



INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE
ANTRIEBSTECHNIK UND MASCHINEN
<http://www.eam.tugraz.at>



Diplomarbeit

Konzeptstudie zur Auswahl eines Generators für eine Windturbine kleiner Leistung

Andreas Baumgartner

Durchgeführt am

Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen

Im Auftrag von:



Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krischan
Dipl.-Ing. Dr.techn. Günther Dannerer

Graz, Juli 2010

Danksagung

Für die umfangreiche Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich bei Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krischan und Dipl.-Ing. Dr.techn. Günther Dannerer bedanken. In vielen ausführlichen Besprechungen haben sie mir wertvolle Informationen und Anregungen gegeben und waren immer für Diskussionen offen.

Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist, mögliche Generatoren für eine Windturbine kleiner Leistung mit Hilfe von Literatur zu vergleichen. Dabei wird eine Auswahl von Generatoren unterschiedlicher Bauform hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Vor- und Nachteile näher untersucht und gegenübergestellt. Es wird auf besondere Anforderungen, die an einen Generator für eine kleine Windturbine gestellt werden, eingegangen. Der Schwerpunkt wird auf eine lange Lebensdauer, Wartungsfreundlichkeit, einen hohen Wirkungsgrad und ein gutes Anlaufverhalten gelegt.

Es werden unterschiedliche Methoden, um den Generator bei zu hohen Windgeschwindigkeiten, für Wartungsarbeiten oder für eine Notabschaltung abzubremesen beschrieben. Die Generatoren werden auch hinsichtlich der Möglichkeit einer Bremsung ohne Hilfsenergie betrachtet.

Die Umformung der aus dem Wind gewonnenen Energie auf eine zur Netzeinspeisung geeigneten Spannung und Frequenz durch am Markt verfügbare Wechselrichter ist ebenfalls Bestandteil dieser Diplomarbeit. Weiters wird die aktuelle österreichische Gesetzeslage für eine Netzeinspeisung mit diesen Wechselrichtern einbezogen.

Abstract

The aim of this diploma thesis is a literature based comparison of different electric generators for the use in micro wind turbines. A selection of generators is reviewed and their technical and economical advantages and disadvantages are examined. The special requirements for generators used in micro wind turbines are considered. The focus is set on durability, easy maintenance, high efficiency and good starting behaviour.

Different methods for electric braking are considered. These are necessary to save the system from wind gusts, for maintenance reasons or emergency shut downs. An important characteristic of a wind generator is the ability of braking without auxiliary energy.

Another part of this diploma thesis is the review of available wind inverters to connect the system to the utility grid. In addition the legal requirements to comply with the Austrian law are investigated.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Berechnung des Energiegehalts von Wind.....	2
2.2 Betriebszustände einer Windturbine.....	3
2.3 Aerodynamische Leistungsregelung.....	3
2.4 Konstante vs. variable Drehzahl.....	5
2.5 Getriebe.....	7
2.6 Oberwellenmomente.....	8
2.6.1 Nutrastmomente.....	8
2.6.1.1 Nutrastmomente beim Start einer Windturbine.....	9
2.6.1.2 Nutrastmomente im Betrieb einer Windturbine.....	10
2.6.1.3 Maßnahmen gegen Nutrastmomente.....	10
2.6.1.3.1 Variabler Luftspalt.....	10
2.6.1.3.2 Polbreite zu Polabstands-Verhältnis.....	10
2.6.1.3.3 Schrägung.....	11
2.7 Bemessung der Nennleistung des Generators in Abhängigkeit vom Aufstellungsort.....	12
2.8 Anlaufwindgeschwindigkeit.....	14
2.9 Polzahl des Generators.....	14
3 Vergleich ausgewählter Generatortypen.....	15
3.1 Asynchrongenerator.....	15
3.1.1 Allgemeines.....	15
3.1.2 Funktionsprinzip.....	15
3.1.3 Schleifringläufer.....	16
3.1.4 Käfigläufer.....	16
3.1.5 Axialfluss-Asynchronmaschine.....	17
3.1.6 Wirkungsgrad.....	17
3.1.7 Direktantrieb.....	18
3.1.8 Bremsverhalten.....	18
3.1.9 Etablierung.....	19
3.2 Bürstenlose Generatoren mit Permanentmagneten.....	20
3.2.1 Allgemeines.....	20
3.2.2 Steuerung der Ausgangsspannung.....	21
3.2.3 Entmagnetisierung der Permanentmagnete.....	22
3.2.4 Oberflächen- und vergrabene Magnete.....	22
3.2.5 Radialflussmaschine.....	23
3.2.5.1 Konventionelle Innenläufer-Radialflussmaschine.....	23
3.2.5.2 Außenläufer-Radialflussmaschine.....	24
3.2.5.3 E-Kern Radialflussmaschine.....	25
3.2.5.4 Ausführung der Ankerwicklung bei Radialflussmaschinen.....	25
3.2.6 Axialflussmaschinen.....	26
3.2.6.1 Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator.....	27
3.2.6.2 Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor.....	27
3.2.6.3 Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Statorbalancierung.....	28
3.2.6.4 Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung.....	28
3.2.6.5 Axialflussmaschine mit Luftspalt- oder Toruswicklung.....	28
3.2.6.5.1 Feldverlauf, Luftspaltflussdichte und Spannungsqualität.....	30
3.2.6.5.2 Ersatzschaltbild.....	33
3.2.6.5.3 Verluste und Wirkungsgrad.....	33

3.2.6.5.4 Betriebsverhalten.....	34
3.2.7 Permanentmagneterregte Transversalflussmaschine.....	37
3.2.8 Permanentmagneterregte Klauenpolmaschine.....	40
3.2.8.1 Nutrastmoment.....	41
3.2.8.2 Spannungsqualität.....	41
3.2.8.3 Zusammenfassung.....	43
3.2.9 Hybrid Permanentmagnet Maschinen.....	43
3.2.9.1 Permanentmagnet Reluktanz Generator.....	43
3.2.9.2 Synchronmaschine mit Doppelstator.....	44
3.2.10 Zusammenfassung Generatoren mit Permanentmagneten.....	46
3.3 Synchronmaschine mit elektrischer Erregung.....	46
3.4 Bürstenbehaftete Gleichstrommaschine.....	47
3.5 Geschalteter Reluktanzgenerator.....	47
3.5.1 Aufbau.....	47
3.5.2 Funktionsprinzip.....	48
3.5.3 Eigenschaften.....	48
3.5.4 Zusammenfassung.....	49
3.6 Klauenpolmaschine.....	50
4 Vergleich permanentmagneterregter Generatoren.....	51
4.1 Vergleich von Axial- und Radialflussmaschinen.....	51
4.1.1 Vergleich aus „PM Wind Generator Topologies“.....	51
4.1.1.1 Drehmomentdichte.....	52
4.1.1.2 Magnetgewicht.....	53
4.1.1.3 Kupfergewicht.....	54
4.1.1.4 Blechgewicht.....	55
4.1.1.5 Aktives Material.....	55
4.1.1.6 Wirkungsgrad.....	56
4.1.1.7 Zusammenfassung.....	57
4.2 Drehmomentdichte und Kosten/Drehmoment.....	57
4.2.1 Vergleich anhand von Prototypen.....	57
4.2.1.1 Drehmomentdichte.....	57
4.2.1.2 Kosten/Drehmoment.....	57
4.2.1.3 Vergleich Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Axialflussmaschine mit Toruswicklung.....	58
4.2.1.4 Vergleich Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Transversalflussmaschine.....	58
4.2.1.5 Vergleich permanentmagneterregte Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten (Flusskonzentration).....	59
4.2.1.6 Geschaltete Reluktanzmaschine (switched reluctance machine).....	59
4.2.1.7 Axialflussmaschine mit vergrabenen Magneten.....	60
4.2.1.8 Transverse Vernier Individual Hybrid Reluctance Machine.....	60
4.2.2 Vergleich mit Hilfe eines Computermodells.....	61
4.3 Zusammenfassung.....	63
5 Elektrische Bremsung.....	65
5.1 Kurzschlussbremsung.....	66
5.2 Bremsen mit NTC Widerständen.....	68
6 Gleichrichter.....	71
6.1.1 Gleichrichter für Generatoren mit Permanentmagneten.....	71
6.1.1.1 Diodengleichrichter.....	71
6.1.1.2 Gleichrichter mit MOSFETs.....	72

6.1.1.3 Gesteuerte Gleichrichter.....	73
7 Wechselrichter.....	74
7.1 Gesetze in Österreich.....	74
7.2 Gegenüberstellung einer Auswahl verfügbarer Windwechselrichter.....	76
7.2.1 SMA Windy Boy.....	76
7.2.2 Windmaster 500 von Mastervolt.....	78
7.2.3 Aurora Windwechselrichter von Power One.....	79
7.3 Zusammenfassung.....	80
8 Conclusio.....	81
9 Verzeichnisse.....	83
9.1 Literaturverzeichnis.....	83
9.1.1 Bücher und Papers.....	83
9.1.2 Internetquellen.....	85
9.2 Abbildungsverzeichnis.....	86
9.3 Tabellenverzeichnis.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Windturbine mit Ummantelung der Firma qpunkt.....	1
Abbildung 2: Typische Leistungskurven und Betriebspunkte einer Windturbine mit Strömungsabriss "stall limited" (gestrichelte Linie) und einer Windturbine mit verstellbaren Rotorblättern "pitch controlled" (durchgezogene Linie).....	3
Abbildung 3: Strömungsabriss an einem Rotorblatt.....	4
Abbildung 4: Gesamtsystemwirkungsgradvergleich einer Käfigläufer-Asynchronmaschine bei fixer (FSIG) und variabler (VSIG) Drehzahl.....	6
Abbildung 5: Wirkungsgrad einer typischen Windturbine bei unterschiedlichen Schnelllaufzahlen..	9
Abbildung 6: Nutrastmoment bei konstantem Luftspalt (schwarz) und variablem Luftspalt (blau)..	10
Abbildung 7: Nutrastmoment für verschiedene Polbreiten.....	11
Abbildung 8: Nutrastmoment mit unterschiedlichen Graden der Schrägung.....	12
Abbildung 9: Jahresenergieertrag in Abhängigkeit der Generatormennleistung.....	13
Abbildung 10: Drehzahl-, Drehmomentkennlinie einer typischen Asynchronmaschine	16
Abbildung 11: Wirkungsgrad eines Asynchronmotors als Funktion von Drehmoment und Drehzahl	18
Abbildung 12: Innenläufer-Radialflussmaschine.....	23
Abbildung 13: Außenläufer-Radialflussmaschine.....	24
Abbildung 14: Radialflussmaschine mit E-Kernen.....	25
Abbildung 15: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator.....	27
Abbildung 16: Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Statorbalancierung.....	28
Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung.....	29
Abbildung 18: Rotor mit Permanentmagneten einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung.....	29
Abbildung 19: Stator einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung.....	29
Abbildung 20: 2D Flussverlauf in einer PM Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung (a) unbelastet (b) belastet.....	31
Abbildung 21: Berechnete axiale Komponente der Luftspaltflussdichte in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine.....	32
Abbildung 22: Berechnete Komponente der Luftspaltflussdichte entlang des Umfanges in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine.....	32
Abbildung 23: Ersatzschaltbild einer Phase der Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung und	

ohmscher Last.....	33
Abbildung 24: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei verschiedenen konstanten Drehzahlen:.....	35
Abbildung 25: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei variabler Drehzahl und bei verschiedenen konstanten Lastwiderständen:.....	36
Abbildung 26: permanentmagneterregte Transversalflussmaschine.....	38
Abbildung 27: Transversalfluss Reluktanzmaschine.....	38
Abbildung 28: zweiseitige permanentmagneterregte Transversalflussmaschine.....	38
Abbildung 29: permanentmagneterregte Transversalflussmaschine mit einfacherem Aufbau.....	39
Abbildung 30: Ein Phasenmodul der permanentmagneterregten Transversalflussmaschine mit einfacherem Aufbau.....	39
Abbildung 31: Rotor einer permanentmagneterregten Klauenpolmaschine.....	40
Abbildung 32: berechnetes Nutrastmoment einer 1,6kW permanentmagneterregten Klauenpolmaschine, blaue Linie: ohne Schrägung, schwarze Linie: mit Schrägung.....	41
Abbildung 33: Spektrum der Statorspannung bei 500U/min, Grundschiwingung bei 33,3Hz.....	42
Abbildung 34: Spannungsform der permanentmagneterregten Klauenpolmaschine für unterschiedliche Drehzahlen.....	42
Abbildung 35: Spektrum der Statorspannung bei 750U/min, Grundschiwingung bei 50Hz.....	42
Abbildung 36: Spektrum der Phasenspannung bei 1500U/min, Grundschiwingung bei 100Hz.....	42
Abbildung 37: Permanentmagnet-Reluktanz-Generator.....	43
Abbildung 38: Schnitt des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator.....	45
Abbildung 39: Strukturmodell des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator.....	45
Abbildung 40: Prototyp des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator.....	45
Abbildung 41: Permanentmagnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator..	45
Abbildung 42: DC-Feld Magnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator....	45
Abbildung 43: 3D-Modell eines dreiphasigen geschalteten Reluktanzgenerators, dargestellt sind nur die Wicklungen einer Phase.....	47
Abbildung 44: Magnetischer Fluss als Funktion des Stromes in einem geschalteten Reluktanzgenerator.....	48
Abbildung 45: Induktivitäts-, Spannungs- und Stromverlauf eines geschalteten Reluktanzgenerators	48
Abbildung 46: Drehmomentdichte für direkt angetriebene Generatoren.....	52
Abbildung 47: Magnetgewicht für direkt angetriebene Generatoren.....	53
Abbildung 48: Kupfergewicht für direkt angetriebene Generatoren.....	54
Abbildung 49: Kupfergewicht für schnell laufende Generatoren mit Getriebe.....	54
Abbildung 50: Blechgewicht für direkt angetriebene Generatoren.....	55
Abbildung 51: Aktives Material für direkt angetriebene Generatoren.....	55
Abbildung 52: Wirkungsgrad für direkt angetriebene Generatoren.....	56
Abbildung 53: Wirkungsgrad für schnell laufende Generatoren mit Getriebe.....	56
Abbildung 54: Drehmomentdichte für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung).....	59
Abbildung 55: Kosten/Drehmoment für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung).....	59
Abbildung 56: Drehmomentdichte für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten.....	60
Abbildung 57: Kosten/Drehmoment für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten.....	60
Abbildung 58: Nuten einer Axialflussmaschine mit R_{li} :innerer Radius und R_{lo} :äußerer Radius.....	62
Abbildung 59: dreiphasiger Gleichrichter mit Bremsfunktion.....	67
Abbildung 60: dreiphasiger Gleichrichter mit automatischer Bremsfunktion.....	67

