1	Fertigungstechnische Aspekte	161
10.1.1	Blechfertigung.....	161
10.1.2	Blechdicke und Paketfüllfaktor.....	161
10.1.3	Mindestgrößen bei Skalierungen.....	162
10.1.4	Bandagen	162
10.2	Polpaarzahl.....	166
10.3	Leistungsfaktor.....	167
10.4	Leistungselektronik.....	167
10.5	Optimierungsmaßnahmen aus der Literatur	168
10.6	Alternative Auslegung – Critical Speed bei anderem Rotordesign	168
10.7	Simulative Aspekte.....	171
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	174
12	ANHANG.....	176
12.1	Abbildungen.....	176
12.2	Tabellen.....	192
	VARIABLEN- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	204
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	211
	TABELLENVERZEICHNIS.....	217
	LITERATURVERZEICHNIS	221