Abbildung 61: System einer Mikrowindturbine.....	69
Abbildung 62: Zeitkonstanten für den Bremsvorgang mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen.....	70
Abbildung 63: Maximalströme während des Bremsvorganges mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen.....	70
Abbildung 64: Typische Anordnung eines Permanentmagnetgenerators mit variabler Drehzahl und Netzeinspeisung.....	71
Abbildung 65: ORING Controller IR1167.....	73
Abbildung 66: Wirkungsgrad idealer, Dioden-, und synchroner Gleichrichter.....	73
Abbildung 67: SMA Windy Boy.....	76
Abbildung 68: Sunny BEAM Fernüberwachung per Bluetooth.....	76
Abbildung 69: Windmaster 500 von Mastervolt.....	78
Abbildung 70: Aurora Windwechselrichter von Power One.....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Jahresenergieertrag bei unterschiedlichen Anlaufwindgeschwindigkeiten.....	14
Tabelle 2: Vergleich von Axialflussmaschine mit vergrabenen Magneten, Transversalflussmaschine mit einseitigen oberflächenbefestigten Magneten (Single-Sided Surface Magnets), Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung.....	61
Tabelle 3: Vergleich von Transverse Vernier Individual Hybrid Reluctance Machine, Axialflussmaschine mit Toruswicklung und Transversalflussmaschine mit doppelseitiger Flusskonzentration.....	61
Tabelle 4: Designs der Axialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment.....	63
Tabelle 5: Designs der Radialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment.....	63
Tabelle 6: Übersicht der Generatoreigenschaften für eine Windturbine kleiner Leistung.....	64
Tabelle 7: Daten der NTC Widerstände.....	70

1 Aufgabenstellung



Abbildung 1: Windturbine mit Ummantelung der Firma qpunkt

Zum Portfolio der Firma qpunkt gehört die numerische Strömungssimulation zur Aerodynamikentwicklung für die Automobilindustrie. Mit dem Beginn der Wirtschaftskrise 2008/09 stagnierte die Auftragslage. Frei nach dem Motto „Mit Innovation durch die Krise“ wurde das Know-how und die technischen Möglichkeiten zur Simulation in einen anderen Bereich übertragen. Das Ergebnis dieser Bemühungen ist eine neuartige, aerodynamisch optimierte Windturbine mit Ummantelung. Dieses Konzept ermöglicht eine weitaus höhere Energieernte bei gleicher Rotorfläche als dies herkömmlichen kleinen Windkraftwerken möglich ist. Passend zum aerodynamisch perfektionierten Design soll durch diese Diplomarbeit auch der optimale Generator für das System ausgewählt werden.

Eine Analyse der am Markt angebotenen Standardlösungen und eine Literaturrecherche sollen dazu beitragen diese Aufgabe zu lösen. Eine Integration des Generators in die Ummantelung wurde zu Projektbeginn erwogen, später aber aus technischen Gründen wieder verworfen.

Um die erste Serie der Windturbine ins Stromnetz zu integrieren, soll ein bereits am Markt verfügbarer Wechselrichter herangezogen werden. Diesen auszuwählen ist ebenfalls Bestandteil der Studie.

2 Grundlagen

2.1 Berechnung des Energiegehalts von Wind

Bewegte Luftmassen werden als Wind bezeichnet. Die kinetische Energie E_K , die im Wind enthalten ist, ist proportional zu

$$E_K \sim \frac{1}{2} m \cdot v^2 . \quad (1)$$

Die Luftmasse m , welche eine gewisse Fläche A pro Zeiteinheit passiert kann mit

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (2)$$

berechnet werden.

ρ ... Luftdichte

v ... Windgeschwindigkeit

A ... Fläche

Die Leistung kann nun mit

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

berechnet werden.

$$\boxed{P \sim v^3} \quad (4)$$

Die Luftdichte wird mit der Formel

$$\rho = \frac{348,8 \cdot p}{T} \quad (5)$$

berechnet und schwankt aufgrund von Luftdruck- und Temperaturänderungen um 10-15% im Jahresverlauf.¹

p ... Luftdruck

T ... Temperatur

¹ Vgl. Golding E.W., *The generation of electricity by wind power*, 1978, Seite 22

2.2 Betriebszustände einer Windturbine

Für Windturbinen mit konstanter sowohl als auch variabler Drehzahl gibt es vier Betriebszustände:

1. Keine Leistungsabgabe, da der Energieinhalt des Windes zu gering ist.
2. Eine geringere Leistung als die Nennleistung wird erzeugt. In diesem Bereich wird ein optimaler aerodynamischer Wirkungsgrad und eine maximale Energieausbeute angestrebt. Die Windgeschwindigkeit im Übergangsbereich zwischen Betriebspunkt 2 und 3 wird als Nennwindgeschwindigkeit bezeichnet.
3. Maximalleistung wird erzeugt. Die Windgeschwindigkeit reicht aus, oder übersteigt die maximal abgebbare Leistung. Der aerodynamische Wirkungsgrad muss verringert werden, um das elektrische System nicht zu überlasten.
4. Keine Leistung wird erzeugt. Die Windgeschwindigkeit ist zu hoch, der Betrieb wird eingestellt, um Schaden zu verhindern.²

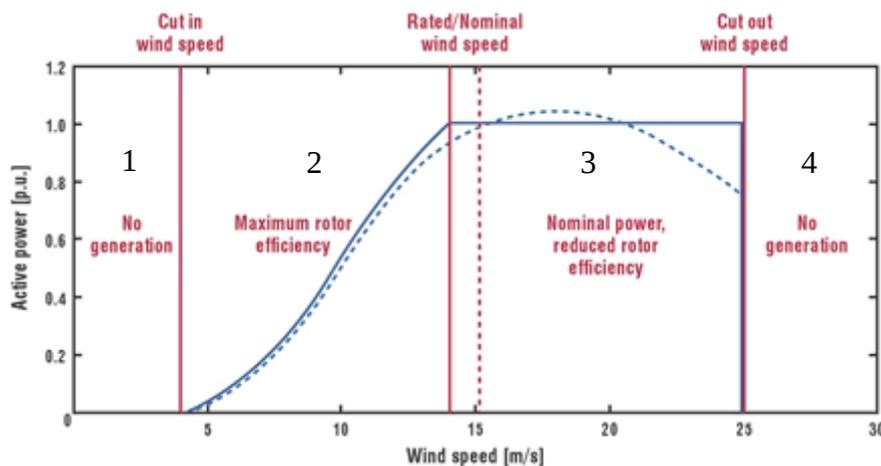


Abbildung 2: Typische Leistungskurven und Betriebspunkte einer Windturbine mit Strömungsabriss "stall limited" (gestrichelte Linie) und einer Windturbine mit verstellbaren Rotorblättern "pitch controlled" (durchgezogene Linie)

2.3 Aerodynamische Leistungsregelung

Ist das Windenergieangebot größer als die Maximalleistung der Windturbine, muss die Wellenleistung der Turbine verringert werden, um eine Überbeanspruchung der Komponenten zu vermeiden. Es gibt drei Methoden um den aerodynamischen

² Vgl. Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., *Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines*

Wirkungsgrad bei hohen Windgeschwindigkeiten zu begrenzen:

- Strömungsabriss oder stall effect: Wird eine Windturbine mit konstanter Drehzahl und ohne Rotorblattverstellung betrieben, vergrößert sich der Anströmwinkel automatisch mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit. Überschreitet dieser Winkel mit dem der Wind das Rotorblatt trifft einen bestimmten Wert, so strömt die Luft nicht länger am Rotorblatt entlang, sondern beginnt sich an der Rückseite des Blattes zu lösen. Es entsteht eine Wirbelbildung, dargestellt in Abbildung 3, die eine dramatische Abnahme des aerodynamischen Wirkungsgrades C_P zur Folge hat.

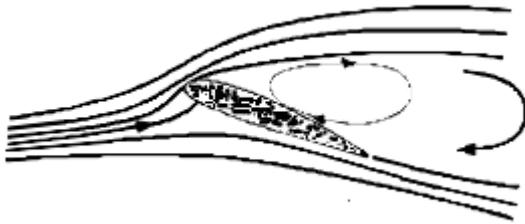


Abbildung 3: Strömungsabriss an einem Rotorblatt

Bei sogenannten stall controlled Windturbinen, sind die Rotorblätter so ausgelegt, dass ab der Nennwindgeschwindigkeit der Strömungsabriss aufzutreten beginnt. Die Leistung bleibt dadurch über der Nennwindgeschwindigkeit mehr oder weniger konstant, ohne dass eine Rotorblattverstellung oder eine aktive Regelung erforderlich ist. Der Leistungsverlauf ist in Abbildung 2 durch die gestrichelte Linie dargestellt.

- Rotorblattverstellung oder pitch control: Wird eine Windturbine mit variabler Drehzahl und konstanter Schnelllaufzahl (tip speed ratio) betrieben, ist der Anströmwinkel unabhängig von der Windgeschwindigkeit und ein Strömungsabriss tritt nicht auf. Bis zur Nennwindgeschwindigkeit wird die Rotorblattverstellung nicht verwendet.

Um die Leistung über der Nennwindgeschwindigkeit zu reduzieren, werden die Rotorblätter hydraulisch oder elektrisch verstellt. Dies hat eine Reduzierung des aerodynamischen Wirkungsgrades C_P zur Folge. Über der Nennwindgeschwindigkeit werden auch die Windturbinen mit variabler Drehzahl üblicherweise mit einer konstanten Drehzahl betrieben und die Leistung wird nur über den Rotorblattwinkel eingestellt. Daraus ergibt sich in Abbildung 2 der flache Bereich der

durchgezogenen Linie über der Nennwindgeschwindigkeit.³

- Kleine Windturbinen werden üblicherweise aus dem Wind gedreht um die Drehzahl zu verringern und die Angriffsfläche für den Wind zu verkleinern. Dieser Vorgang wird als „furling“ bezeichnet.

Als Nachteile der Rotorblattverstellung und des „furling“ sind zunehmende Kosten und ein Gewichtsanstieg zu erwähnen. Die komplexeren mechanischen Konstruktionen verringern auch die Zuverlässigkeit und tragen zu einem vermehrten Wartungsaufwand bei.⁴

2.4 Konstante vs. variable Drehzahl

In Windturbinen mit konstanter Drehzahl verursachen Windböen eine Drehmomentschwankung und in Systemen mit variabler Drehzahl eine Drehzahländerung. Aus diesem Grund sind Windturbinen mit einer konstanten Drehzahl stärkeren mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dies kann zu einer geringeren Zuverlässigkeit und zu einem erhöhten Wartungsaufwand führen.

Die Ausgangsleistung von Windturbinen mit variabler Drehzahl weist weniger Flicker auf als von Windturbinen mit konstanter Drehzahl. Schnelle Leistungsänderungen des Winddargebots können in der rotierenden Masse durch eine Drehzahländerung zwischengespeichert werden.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die bei Systemen mit variabler Drehzahl erforderlichen Wechselrichter Blindleistung erzeugen können. Diese verursachen jedoch auch Oberschwingungen, die unter Umständen gefiltert werden müssen.⁵

Vergleicht man das oft in großen Windkraftanlagen eingesetzte günstige Konzept eines Käfigläufer-Asynchrongenerators, der direkt mit dem Netz gekoppelt ist, also bei einer fixen Drehzahl betrieben wird, mit dem Konzept des gleichen Generators mit variabler Drehzahl und einem Umrichter, erhält man die in Abbildung 4 dargestellten Wirkungsgradverläufe.

3 Vgl. Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., *Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines*

4 Vgl. Fredericks A.F., de Vries I.D., *Design of an auto-braking regulator for a small wind generator*

5 Vgl. Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., *Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines*

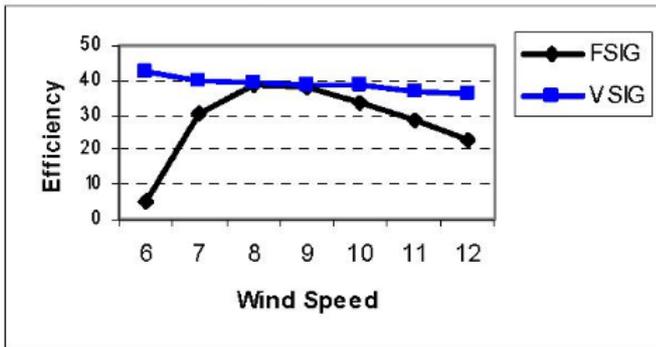


Abbildung 4: Gesamtsystemwirkungsgradvergleich einer Käfigläufer-Asynchronmaschine bei fixer (FSIG) und variabler (VSIG) Drehzahl

Bei dem System mit konstanter Drehzahl ändert sich der Wirkungsgrad erheblich mit der Windgeschwindigkeit. Ein guter Wirkungsgrad wird nur im Bereich der Nennwindgeschwindigkeit erreicht. Der Wirkungsgrad des Systems mit variabler Drehzahl ist über einen weiten Bereich nahezu konstant. Er ist bei niedrigen Windgeschwindigkeiten etwas höher, da drehzahlabhängige Verluste hier kleiner sind und sinkt bei höheren Windgeschwindigkeiten leicht, da über der Nennwindgeschwindigkeit die Drehzahl begrenzt werden muss, um Beschädigungen zu vermeiden.⁶

Aus den oben angeführten Gründen sollte die Windturbine mit variabler Drehzahl betrieben werden.

Bei der in dieser Diplomarbeit betrachteten Windturbine wird auf ein System mit variabler Drehzahl und auf eine mögliche Rotorblattverstellung gesetzt. Die Veränderung des Blattwinkels bedeutet aber:

- erhöhten Wartungsaufwand
- geringere Zuverlässigkeit
- Mehrkosten.

Über der Nennwindgeschwindigkeit wird die Drehzahl durch elektrische Bremsung konstant gehalten und die Leistung durch den stall effect begrenzt.

⁶ Vgl. Murthy S.S., Singh B., Goel P.K., Tiwari S.K., *A Comparative Study of Fixed Speed and Variable Speed Wind Energy Conversion Systems Feeding the Grid*

2.5 Getriebe

Wird auf ein Getriebe verzichtet, benötigt man einen Generator, der mit geringen Drehzahlen arbeiten kann.⁷ Da die Leistung einer rotierenden Maschine durch die Formel⁸

$$P = M \cdot \omega \quad (6)$$

ausgedrückt wird, muss bei gleicher Leistung und geringerer Drehzahl ω das Drehmoment M zunehmen. In allen elektrischen Maschinen wird der Strom verwendet um Drehmomente zu erzeugen. Mehr Drehmoment bedeutet mehr Strom und dadurch größere Verluste und Erwärmung. Aus diesem Grund haben typischerweise alle Generatoren gemeinsam, dass bei gleicher Nennleistung ein Generator mit höherer Drehzahl einen besseren Wirkungsgrad hat, bis die Eisenverluste bei sehr hohen Drehzahlen überhand nehmen.

Um die Erwärmung bei größeren Strömen in Grenzen zu halten, muss der Generator dementsprechend größer dimensioniert werden, um Platz für größere Leiterquerschnitte zu schaffen. Zusätzlich zur thermischen Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass ein Generator ein Energiewandler ist. Die ihm zugeführte mechanische Energie muss über einen Luftspalt magnetisch übertragen und in elektrische Energie umgewandelt werden. Eisen, das im Generatorbau eingesetzt wird, besitzt magnetische Grenzwerte, die eine gewisse Luftspaltfläche erforderlich machen, um ein bestimmtes Drehmoment zu übertragen. Begründet mit den thermischen und magnetischen Eigenschaften ist ein direkt angetriebener Windgenerator normalerweise größer und schwerer als ein Generator mit Getriebe.

Die Kostenersparnis durch den Wegfall des Getriebes kann durch die erhöhten Produktionskosten eines direkt angetriebenen Generators und die erhöhten Kosten für einen stabileren Masten, wenn ein Getriebe und ein konventioneller Generator leichter gewesen wären, vermindert werden.⁹

Zwanzig Prozent der Stehzeit von Windenergieanlagen sind auf verschleissbedingte Getriebeausfälle zurückzuführen. Getriebe stellen in diesem Anwendungsbereich einen

7 Vgl. Torrey D.A., Childs S.E., Haan S., *A Variable-Speed Wind Turbine Based on a Direct-Drive Variable-Reluctance Generator*

8 Stölting H.D., Kallenbach E., *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*, 2002, Seite 32

9 Vgl. Torrey D.A., Childs S.E., Haan S., *A Variable-Speed Wind Turbine Based on a Direct-Drive Variable-Reluctance Generator*

eher negativen Zuverlässigkeitsrekord auf.¹⁰

Je nach Ausführung kann ein Getriebe einen Beitrag zu Vibrationen und Geräuschen des Gesamtsystems leisten. Der bereits erwähnte mögliche Wirkungsgradvorteil von Generatoren mit höheren Drehzahlen wird durch die im Getriebe entstehenden Verluste wieder vermindert.

2.6 Oberwellenmomente

Oberwellen in elektrischen Maschinen führen zu Drehmomentschwankungen und damit zu Vibrationen und Geräuschen und haben verschiedene Ursachen. Grundsätzlich kann man zwischen elektrisch und magnetisch erregten Drehmomentpendelungen unterscheiden.

Der Anteil der elektrisch hervorgerufenen Drehmomentschwankungen ist auf Feld- und Durchflutungswellen gleicher Ordnungszahl zurückzuführen. Durch die Wicklungsauslegung und die Art der Stromspeisung können Durchflutungsoberwellen, durch die Gestaltung des Magnetkreises die Feldoberwellen beeinflusst werden.

Schwankungen des magnetischen Leitwertes im Magnetkreis verursachen die magnetischen Oberwellen. Hier sind Reluktanzkräfte für die Drehmomentwelligkeit verantwortlich, die von konstruktiven Inhomogenitäten wie Nuten oder Verengungen im Rückenbereich hervorgerufen werden.

Weitere periodische Drehmomentschwankungen, die mit Läuferdrehzahl auftreten, werden von Lagern, Führungen und Wellenverbindungen verursacht.

Die gesamte Drehmomentwelligkeit der Maschine ist eine Überlagerung dieser einzelnen Momente.¹¹

2.6.1 Nutrastmomente

Die Nutung einer Maschine führt zum Nutrasten. Das Rastmoment ist das Ergebnis des Zusammenspiels von Polkante und Nutschlitz. Beeinflusst wird das Nutrastmoment von Luftspaltweite, Nutschlitzbreite, Nutschrägung und Luftspaltinduktion. Der Kraftverlauf ist abhängig von der Rotorstellung. Das Rastmoment nimmt mit dem Quadrat der Luftspaltinduktion zu. Werden in einem permanentmagneterregten Generator die Magnete symmetrisch angeordnet, addieren sich die Momentverläufe der einzelnen Magnete. Somit

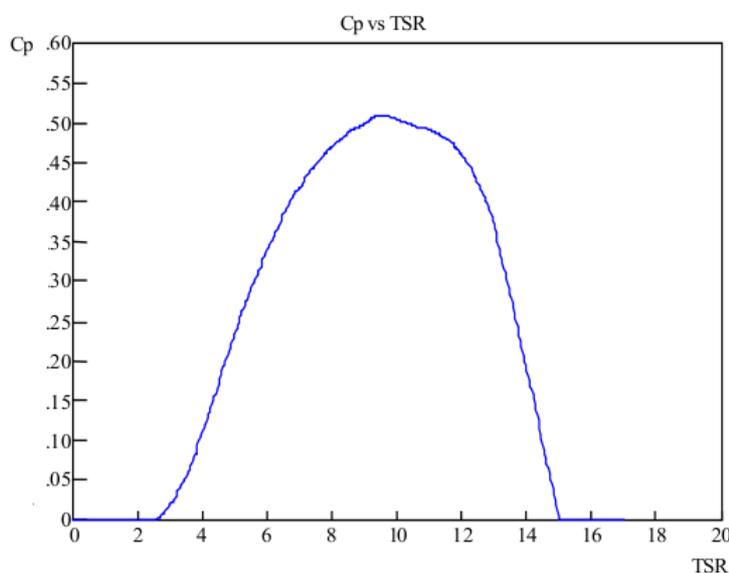
¹⁰ Vgl. Ribrantand J., Bertling L., *Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005*

¹¹ Vgl. Jurisch F., *Nutrastmomente in elektrischen Maschinen: Neue Betrachtungsweise und Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung*

haben Maschinen mit höherer Polzahl, wie sie in Windturbinen eingesetzt werden, auch höhere Rastmomente. In diesem Fall sind geometrische Toleranzen vorteilhaft, weil nicht alle Magnetkanten zur gleichen Zeit den Nutschlitz passieren und sich somit das Rastmoment verringert. Werden die Magnete allerdings asymmetrisch angeordnet, um die Rastmomente klein zu halten, wirken sich geringe Toleranzen stark aus. Wird zum Beispiel bei einem 9 nutigen Stator mit 8 poligem Läufer nur ein Magnet um 1° bzw. 0,2mm falsch platziert, erhöht sich die Amplitude der Nutharmonischen um den Faktor 100.¹²

2.6.1.1 Nutrastmomente beim Start einer Windturbine

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (7)$$



TSR ... tip speed ratio

ω ... Winkelgeschwindigkeit

R ... Radius der Windturbine

v ... Windgeschwindigkeit

C_p ... Wirkungsgrad der Windturbine

Abbildung 5: Wirkungsgrad einer typischen Windturbine bei unterschiedlichen Schnelllaufzahlen

Ziel ist es, die Windturbine bei jeder Windgeschwindigkeit mit einem maximalen aerodynamischen Wirkungsgrad C_p zu betreiben. Während des Anlaufs ist ω sehr klein und daher ist auch die Schnelllaufzahl sehr klein. Daraus ergibt sich, wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, ein geringer aerodynamischer Wirkungsgrad und damit nur eine kleine Leistung an der Welle für den Start der Drehbewegung. Aus diesem Grund muss das Nutrastmoment eines Windgenerators möglichst klein gehalten werden, um einen Anlauf zu ermöglichen.¹³

¹² Vgl. Jurisch F., *Nutrastmomente in elektrischen Maschinen: Neue Betrachtungsweise und Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung*

¹³ Vgl. Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*

2.6.1.2 Nutrastmomente im Betrieb einer Windturbine

Kleine Windturbinen besitzen aufgrund der kurzen Rotorblätter und deren geringer Masse ein geringes Trägheitsmoment. Ihnen fehlt der Effekt der Glättung des Nutrastmoments durch die Massenträgheit vor allem bei geringen Windgeschwindigkeiten. Dies führt zu Geräuschentwicklung und Vibrationen, die zu Materialermüdung führen können. Bei höheren Drehzahlen genügt die gespeicherte kinetische Energie, um diese Effekte zu vermindern.¹⁴

2.6.1.3 Maßnahmen gegen Nutrastmomente

2.6.1.3.1 Variabler Luftspalt

Die geringe Drehzahl von direkt angetriebenen Windgeneratoren macht eine hohe Polzahl erforderlich. Dadurch wird die Breite der einzelnen Magneten in der Maschine klein. So entsteht ein nahezu konstanter Luftspalt. Werden die Magnete allerdings wie ein Brotlaib geformt, kann auch ein ungleichförmiger Luftspalt hergestellt werden. Dies kann zu einer Reduktion des Spitzenwertes des Nutrastmoments um 50% führen.¹⁵

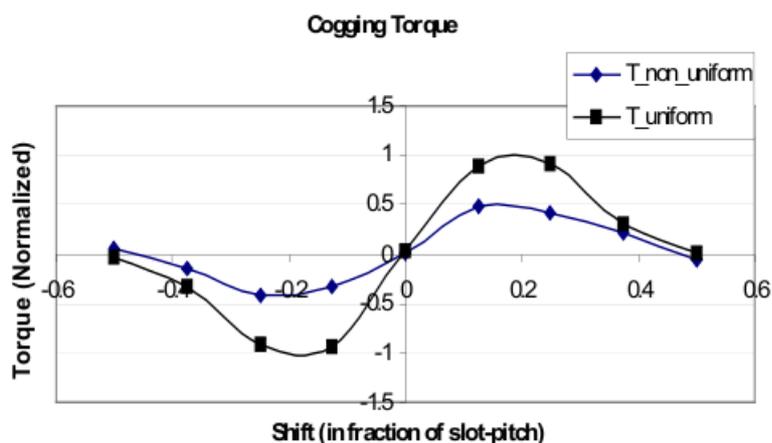


Abbildung 6: Nutrastmoment bei konstantem Luftspalt (schwarz) und variablem Luftspalt (blau)

2.6.1.3.2 Polbreite zu Polabstands-Verhältnis

Die Form der Poloberfläche und die Statorblechung bleiben unverändert. Verändert wird die Polbreite. Verringert man die Polbreite und kommt in die Nähe der optimalen Breite, dargestellt in Abbildung 7 durch die strichlierte Linie, ändert sich die Form des Nutrastmoments und die Frequenz verdoppelt sich. Wird sie weiter verringert, so steigt das Moment wieder an und die Frequenz kehrt zum ursprünglichen Wert zurück. Siehe

¹⁴ Vgl. Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*

¹⁵ Vgl. Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*

violette Linie in Abbildung 7. Mit der optimalen Magnetbreite kann das Nutrastmoment allerdings nicht vollständig eliminiert werden.¹⁶

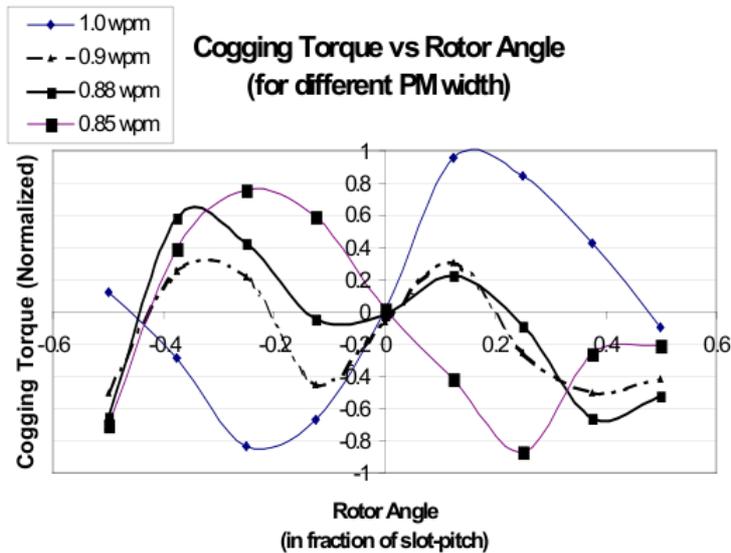


Abbildung 7: Nutrastmoment für verschiedene Polbreiten

2.6.1.3.3 Schrägung

Es können das Statorblechpaket oder die Pole der Permanentmagnete geschrägt werden. Üblicherweise wird eine volle Schrägung einer Nutteilung ausgeführt um das Nutrastmoment zu verringern. Eine Nutteilung beinhaltet eine Nut und einen Zahn des Stators. Grundsätzlich kann durch Schrägung in Permanentmagnetgeneratoren das Nutrastmoment eliminiert werden. Schrägung verkompliziert allerdings den Fertigungsprozess und erhöht somit die Kosten. Schrägung der Magnete erfordert deren zusätzliche Bearbeitung. Schrägung des Stators kann die Einbringung der Wicklung erschweren, verkleinert die effektive Nutfläche und erhöht die Wicklungslänge und damit deren Widerstand. In Abbildung 8 wird der in Abschnitt 2.6.1.3.1 beschriebene variable Luftspalt verwendet und unterschiedliche Grade der Schrägung dargestellt. Als Vergleich wird auch die optimale Magnetbreite dargestellt. Je näher der Schrägungswinkel an eine volle Nutteilung herankommt, desto geringer ist das Nutrastmoment. Schrägen ist das beste Mittel um das Nutrastmoment zu unterdrücken.¹⁷

¹⁶ Vgl. Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*

¹⁷ Vgl. Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*

Cogging Torque vs Rotor Angle
(original PM width - with different skewing)

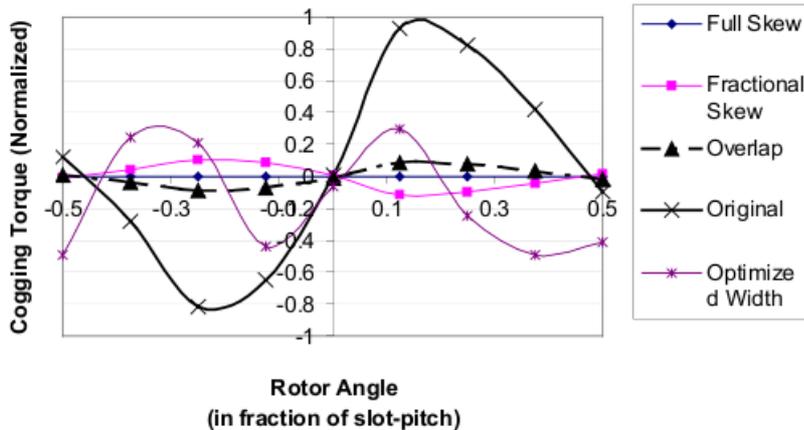


Abbildung 8: Nutrastmoment mit unterschiedlichen Graden der Schrägung

2.7 Bemessung der Nennleistung des Generators in Abhängigkeit vom Aufstellungsort

Mit Hilfe der Drehzahl-Drehmomentkennlinie für zwei verschiedene Ummantelungen der Windturbine und einer Weibull-Windstatistik für die Standorte Graz, Wien und Nordsee wird der Jahresenergieertrag der Windturbine berechnet. Dies wird für verschiedene Generatornennleistungen durchgeführt. Ist die vom Wind zur Verfügung gestellte Leistung größer als die Nennleistung des Generators, wird die Drehzahl der Turbine begrenzt und so die Leistung konstant gehalten. Daraus ergibt sich dann der unterschiedliche Jahresenergieertrag für verschiedene Generatorleistungen am selben Standort. Auch die Form der Ummantelung (UM1 und UM2) führt zu anderen Jahresenergieerträgen.

Für die Windstatistik werden Windgeschwindigkeiten von 1 - 30m/s in 1m/s Schritten berücksichtigt. Die minimale Generatornennleistung beträgt 100W und wird bis zu 3500W erhöht. Als Rotorfläche wird 1m² angenommen.

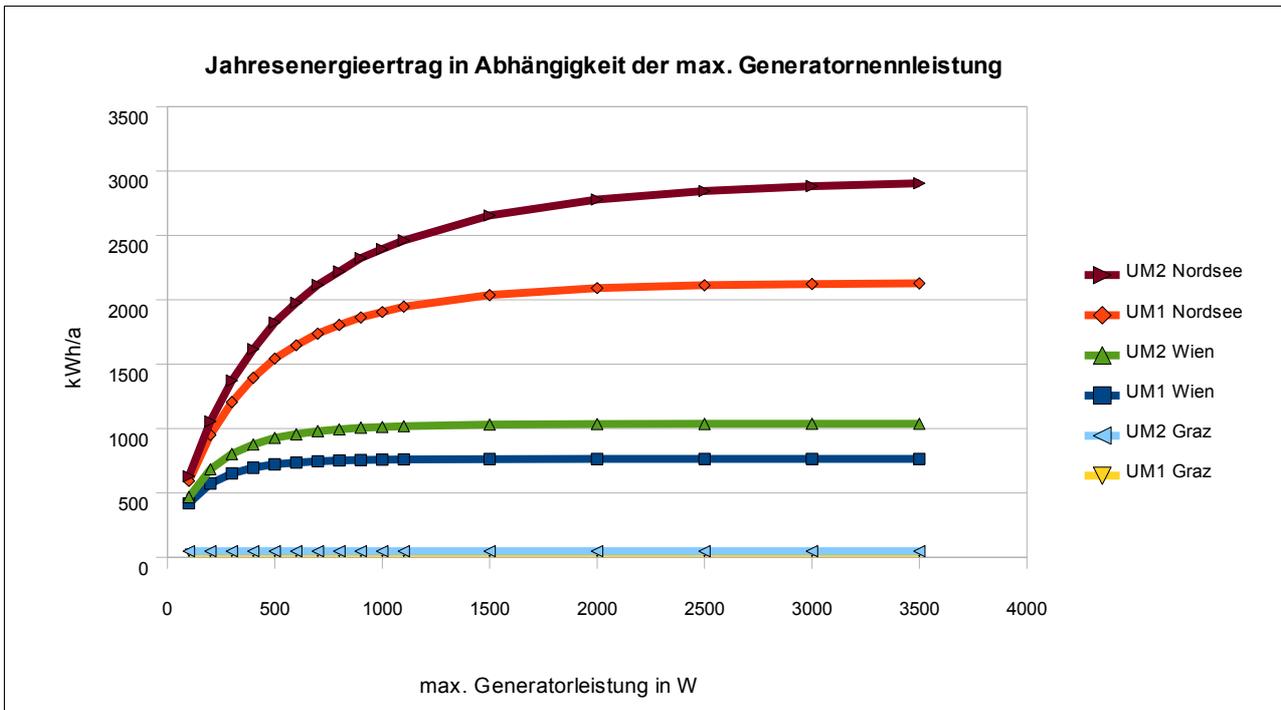


Abbildung 9: Jahresenergieertrag in Abhängigkeit der Generatormennleistung

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Berechnungen graphisch dargestellt. Für den Standort Graz würde unabhängig von der Ummantelung eine Generatormennleistung von 100W ausreichen, um fast das gesamte Dargebot an Windenergie in elektrische Energie umzuwandeln. Die Zeitspannen, in denen der Wind die Turbine mit mehr als 100W antreibt sind hier so kurz, dass sich deren Energieinhalt im Jahresverlauf kaum bemerkbar macht. Für den Raum Wien wäre ein Generator mit 500W Nennleistung ausreichend. Wird die Windturbine im Bereich der Nordsee aufgestellt, sollte die Generatorleistung nicht größer als ca. 1000W gewählt werden. Soll die Windturbine eine größere Leistung an den Generator abgeben, so steigt ihre Drehzahl in einen Bereich, in dem es zu exzessiven akustischen Problemen kommen kann. Aus diesem Grund sollte die Blattspitzengeschwindigkeit für „on shore“ Anlagen auf maximal 70m/s begrenzt werden.¹⁸

$$n_{max} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{v_{max}}{r} \quad (8)$$

Wenn die Windturbine nun eine Fläche von 1m² hat, wie für die Berechnung angenommen wurde, ergibt sich daraus eine maximale Drehzahl von $n_{max}=1184\text{U/min}$. Diese Drehzahlgrenze wird von der hier untersuchten Turbine bis zu einer Leistung von 1000W

¹⁸ Vgl. Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., *Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines*

von beiden Ummantelungsvarianten nicht überschritten. In dieser Betrachtung wurde die möglicherweise schalldämmende Wirkung der Ummantelung nicht berücksichtigt wodurch auch höhere Drehzahlen zulässig sein könnten.

2.8 Anlaufwindgeschwindigkeit

Basierend auf der in Kapitel 2.7 verwendeten Windstatistik wird der Jahresenergieertrag für unterschiedliche Anlaufwindgeschwindigkeiten berechnet. Diese Berechnung wurde wiederum für die Standorte Graz, Wien und Nordsee durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dieser Berechnung gelistet. Für die Standorte Wien und Nordsee liegt der Verlust an Energieertrag unter 1%, wenn die Windturbine erst bei 3m/s mit der Energiegewinnung beginnt. Für Graz ist dieser Verlust deutlich größer. Hier gibt es hauptsächlich geringe Windgeschwindigkeiten und daher wirkt sich eine höhere Anlaufwindgeschwindigkeit stark aus. Dafür ist auch der Jahresenergieertrag, verglichen mit den beiden anderen Standorten sehr gering und eine geringere Anlaufwindgeschwindigkeit verbessert den Ertrag in absoluten Zahlen nicht wesentlich.

Anlaufwindgeschwindigkeit m/s	Jahresenergieertrag			Energiedifferenz bezogen auf 1m/s Anlaufwindgeschwindigkeit		
	Graz	Wien	Nordsee	Graz	Wien	Nordsee
	W	W	W	ΔW	ΔW	ΔW
	kWh/a	kWh/a	kWh/a	%	%	%
5	5,3	841,47	1766,22	92,65	10,08	3,36
4	21,11	901,92	1807,69	70,7	3,62	1,09
3	48,54	928,09	1823,46	32,62	0,83	0,23
1	72,04	935,84	1827,7			

Tabelle 1: Jahresenergieertrag bei unterschiedlichen Anlaufwindgeschwindigkeiten

2.9 Polzahl des Generators

Die meisten kleinen Windturbinen haben einen Drehzahlbereich von 400-800U/min. Um eine Spannung mit einer ausreichend hohen Frequenz zu erzeugen, sollten Polzahlen im Bereich von 10-18 verwendet werden.¹⁹

¹⁹ Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

3 Vergleich ausgewählter Generatortypen

3.1 Asynchrongenerator

3.1.1 Allgemeines

In den meisten großen Windkraftwerken werden Asynchronmaschinen als Generatoren verwendet. Ein Vorteil des asynchronen Funktionsprinzips ist eine gewisse Flexibilität beim Ausgleich von fluktuierenden Winden bei einer direkten Netzkopplung. Ein großer Nachteil ist allerdings, dass ständig ein externer Magnetisierungsstrom für den Aufbau des Drehfeldes zur Verfügung gestellt werden muss.²⁰

3.1.2 Funktionsprinzip

Die Asynchronmaschine besteht aus einer Stator- und einer Rotorwicklung. Der in der Statorwicklung fließende Strom, kann in eine feldbildende und eine momentbildende Stromkomponente zerlegt werden. Die feldbildende Stromkomponente ist ein Blindstrom der das Drehfeld aufbaut. Die momentbildende Komponente fließt nur, wenn die Rotordrehzahl von der Synchrondrehzahl des Drehfeldes abweicht. Diese Drehzahldifferenz wird als Schlupf bezeichnet. In Abbildung 10 ist das Drehmoment der Asynchronmaschine in Abhängigkeit vom Schlupf dargestellt. Liegt die Rotordrehzahl über dem Synchronpunkt, ist das Drehmoment negativ. Die Maschine gibt Wirkleistung an das Stromnetz ab und arbeitet als Generator. Ist die Rotordrehzahl genau im Synchronpunkt, wird Wirkleistung nur zur Deckung der Leerlaufverluste mit dem Stromnetz ausgetauscht. Bei Drehzahlen unterhalb des Synchronpunktes arbeitet die Asynchronmaschine als Motor.²¹

20 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

21 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

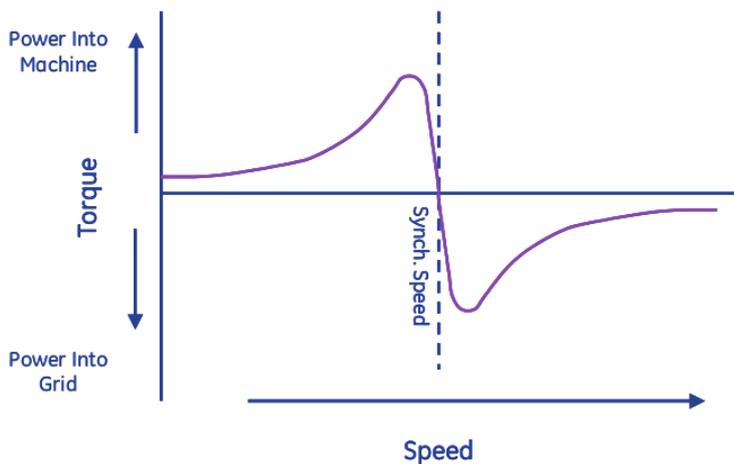


Abbildung 10: Drehzahl-, Drehmomentkennlinie einer typischen Asynchronmaschine

3.1.3 Schleifringläufer

Die Rotorwicklung besteht aus einer dreiphasigen, isolierten Wicklung, die der Statorwicklung sehr ähnlich ist. Traditionell wird diese Wicklung über Schleifringe angespeist. Es gibt aber auch Konzepte mit elektronischen Umrichtern ohne Schleifringe.

Der Vorteil besteht darin, dass das Betriebsverhalten über die geringere Rotorleistung beeinflusst wird und daher die Leistungselektronik kleiner dimensioniert werden kann. Dem Rotor entnommene Schlupfleistung kann ins Netz eingespeist werden und so der Wirkungsgrad erhöht werden. Diese Methode der Drehzahlveränderung verwendet Vestas in seinem „OptiSlip“ System. Damit ist ein unter- und übersynchroner Generatorbetrieb möglich.

Nachteile sind höhere Kosten, geringere Zuverlässigkeit, mehr Wartungsaufwand und kürzere Lebensdauer als ein Käfigläufer.²²

3.1.4 Käfigläufer

Aufgrund seiner mechanisch einfachen Konstruktion und Robustheit ist dieser Maschinentyp sehr weit verbreitet. Die Statorwicklung ist isoliert und muss mit Magnetisierungsblindleistung versorgt werden. Der Rotor besteht aus einer unisolierten Wicklung. Der Wartungsaufwand beschränkt sich auf die Lager. Soll das Betriebsverhalten beeinflusst werden, muss die gesamte Generatorleistung einen Umrichter passieren.²³

²² Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

²³ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

Vorteile Käfigläufer gegenüber Schleifringläufer:

- Rotorstäbe sind thermisch und elektrisch robuster, erlauben mehr Leistung bei gleichen Abmessungen und haben eine geringere Fehleranfälligkeit
- billig, robust, leicht erhältlich
- keine Bürstenverluste
- leichter, geringeres Trägheitsmoment
- größerer Drehzahlstellbereich 2-3, verglichen mit 1,5-2 beim Schleifringläufer, da höhere Fliehkräfte zulässig sind.²⁴

3.1.5 Axialfluss-Asynchronmaschine

Aufgrund der hohen Anzahl an Nuten in Rotor und Stator, sowie des erforderlichen kleinen Luftspaltes, ist diese Variante der Asynchronmaschine als eher unvorteilhaft anzusehen und wird hier nicht näher betrachtet.²⁵

3.1.6 Wirkungsgrad

In Abbildung 11 ist der typische Wirkungsgradverlauf eines kleinen zweipoligen Asynchronmotors dargestellt. Der Motor wurde so betrieben, dass er für jeden untersuchten Arbeitspunkt einen optimalen Wirkungsgrad erreicht. Für mittlere bis hohe Drehzahlen bildet sich ein einigermaßen flaches Plateau über einen weiten Drehmomentbereich aus. Sinkt die Drehzahl unter eine kritische Schwelle, fällt der Wirkungsgrad stark ab.²⁶

Der Widerstand des Läufers kann für Windkraftanlagen minimiert werden, um die Effizienz zu steigern, wenn kein motorischer Anlauf benötigt wird.²⁷ Viele günstige und kleine Standard Asynchronmaschinen haben aber Designs, welche in den Fünfzigerjahren entworfen und bis heute nicht wesentlich verändert wurden.²⁸

24 Vgl. Murthy S.S., Singh B., Goel P.K., Tiwari S.K., *A Comparative Study of Fixed Speed and Variable Speed Wind Energy Conversion Systems Feeding the Grid*

25 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

26 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

27 Vgl. Henderson D.S., *SYNCHRONOUS OR INDUCTION GENERATORS ? THE CHOICE FOR SMALL SCALE GENERATION*

28 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

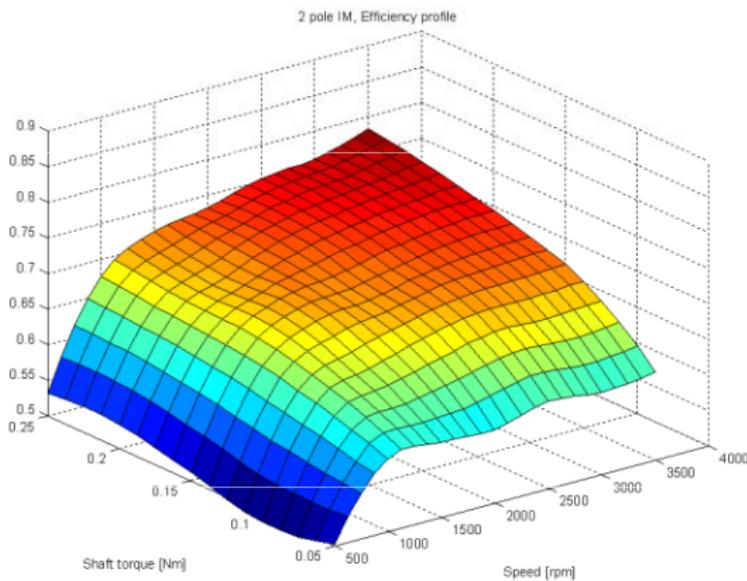


Abbildung 11: Wirkungsgrad eines Asynchronmotors als Funktion von Drehmoment und Drehzahl

3.1.7 Direktantrieb

Aufgrund des Luftspaltes nehmen die Streuflüsse mit der Anzahl der Pole und Reduzierung der Nenndrehzahl zu. Der Strom in der Maschine erzeugt dann zunehmend Streuflüsse statt Drehmoment. Um diesen Effekt zu verringern, müssen ausreichend Nuten für jeden Pol einer Phase vorhanden sein. Aus diesem Grund werden höherpolige Asynchronmaschinen bei gleicher Nennleistung größer dimensioniert.²⁹

3.1.8 Bremsverhalten

Um eine Asynchronmaschine zu bremsen, muss entweder die Frequenz der Versorgungsspannung gesenkt, der Stator mit Gleichstrom versorgt, oder bei Netzausfall die Maschine mit Kondensatoren selbst erregt werden.

Die Asynchronmaschine ist als Industrieantrieb sehr weit verbreitet und es gibt dementsprechend auch viele Umrichter, mit deren Hilfe ein Bremsvorgang durchgeführt werden kann. Ein Problem entsteht jedoch, wenn die Versorgungsspannung für den Umrichter, oder der Umrichter selbst ausfällt. Ein einfacher Kurzschluss oder ein niederohmiger Widerstand an den Generatorklemmen stellt keinen sicheren Betriebszustand der Windturbine dar.

Auch die Versorgung des Stators mit Gleichstrom erfordert gleich wie der Umrichter eine

²⁹ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

Energiequelle. Daher ist auch diese Bremsmethode bei Netzausfällen oder bei Inselsystemen für den Dauerbetrieb nicht geeignet.

Für die Selbsterregung können entweder ein, oder für eine effektivere Bremsung über einen weiteren Drehzahlbereich drei Kondensatoren mit gleichen Eigenschaften verwendet werden. Die Kondensatoren sorgen dabei für die Erregerstromkomponente und in Lastwiderständen wird die Bremsenergie in Wärme umgewandelt. Liegen die Kapazitätswerte und die Drehzahl in einem bestimmten Bereich, werden die Bedingungen für die Selbsterregung erfüllt und die Maschine kann mit Blindstrom versorgt und gebremst werden. Sinkt jedoch die Drehzahl unter einen kritischen Wert, ist die Selbsterregung, abhängig von der Größe der Kondensatoren, nicht mehr möglich. Wird die Kapazität vergrößert, kann die untere Drehzahlgrenze verringert werden. Dadurch sinkt allerdings auch die obere Drehzahlgrenze, ab der eine Selbsterregung möglich ist. Wird die Windturbine starkem Wind ausgesetzt, kann sie dann schon bei Nenndrehzahl nicht mehr selbst erregt werden. Es gibt also für jeden Kapazitätswert eine obere und untere Drehzahlgrenze. Daher muss eine andere, nicht elektrische Bremsmethode vorgesehen werden, falls die Windturbine völlig still gelegt, oder sicher vor Überdrehzahlen geschützt werden soll.³⁰

Ohne Magnetisierungsstrom kann die Asynchronmaschine kein Moment erzeugen. Die Zuverlässigkeit der elektrischen Bremsung ist damit nicht mehr gegeben und macht eine weitere zusätzliche Bremsmethode erforderlich. Da alle anderen Bremsmethoden auf mechanisch beweglichen Teilen basieren, erhöht dies den Wartungsaufwand und verringert die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

3.1.9 Etablierung

Die Asynchronmaschine ist eine gut etablierte Technologie. In größeren Windkraftanlagen findet sie in Kombination mit einem Getriebe und geringer Polpaarzahl schon lange Verwendung.³¹ Im Bereich der Mikrowindturbinen setzen aber nur sehr wenige Hersteller auf das asynchrone Funktionsprinzip als Generator. Einer davon ist zum Beispiel die Firma S&W (http://www.s-und-w-energie.de/SW_2000_Netz.pdf 12.05.2010).

30 Vgl. Al-Bahrani A.H., Malik N.H., *Selection of the excitation capacitor for dynamic braking of induction machines*

31 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

3.2 Bürstenlose Generatoren mit Permanentmagneten

3.2.1 Allgemeines

Die Statorwicklung ist isoliert und mit der Last verbunden. Das System aus Permanentmagneten ist auf dem Rotor befestigt und relativ unempfindlich gegen Verschmutzungen. Allerdings ziehen die Magnete auch ferromagnetischen Schmutz an. Der Hauptvorteil gegenüber der Asynchronmaschine ist, dass das Erregermagnetfeld nicht von einem Magnetisierungsstrom in der Ständerwicklung erzeugt wird, sondern von den Permanentmagneten am Rotor. Daher ist diese Maschine selbsterregend und das Funktionsprinzip ist ein synchrones. Diese Selbsterregung erlaubt einen Betrieb bei hohem Leistungsfaktor und Wirkungsgrad. Die Frequenz der erzeugten Spannung hat ein starres Verhältnis zur Wellendrehzahl. Es gibt keine lastabhängige Schlupffrequenz zwischen Stator und Rotor wie bei der Asynchronmaschine.

Beim Zusammenbau der Maschinen müssen Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, um die Permanentmagnete nicht zu beschädigen und Verletzungen des Personals vorzubeugen. Der Wartungsaufwand ist üblicherweise auf die Lager beschränkt.

Im Betrieb müssen die Permanentmagnete vor zu hohen Temperaturen, die ihre Empfindlichkeit gegen Entmagnetisierung erhöhen und vor zu hoher Gegenerrregung im Kurzschlussfall geschützt werden.³²

Voraussichtlich wird sich die Qualität der Permanentmagnete weiter verbessern. Die Preisentwicklung ist schwer abzuschätzen, aber derzeit ist eher mit steigenden Preisen zu rechnen. China ist der weltweit größte Produzent von Seltene-Erden-Metallen und fördert ca. 90% der weltweiten Produktion. Durch die steigende Nachfrage und der praktischen Monopolstellung Chinas kann es zu Engpässen kommen.³³

Vor- und Nachteile gegenüber elektrischer Erregung sind hier kurz zusammengefasst:

Vorteile:

- größere Effizienz und höherer Energieernte-faktor
- keine zusätzliche Versorgung für die Erregung
- kein plötzlicher Verlust der Erregung

32 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

33 Vgl. http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/rohstoffe-selten-wird-teuer_aid_261514.html 22.07.2010

- Verbesserung der thermischen Eigenschaften (keine Erwärmung durch eine Erregerwicklung)
- höhere Zuverlässigkeit, da keine Schleifringe benötigt werden
- einfachere Wartung
- geringeres Gewicht.

Nachteile:

- teure Permanentmagnete
- Preisentwicklung und Verfügbarkeit durch praktische Monopolstellung Chinas schwer kalkulierbar
- aufwendige Herstellung (Anziehungskräfte beim Zusammenbauen)
- Entmagnetisierung bei hohen Temperaturen.³⁴

Die Vorteile gegenüber einer Kommutatormaschine sind:

- längere Lebensdauer, da kein Verschleiß des Kontaktsystems
- keine Verschmutzung durch Bürstenabrieb
- keine Geräusche durch ein Kontaktsystem.³⁵

3.2.2 Steuerung der Ausgangsspannung

Ändert sich die Drehzahl oder der Belastungszustand einer Synchronmaschine im Inselbetrieb, so hat dies Auswirkungen auf die Höhe der Klemmenspannung. Bei einer elektrisch erregten Synchronmaschine ist es möglich, über den Erregerstrom die Klemmenspannung zu variieren. Im Fall einer permanentmagneterregten Maschine besteht diese Eingriffsmöglichkeit nicht.³⁶

Die Blindleistung und damit die Spannungshöhe, sowie in einem gewissen Maß der Wirkungsgrad können extern über die Klemmen beeinflusst werden.

Da jeder permanentmagneterregte Generator eine Statorwicklung hat und diese eine Induktivität darstellt, hat jeder Strom bezogen auf die Klemmenspannung eine Wirk- und

³⁴ Vgl. Li H., Chen Z., *Overview of different wind generator systems and their comparisons*

³⁵ Vgl. Cravero L.G., *Entwurf, Auslegung und Betriebsverhalten von dauermagneterregten bürstenlosen Motoren kleiner Leistung*

³⁶ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

Blindkomponente. Die Blindkomponente trägt nicht zur Bildung eines Drehmoments bei, verursacht aber Stromwärmeverluste in den Wicklungen des Generators. Wird ein aktiver Gleichrichter verwendet, so kann dieser kapazitiven Blindstrom bereitstellen. Ist dieser kapazitive Blindstrom gleich groß wie der induktive Blindstrom des Generators, bedeutet dies, dass die Stromwärmeverluste verringert werden und der Wirkungsgrad der Maschine verbessert wird.

Die Bereitstellung des kapazitiven Blindstroms mit Kondensatoren für minimale Verluste funktioniert nur für eine Leistung. Ändert sich die Drehzahl des Generators, ändert sich auch der induktive Blindwiderstand und damit der Blindstrom. Zusätzlich müssen mögliche Resonanzeffekte bei bestimmten Drehzahlen berücksichtigt werden.

Bei kleinen Generatoren wird oft auf einen aktiven Gleichrichter verzichtet und ein Diodengleichrichter verwendet. Dieser ist einfach und kostengünstig, kann aber keinen Blindstrom erzeugen, wodurch der Wirkungsgrad und die Klemmenspannung des Generators sinken.

Dem Generator nachgeschaltete DC-DC Wandler, Akkus und Wechselrichter benötigen eine Ausgangsspannung, die sich in einem eingeschränkten Bereich bewegt. Dies fordert eine fast konstante Drehzahl und eine kleine Synchronreaktanz. Aus diesem Grund ist es nicht einfach, einen Standard-PM-Motor als Generator zu verwenden.³⁷

3.2.3 Entmagnetisierung der Permanentmagnete

Die Eigenschaften der Permanentmagnete hängen sehr stark mit der Temperatur zusammen. Der kritischste Zustand für die Magnete ist ein zwei oder dreiphasiger Kurzschluss direkt an den Generatorklemmen bei hohen Temperaturen. Um dieses Risiko zu verkleinern können Polschuhe, verbesserte Magnetmaterialien oder ausreichend dicke Permanentmagnete verwendet werden. Die Wirbelstromverluste und damit die Erwärmung der Magnete kann durch eine Aufteilung in kleinere Magnetstücke verringert werden.³⁸

3.2.4 Oberflächen- und vergrabene Magnete

Ein Vorteil von oberflächenbefestigten Magneten ist das relativ einfache und kostengünstige Aufkleben auf den Rotor. Um eine ausreichend hohe Luftspaltflussdichte zu erzielen, kommen aber dafür meist teure Permanentmagnetmaterialien zum Einsatz.

³⁷ Vgl. Dorrell D.G., *Design Requirements for Brushless Permanent Magnet Generators for Use in Small Renewable Energy Systems*

³⁸ Vgl. Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*

In einer Bauweise mit Flusskonzentration können günstigere Magnetmaterialien verwendet werden. Diese machen aber einen komplizierteren Aufbau des Rotors erforderlich, der einen Teil der Kostenersparnis wieder verzehrt. Durch sinkende Preise der Magnetmaterialien, die für eine Oberflächenbefestigung geeignet sind, verlieren vergrabene Magnete im Bereich der Generatoren für Windkraftwerke immer mehr an Bedeutung. Dies wird in Abschnitt 4.2.1.5 durch einen Vergleich von Radialflussmaschinen verdeutlicht.

Bei Maschinen mit oberflächenbefestigten Magneten ist die Gefahr der Entmagnetisierung der Permanentmagnete kein Problem.³⁹

3.2.5 Radialflussmaschine

Die Permanentmagnete erzeugen einen magnetischen Fluss in radialer Richtung. Diese Maschinen bieten eine gute Performance über einen großen Drehzahlbereich. Die Herstellung hoher Polzahlen durch Aufkleben der Magnete auf den Rotor ist einfach. Länge und Luftspaltdurchmesser können unabhängig voneinander gewählt und höhere Drehmomentdichten als bei elektrisch erregten Maschinen erreicht werden.⁴⁰

3.2.5.1 Konventionelle Innenläufer-Radialflussmaschine

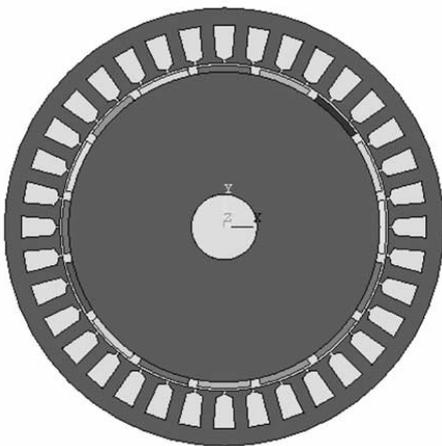


Abbildung 12: Innenläufer-Radialflussmaschine

In Abbildung 12 ist der Aufbau einer typischen Radialflussmaschine mit Innenläufer dargestellt. Der Stator besteht aus Dynamoblech und trägt die verteilte Ankerwicklung. Auf dem zylindrischen Rotor sind die Permanentmagnete an der Oberfläche befestigt, von

³⁹ Vgl. Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*

⁴⁰ Vgl. Li H., Chen Z., *Overview of different wind generator systems and their comparisons*

denen je zwei ein Polpaar bilden.⁴¹ Die Verwendung von Polschuhen hat sich als Nachteil herausgestellt, da diese Maschinen bei gleicher Ausgangsleistung schwerer sind.⁴²

Im Falle eines plötzlichen Kurzschlusses werden die Permanentmagnete von der Ankerrückwirkung nicht entmagnetisiert, wenn verbesserte Magnetwerkstoffe und eine ausreichende Magnetdicke verwendet wird.⁴³ Die Luftspaltflussdichte liegt nahe der Remanenzflussdichte und dem Arbeitspunkt der Magnete. Bei diesem Maschinentyp ist es unmöglich, hohe Luftspaltflussdichten mit Magneten geringer Remanenzflussdichte zu erzielen.⁴⁴ Problematisch ist auch die Platzierung der Permanentmagnete, die bei nur geringen Temperaturen betrieben werden sollten, in einer schlecht gekühlten Zone in der Maschine.⁴⁵

3.2.5.2 Außenläufer-Radialflussmaschine

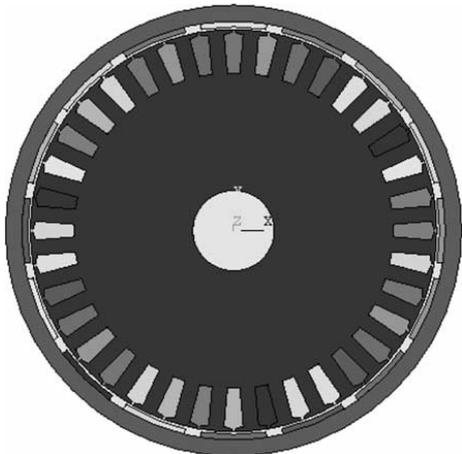


Abbildung 13: Außenläufer-Radialflussmaschine

Der feststehende Teil der Maschinen mit den Wicklungen liegt im Inneren. Die Magnete sind gleichmäßig auf der Innenfläche einer außen rotierenden Trommel angeordnet.

Es ergibt sich eine leichtere Realisierung einer mehrpoligen Maschine aufgrund des größeren Platzangebotes zur Befestigung der Magnete und Verkürzung des magnetischen Weges bei gleichem Außendurchmesser.⁴⁶ Dadurch kann Material eingespart werden und

41 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

42 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

43 Vgl. Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*

44 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

45 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

46 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

sich somit eine Kostenreduktion im Vergleich zu einer Innenläufermaschine ergeben.⁴⁷

Ein weiterer Vorteil wären direkt an der Trommel befestigte Rotorflügel der Windturbine. Nachdem die Trommel mit den daran befestigten Magneten vom Wind umströmt wird, ergibt sich eine bessere Magnetkühlung und dadurch geringere Gefahr der Entmagnetisierung durch Hitze.⁴⁸

3.2.5.3 E-Kern Radialflussmaschine

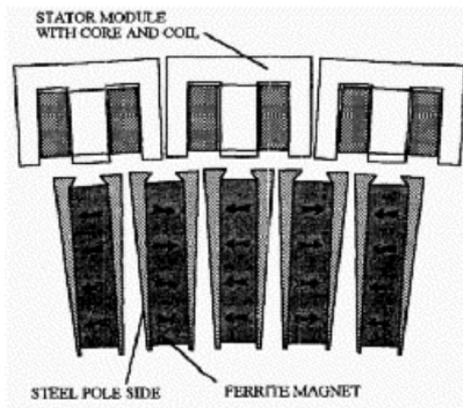


Abbildung 14: Radialflussmaschine mit E-Kernen

Dieses Konzept verwendet E-Kerne, die üblicherweise in Transformatoren verbaut werden. Aus den einzelnen E-Kernen wird dann der Stator modular aufgebaut. Im Rotor befinden sich Ferritmagnete mit Flusskonzentration. Ein Vorteil ist, dass durch die modulare Bauweise beliebige Polzahlen realisiert werden können. Im Test hat dieser Maschinentyp jedoch bezüglich der Ausgangsleistung und des Wirkungsgrades nur schlecht abgeschnitten. Ein Design mit oberflächenbefestigten NdFeB Magneten war der genutzten Radialflussmaschine sowohl in Ausgangsleistung, als auch beim Verhältnis von Ausgangsleistung zu Kosten unterlegen.⁴⁹

3.2.5.4 Ausführung der Ankerwicklung bei Radialflussmaschinen

Eine konventionelle verteilte Wicklung ist vorteilhafter als eine Einzelzahnwicklung. Das Anzugsmoment bezogen auf die Kosten für aktives Material ist höher. Eine verteilte Wicklung ermöglicht eine effizientere Ausnutzung des vorhandenen Maschinenvolumens

47 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

48 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

49 Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

und des Materials und senkt damit auch die Materialkosten.

Der Anteil an harmonischen Schwingungen ist bei einer verteilten Wicklung geringer und verursacht weniger Wirbelstromverluste im Rotor der Maschine. Dem stehen folgende Vorteile der Einzelzahnwicklung gegenüber:

- einfachere Konstruktion
- kleinere Maschinendurchmesser bei gleicher Ausgangsleistung möglich
- zuverlässigere Isolation
- Wickelköpfe sind so klein wie möglich
- einfachere Vermeidung der Demagnetisierung der Permanentmagnete aufgrund der Sättigung der Zähne.⁵⁰

3.2.6 Axialflussmaschinen

Bei diesem Maschinentyp ist der magnetische Fluss der Permanentmagnete in Richtung der Maschinenachse ausgerichtet. Es gibt zwei gebräuchliche Typen für den Stator: genutet und ungenutet.

Die Vorteile gegenüber Radialflussmaschinen sind:

- einfache Wicklungen (nutlose Ausführung)
- kleines Nutrastmoment und wenig Geräusche (nutlose Ausführung)
- kurze axiale Länge
- hohes Drehmoment/Volumen Verhältnis.

Nachteile gegenüber Radialflussmaschinen:

- großer Außendurchmesser
- viel Permanentmagnetmaterial erforderlich (nutlose Maschinen)
- strukturelle Instabilität (nutlose Maschinen)
- Schwierigkeiten mit dem Luftspalt bei großen Durchmessern (genutete Maschinen)
- Probleme bei der Herstellung des Stators (genutete Maschinen).

⁵⁰ Vgl. Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*

Ein weiterer Nachteil ist, dass mit zunehmender Leistung der Luftspalt und die Luftspaltreluktanz größer werden. Aus diesem Grund sind Axialflussmaschinen eher für Generatoren kleiner Leistung geeignet.⁵¹

3.2.6.1 Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator

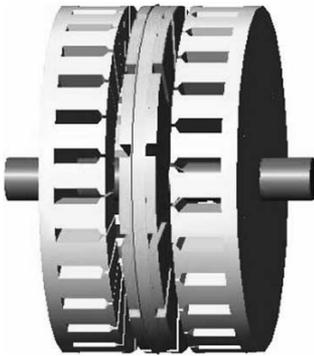


Abbildung 15: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator

Im englischen Sprachraum wird diese Bauform auch als „Pancake Machine“ bezeichnet. Sie besteht aus zwei Statorn und einem im Zentrum liegenden Rotor.

Die Permanentmagnete sind axial magnetisiert und befinden sich an der Oberfläche des Rotors bzw. sind in Vertiefungen eingelassen.

Der Eisenkern des Stators ist radial geblecht. Das heißt, er besteht aus konzentrischen Ringen. Der Nutwinkel ist gleichmäßig und die Zähne sind geschragt.⁵²

3.2.6.2 Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor

Diese Ausführung der Axialflussmaschine ist ähnlich der Doppelstator-Variante, jedoch befindet sich der Stator in der Mitte und hat auf beiden Seiten Nuten. Auf der Rückseite der Rotoren wird ein Eisenjoch für den magnetischen Fluss benötigt. Dieses kann auf dem Stator dafür entfallen.⁵³

51 Vgl. Li H., Chen Z., *Overview of different wind generator systems and their comparisons*

52 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

53 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

3.2.6.3 Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Statorbalancierung

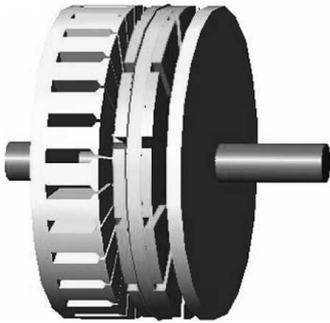


Abbildung 16: Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Statorbalancierung

Diese Maschine besitzt nur einen Stator und einen Rotor. Aufgrund der starken Anziehungskräfte zwischen Stator und Rotor müssen spezielle Lager die Kräfte in axialer Richtung aufnehmen und machen den mechanischen Aufbau dadurch komplizierter. Abhilfe schafft ein zweiter Stator. Dieser muss in radialer Richtung geblecht sein, um die Wirbelstromverluste gering zu halten. Der Rotor benötigt auch auf seiner Rückseite Magnete, diese stellen dann mit der zusätzlichen Statorscheibe ein Kräftegleichgewicht her. Dadurch sinkt allerdings die Ausnutzung des Permanentmagnetmaterials.⁵⁴

3.2.6.4 Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung

Das Konzept ist ähnlich der einseitigen genuteten Axialflussmaschine mit Statorbalancierung. Anstelle der zweiten Statorscheibe wird ein zusätzlicher, mit Permanentmagneten bestückter, Rotor verwendet. Diese Maschine benötigt mehr Material als die Statorbalancierung. Auf der Rückseite des Stators muss das Eisenjoch verlängert werden, um einen Weg für den Balancierungsfluss zu schaffen. Ebenso ist auf der Rückseite des zusätzlichen Rotors ein Eisenweg vorzusehen.⁵⁵

3.2.6.5 Axialflussmaschine mit Luftspalt- oder Toruswicklung

Die Permanentmagnete sind auf der Oberfläche der Rotorscheiben aus Weichstahl aufgeklebt. Auf dem nutlosen Stator befinden sich Ringspulen. Die Spulen sind flach und rechteckig oder rund gewickelt. Um die Wicklungsverluste gering zu halten, ist es vorteilhaft, den tangentialen Teil der Wicklung möglichst kurz zu fertigen.⁵⁶ Werden zwei

54 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

55 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

56 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

Rotorscheiben verwendet, sind sie so angeordnet, dass immer der Nordpol des Magneten der einen Scheibe dem Südpol eines Magneten der anderen Scheibe gegenüber steht.

Der Stator, dargestellt in Abbildung 19, besteht aus nichtmagnetischem und nichtleitendem Material. Daraus ergeben sich auch die entscheidenden Eigenschaften und Vorteile dieser Maschine:

- simples Design
- einfache Herstellung
- absolut kein Nutrastrmoment und damit verbundene Geräusche und Vibrationen, dennoch ist ein welliges Drehmoment möglich
- keine Eisenverluste
- geringe Wirbelstromverluste.

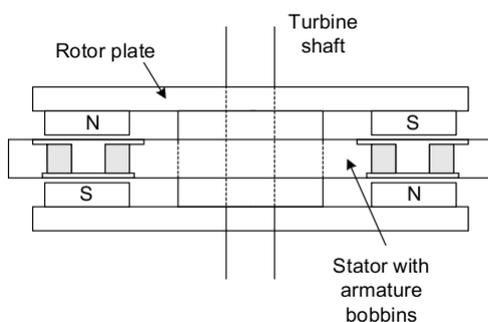


Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung



Abbildung 18: Rotor mit Permanentmagneten einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

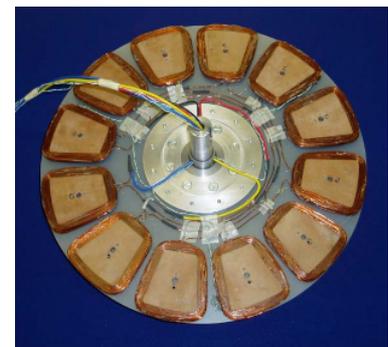


Abbildung 19: Stator einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Für Generatoren kleiner Leistung (bis ca. 2,5 kW) können kostengünstigere zylinderförmige Luftspulen und zylindrische Permanentmagnete verwendet werden. Die Durchmesser der Magnete und der Spulen sind hier sehr ähnlich. Bei einer hohen Polzahl limitiert der Durchmesser der Magnete die aktive Länge der Maschine. Dies kann zu Maschinen mit großem Durchmesser führen. Abhilfe schaffen dann die in der Herstellung teureren trapezförmigen Spulen. Die dazu passenden trapezförmigen Magnete sind einfach zu fertigen und bereits am Markt erhältlich.

Mit einem Prototypen konnten durchschnittliche Wirkungsgrade $>94\%$ erzielt werden. Der Hauptanteil der Verluste ist ohmscher Natur.⁵⁷

Durch den eisenlosen Stator entsteht keine magnetische Anziehungskraft zwischen Stator und Rotor. Dies vereinfacht den Zusammenbau und verringert die Belastung der Lager. Eisenverluste werden eliminiert, womit der Wirkungsgrad steigt. Es sind keine Nutrastmomente vorhanden, ein welliges Drehmoment kann aber trotzdem entstehen. Der Luftspalt für kleine Maschinen beträgt $0,5\text{-}0,8\text{ mm}$.⁵⁸

3.2.6.5.1 Feldverlauf, Luftspaltflussdichte und Spannungsqualität

Für die Betrachtungen dieses Kapitels wurde der Prototyp einer Axialflussmaschine mit folgenden Eigenschaften herangezogen:

- $P=230\text{ W}$, $U=16,7\text{ V}$, $I=8,0\text{ A}$, $f=60\text{ Hz}$ bei $N_n=450\text{ U/min}$
- 16 polig
- Magnetmaterial: NdFeB
- Remanenzflussdichte: $1,128\text{ T}$
- Luftspalt: $2\times 0,7\text{ mm}$
- Wicklung: In Stern geschaltete, zweilagige Durchmesserwicklung mit 48 Spulen, 7 Windungen pro Spule, Wicklungswiderstand $0,58\ \Omega$ bei $75\text{ }^\circ\text{C}$.

Um die Spulen in dem eisenlosen Stator zu befestigen, wurde eine spezielle Drahtisolierung mit Hilfe eines Lösungsmittels klebrig gemacht, anschließend gepresst und danach mit Epoxidharz ausgegossen.

Die Flussdichteverteilung in der Maschine beeinflusst die Spannungsform und die Verluste und damit den Wirkungsgrad. Die Analyse der Magnetfelder in der Maschine ist ein dreidimensionales Problem und erfordert normalerweise eine 3D - Finite Element Software. Um Modellierungs- und Rechenzeit zu sparen wurde nur eine 2D Finite Element Analyse durchgeführt. Da der Maschinenprototyp eine hohe Polzahl hat und die Untersuchung auf einer zylindrischen Oberfläche bei mittlerem Durchmesser erfolgte, ist der Verlust an Genauigkeit zwischen 2D- und 3D- Analyse nur gering.

57 Vgl. Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., *A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines*

58 Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

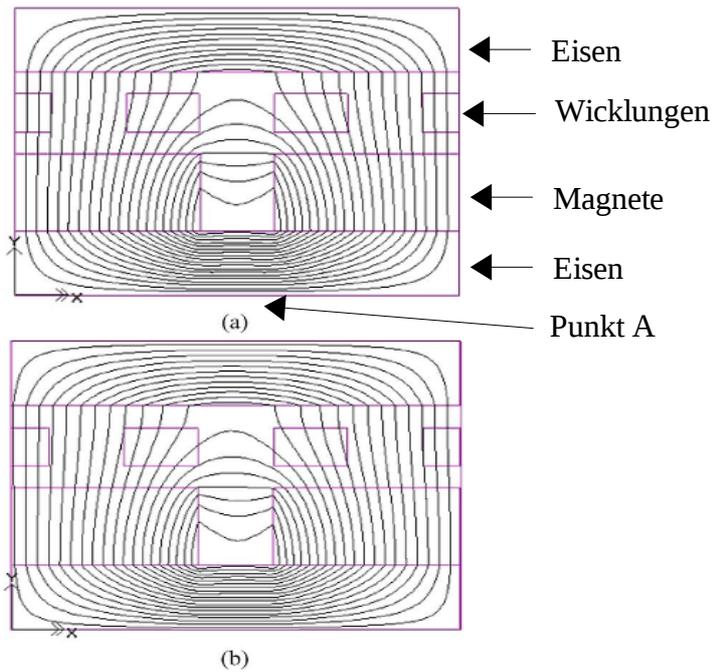


Abbildung 20: 2D Flussverlauf in einer PM Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung
(a) unbelastet (b) belastet

In Abbildung 20 ist der zweidimensionale Flussverlauf der FEM-Berechnung dargestellt. Die x-Achse zeigt in Umfangrichtung und die y-Achse in Axialrichtung. Die NdFeB-Magnete sind in axialer Richtung magnetisiert. Zwischen benachbarten Magneten tritt ein deutlicher Streufluss auf. Aufgrund des relativ langen wirksamen Luftspalts wird die Ankerrückwirkung weitestgehend unterdrückt. In Abbildung 20 (a) und (b) ist aus diesem Grund bei einem Leistungsfaktor von eins nur ein sehr geringer Unterschied zwischen belastetem und unbelastetem Zustand festzustellen. Luftspaltflussdichten, Streuflüsse und Sättigungszustand sind hauptsächlich von der Magnetisierung des Rotors abhängig und ändern sich bei normalen Lastströmen nur unwesentlich.

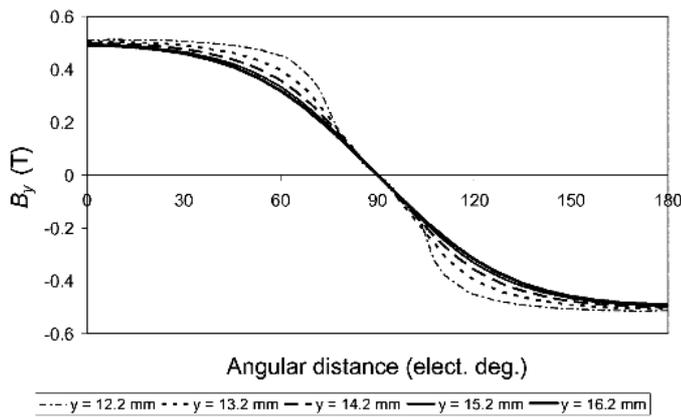


Abbildung 21: Berechnete axiale Komponente der Luftspaltflussdichte in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine

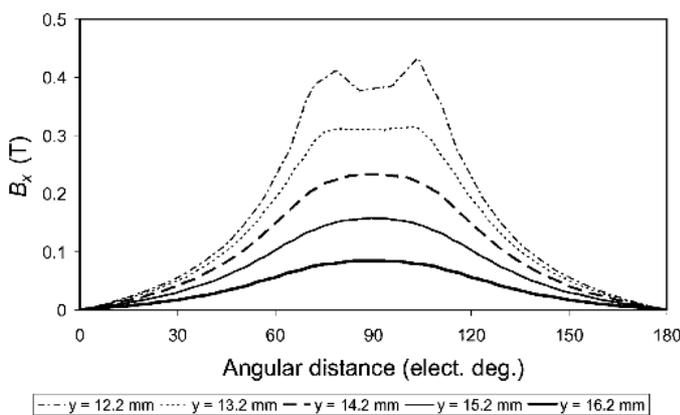


Abbildung 22: Berechnete Komponente der Luftspaltflussdichte entlang des Umfanges in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine

Beide Anteile der Luftspaltflussdichte B_x und B_y ändern sich mit dem Abstand in axialer Richtung, ausgehend von Punkt A in Abbildung 20 (a). Obwohl B_x in Abbildung 22 nicht zur Erzeugung der Polradspannung beiträgt, verursacht diese Komponente gemeinsam mit B_y , Wirbelströme in den Leitern des Ankers und damit Wirbelstromverluste.

Der Verlauf von B_y in Abbildung 21 zeigt die Abwesenheit von Nutharmonischen. In der Nähe der Magnete, bei kleinem Abstand y , wird der Verlauf trapezförmig und dies führt zu harmonischen Verzerrungen.

Bei einem Abstand von $y=14,2$ mm, im Zentrum der Wicklung, hat B_y 12,2% der Dritten, 1,6% der Fünften, und 0,5% der Siebenten Harmonischen. Ohne die triplen Harmonischen (ungeradzahlige, durch drei teilbare Oberschwingungen, können Neutralleiterströme verursachen) hat B_y einen Gesamtanteil an harmonischer Verzerrung von 1,7%. B_x hat einen höheren Anteil an Harmonischen von 29,1%, 3,9% und 1,3% für die 3., 5. und 7. Harmonische. Der Gesamtanteil an harmonischer Verzerrung in der Ausgangsspannung

ist nahezu lastunabhängig und liegt in der Berechnung bei 1,7% und bei dem realen Prototypen bei 1,6%. Das bedeutet, die Spannung weist eine gute Sinusform auf.⁵⁹

3.2.6.5.2 Ersatzschaltbild

Da die relative Permeabilität (recoil permeability) von oberflächenbefestigten NdFeB Magneten in der Nähe von Luft liegt, kann die Axialflussmaschine als Synchronmaschine mit konstantem Luftspalt und konstanter Erregung betrachtet werden. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 23 dargestellt.

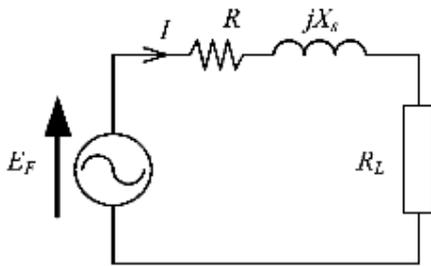


Abbildung 23: Ersatzschaltbild einer Phase der Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung und ohmscher Last

$$I = \frac{E_F}{\sqrt{((R + R_L)^2 + X_s^2)}} \quad (9)$$

$$U_{RL} = E_F \cdot \frac{R_L}{\sqrt{((R + R_L)^2 + X_s^2)}} \quad (10)$$

$$P_{out} = \frac{3 \cdot E_F^2}{(R + R_L)^2 + X_s^2} \cdot R_L \quad (11)$$

3.2.6.5.3 Verluste und Wirkungsgrad

Da der Stator eisenlos ist, treten auch keine Eisenverluste auf. Die Verluste bestehen hauptsächlich aus Kupferverlusten

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R, \quad (12)$$

⁵⁹ Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

Ventilationsverlusten und Wirbelstromverlusten in den Leitern der Statorwicklung. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, kann der Widerstand der Wicklungen durch einen vergrößerten Querschnitt gesenkt werden. Die Wirbelstromverluste können durch die Verwendung mehrerer Einzelleiter verringert werden.⁶⁰

3.2.6.5.4 Betriebsverhalten

Das hier gezeigte Betriebsverhalten ist das des in Abschnitt 3.2.6.5.1 beschriebenen Prototypen.

Aufgrund der relativ großen Luftspaltlänge ist die Ankerrückwirkung schwach und damit auch die Synchronreaktanz klein im Verhältnis zum ohmschen Wicklungswiderstand. Der Spannungsabfall bei Belastung wird daher bei diesem Maschinentyp hauptsächlich vom Wicklungswiderstand beeinflusst.

Der Spannungsabfall in der Maschine bei einer Drehzahl von 600 U/min beträgt zwischen unbelasteter und voll belasteter Maschine 25%. Dabei wird eine Leistung von 340 W bei Nennstrom abgegeben. Wird die Drehzahl auf 300 U/min reduziert, erhöht sich dieser Spannungsabfall auf 50% und die abgegebene Leistung bei Nennstrom sinkt auf 110 W. Aufgrund des relativ großen Wicklungswiderstandes wird der maximale Wirkungsgrad von 79% bei einer Drehzahl von 600 U/min und kleinem Strom erreicht. Die Ausgangsspannung steigt linear mit der Drehzahl, die Leistung steigt annähernd quadratisch bei konstantem Lastwiderstand. Der absolute Wirkungsgrad wurde bei dieser Untersuchung nur sehr ungenau bestimmt. Für den Antrieb des Generators diente ein Keilriemen, dessen Verluste den Autoren [61] nicht genau bekannt waren.⁶² Ein anderer Prototyp erreichte aber Wirkungsgrade >94%.⁶³

60 Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

61 Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

62 Vgl. Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*

63 Vgl. Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., *A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines*

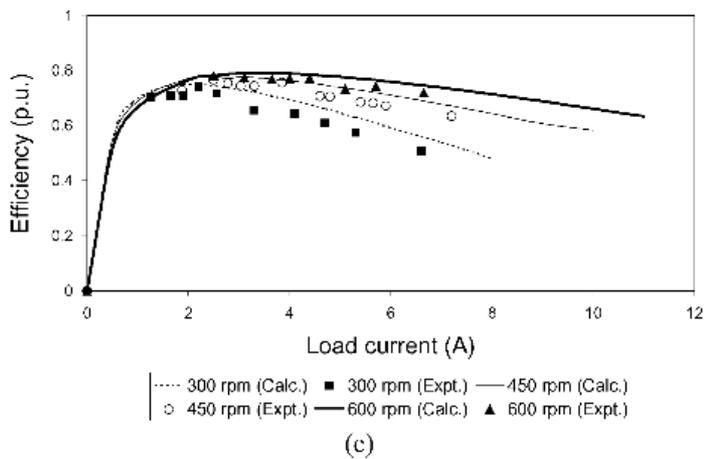
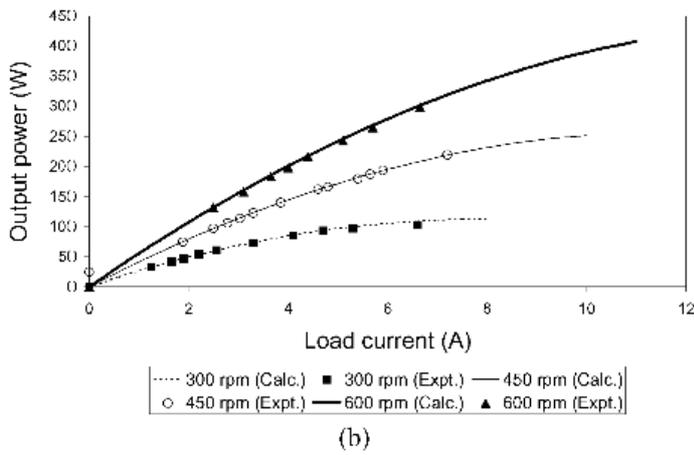
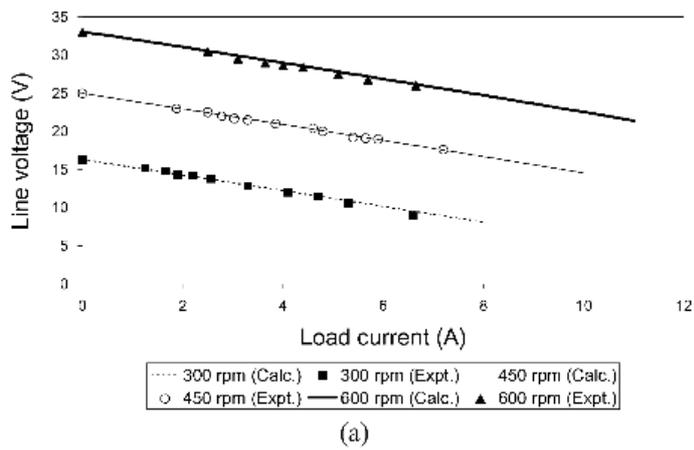
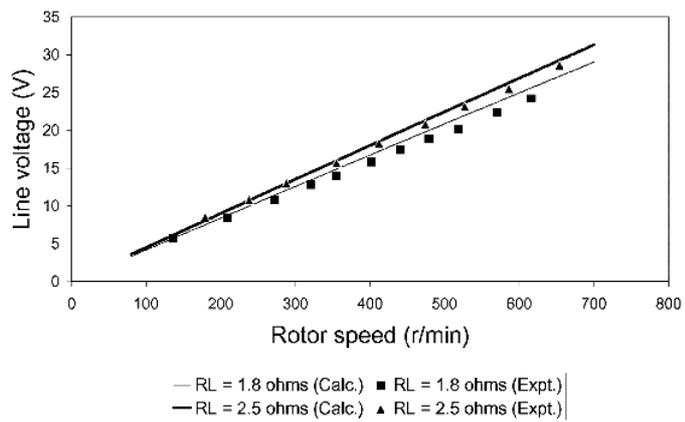
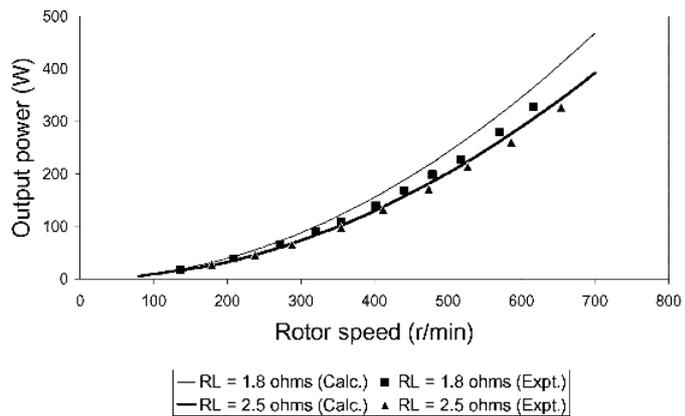


Abbildung 24: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei verschiedenen konstanten Drehzahlen:

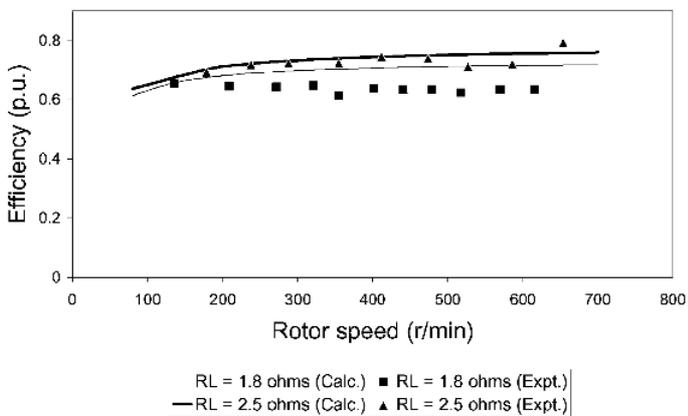
- (a) Änderung der Spannung mit dem Strom
- (b) Änderung der Ausgangsleistung mit dem Strom
- (c) Änderung des Wirkungsgrades mit dem Strom



(a)



(b)



(c)

Abbildung 25: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei variabler Drehzahl und bei verschiedenen konstanten Lastwiderständen:

- (a) Änderung der Spannung mit der Drehzahl
- (b) Änderung der Ausgangsleistung mit der Drehzahl
- (c) Änderung des Wirkungsgrades mit der Drehzahl

3.2.7 Permanentmagneterregte Transversalflussmaschine

Die Transversalflussmaschine hat eine Ähnlichkeit mit der Klauenpolmaschine und taucht in ersten Patenten um 1885 auf. Es handelt sich um keine neue Technologie, sie konnte sich aber bis heute nicht etablieren.

Die Transversalflussmaschine besitzt eine größere Leistungsdichte als herkömmliche Maschinen (0,5-2 kW/kg verglichen mit 0,5-0,8 kW/kg) und kann mit hohen Polzahlen, also für kleine Drehzahlen ausgeführt werden. Transversalflussmaschinen besitzen den Vorteil der Modularität. Jede Phase wird als eigenes und unabhängiges Modul gefertigt. Die einzelnen Module werden dann je nach benötigter Phasenanzahl axial aneinander gereiht. Sie ist für niedrige bis mittlere Leistungsklassen in Anwendungen mit niedriger Drehzahl ohne Getriebe geeignet.⁶⁴

Die höhere Leistungsdichte der Transversalflussmaschine gegenüber konventionellen Maschinen beruht auf der Tatsache, dass die Polzahl unabhängig vom elektrischen Kreis erhöht werden kann. In einer Transversalflussmaschine verläuft der magnetische Fluss transversal (senkrecht) zur Drehebene.

Vorteile gegenüber konventionellen Maschinen:

- höhere Polzahlen ohne kompliziertere Wicklung
- die Designparameter für den magnetischen Flussweg und die Spulen sind weitgehend unabhängig voneinander – mehr Freiheiten bei der Dimensionierung
- sehr einfache Ankerwicklung, Gesamtlänge der Wicklung ist relativ kurz
- die einzelnen Phasen sind magnetisch voneinander unabhängig und dies vereinfacht die Steuerung.

Nachteile:

- geringer Leistungsfaktor, große Streuung
- komplexe Konstruktion mit dreidimensionalen magnetischen Feldern
- geblechte Ausführung ist kompliziert und muss oft durch den Einsatz teurer weichmagnetischer Werkstoffe ersetzt werden
- starke Drehmomentenwelligkeit⁶⁵

⁶⁴ Vgl. Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., *On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology*

- Auftreten von Geräuschen und Vibrationen.⁶⁶

Diese Nachteile machen die Transversalflussmaschine teuer und sie wird daher meist nur in der Luft- und Raumfahrt, sowie für spezielle Anwendungen eingesetzt.

Prinzipiell gibt es drei Varianten der Transversalflussmaschine:

- eine permanentmagneterregte mit aktivem Rotor, die Permanentmagnete befinden sich auf dem Rotor (siehe Abbildung 26)
- eine mit passiven Rotor, hier befinden sich die Permanentmagnete auf dem Stator
- eine elektrisch erregte ohne Permanentmagnete mit variabler Reluktanz (siehe Abbildung 27).

Alle Ausführungsformen haben eine ringförmige Phasenwicklung und eine Statorstruktur, ähnlich der Klauenpolmaschine. Es ist prinzipiell auch möglich, alle Typen ein- oder zweiseitig (siehe Abbildung 28) zu konstruieren. Jedoch sind einseitige Ausführungen einfacher herzustellen und daher eher für praktische Anwendungen geeignet.⁶⁷

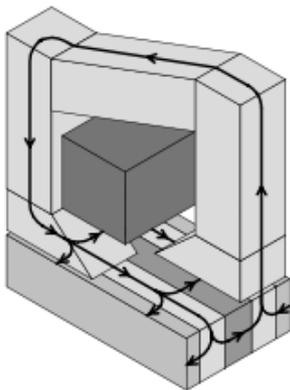


Abbildung 26:
permanentmagneterregte
Transversalflussmaschine

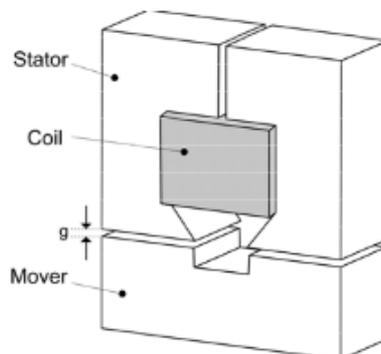


Abbildung 27: Transversalfluss
Reluktanzmaschine

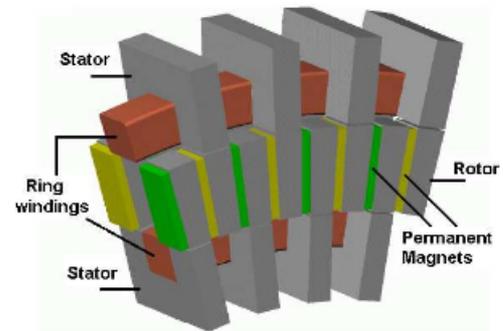


Abbildung 28: zweiseitige
permanentmagneterregte
Transversalflussmaschine

Der Aufbau der Transversalfluss-Reluktanzmaschine ist etwas einfacher verglichen mit der permanentmagneterregten Variante. Zweitere ist aufgrund der hohen möglichen Polzahlen und integrierten Erregung für kleine Wind- und Wasserkraftwerke geeignet. Beide haben allerdings dieselben beiden Probleme:

65 Vgl. Schüttler J., Werner U., Vinogradski M., Orlik B., *Stromregelung einer zweisträngigen Transversalflussmaschine in Sammlerbauweise*

66 Vgl. Schüttler J., Werner U., Vinogradski M., Orlik B., *Stromregelung einer zweisträngigen Transversalflussmaschine in Sammlerbauweise*

67 Vgl. Garcia J.S.D., Ferreira da Luz M.V., Bastos J.P.A., Sadowski N., *Transverse Flux Machines: What for?*

1. Streuung, die aufgrund der homopolaren Bauweise (entlang der Achse wechselnde Polarität) nicht drastisch verringert werden kann
2. komplizierte Struktur der Maschine und dreidimensionale Führung des magnetischen Flusses

Um die komplizierte Struktur etwas zu vereinfachen, kann das in Abbildung 29 gezeigte Design gewählt werden. Die Statorpole sind geblecht und um den Herstellungsprozess zu vereinfachen in der Mitte, wie bei der Reluktanzmaschine in Abbildung 27 geteilt. Im Rotor wird eine Bauweise mit Flusskonzentration verwendet. In der klassischen TF-Maschine, dargestellt in Abbildung 26, werden die Permanentmagnete tangential magnetisiert, was zu einer komplizierteren Struktur führt. Bei dieser Ausführung werden sie axial magnetisiert. Dies erfordert auch keinen teuren weichmagnetischen Rotorkern.

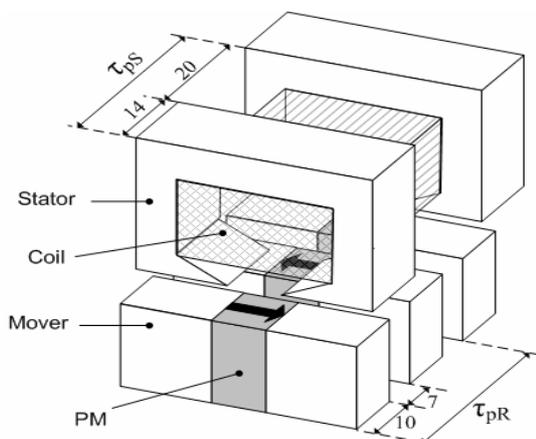


Abbildung 29: permanentmagneterregte Transversalfussmaschine mit einfacherem Aufbau

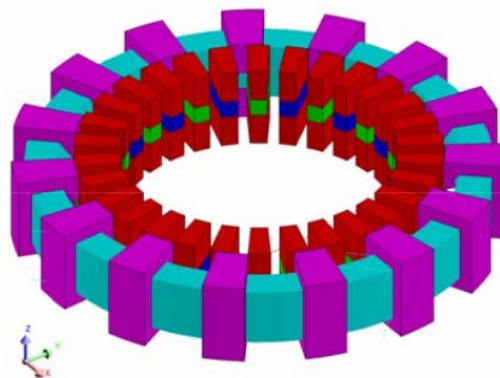


Abbildung 30: Ein Phasenmodul der permanentmagneterregten Transversalfussmaschine mit einfacherem Aufbau

Um diese Maschine als Motor selbst anlaufen zu lassen und einen runden Lauf zu gewährleisten, wird als minimale Phasenanzahl $m = 2$ gewählt. Da die marktüblichen Umrichter dreiphasig sind, werden auch meist dreiphasige Maschinen konstruiert. Für einen Generator mit Umrichter genügt eine einphasige Ausführung, solange die benötigte Ausgangsleistung dies gestattet.

Eine höhere Polzahl vergrößert das Moment der Maschine, allerdings auch deren Durchmesser. Die geeignete Polzahl kann mit einer 3D-FEM Analyse ermittelt werden, indem die größte Momentdichte berechnet wird. Mehr Pole bedeuten auch bei gleicher Rotordrehzahl eine höhere Statorfrequenz und eine Zunahme der damit verbundenen Verluste und der Reaktanz.⁶⁸

⁶⁸ Vgl. Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., *On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology*

Die Fachhochschule Gelsenkirchen berichtete im Oktober 2009 vom erfolgreichen Bau eines Prototypen einer Transversalflussmaschine, die auch für Dachwindkraftanlagen geeignet sein soll. Die Entwicklung wurde in Kooperation mit Siemens durchgeführt. Allerdings sind noch keine technischen Daten bzw. Details zu diesem Prototypen veröffentlicht worden.⁶⁹

3.2.8 Permanentmagneterregte Klauenpolmaschine

Die Klauenpolmaschine ist, wie in Kapitel 3.6 angeführt, ein in der Kfz-Branche oft eingesetzter Generator. Der Nachteil der elektrischen Erregung kann auch bei dieser Maschine durch Permanentmagnete behoben werden. Der Stator ist ähnlich dem einer Asynchronmaschine aufgebaut.

Die Form des Klauenpolrotors erlaubt eine Ausführung mit vielen Polen. Der Rotor ist, wie in Abbildung 31 dargestellt, modular aufgebaut. Als Magnetmaterial dienen NdFeB Magnete, die axial magnetisiert sind.⁷⁰ Diese Magnete sind zwischen zwei Stahlplatten eingebettet, die die Klauenpolstruktur tragen. Um die Ausgangsspannung oder auch die Leistung des Generators zu erhöhen, können mehrere dieser Rotormodule auf der Welle hintereinander angeordnet werden.⁷¹

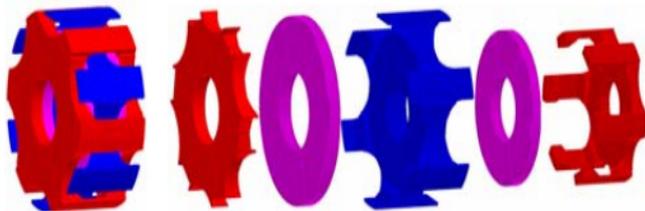


Abbildung 31: Rotor einer permanentmagneterregten Klauenpolmaschine

Diese Maschine erlaubt hochpolige Ausführungen mit einer sehr einfachen Magnetform. Der Rotor besteht aber, gleich wie bei dessen elektrisch erregter Variante, aus einer recht komplexen Struktur, die in der Herstellung und Berechnung aufwändig ist. Der Bemessungswirkungsgrad liegt bei 70% und der durchschnittliche Wirkungsgrad bei 35%. Dies ist etwas besser als der Wirkungsgrad der elektrisch erregten Version mit 60%

69 Vgl. http://www2.fh-gelsenkirchen.de/FH-Sites/FH-Main/fileadmin/FH-GE/pressestelle/trikon_pdf/Trikon2010_1.pdf 17.05.2010

70 Vgl. Melcescu L., Popescu M., Covrig M., Cistelean M., Craiu O., *Numerical and Experimental Analysis of Two Permanent Magnet Claw Poles Wind Generators*

71 Vgl. Jurca F., Martis C., Birou I., Biro K., *Analysis of Permanent Magnet Claw-Pole Synchronous Machine*

Maximal- und 30% Durchschnittswirkungsgrad.⁷²

Wird der Generator elektrisch belastet, kommt es verglichen mit der Leerlaufspannung zu einem erheblichen Spannungsabfall. Dieser Spannungsabfall kann mit dem hohen Streufluss, der zwischen den Klauen des Rotors auftritt erklärt werden. Andererseits schützt der Streufluss aber auch die Magnete vor einer Entmagnetisierung im Kurzschlussfall.

3.2.8.1 Nutrastmoment

Um das Nutrastmoment zu verringern, ist auch bei dieser Maschine eine Schrägung der Statornuten die wirkungsvollste Maßnahme. Mit geschrägten Nuten wird das Nutrastmoment so klein, dass es in Experimenten nur schwer zu bestimmen ist.⁷³

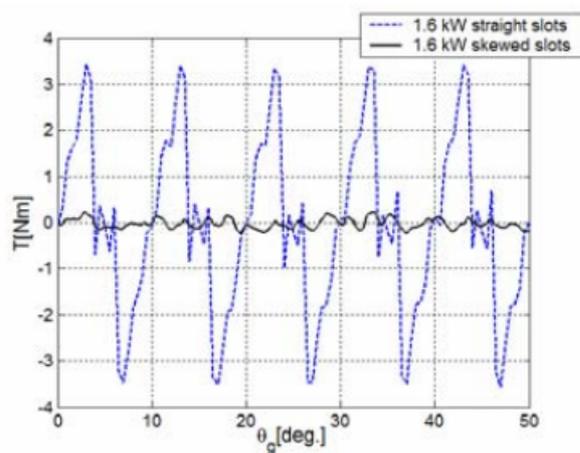


Abbildung 32: berechnetes Nutrastmoment einer 1,6kW permanentmagneterregten Klauenpolmaschine, blaue Linie: ohne Schrägung, schwarze Linie: mit Schrägung

3.2.8.2 Spannungsqualität

In Abbildung 34 sind die Spannungsformen der Klauenpolmaschine für unterschiedliche Drehzahlen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ausgangsspannung von der Sinusform abweicht und ein dementsprechender Anteil an harmonischen Schwingungen zu erwarten ist.

In den Abbildungen 33, 35 und 36 sind die Spektren der Statorspannung für die Drehzahlen 500U/min, 750U/min und 1500U/min dargestellt. Das Verhältnis der Oberschwingungen ändert sich kaum. Bedeutendste Oberschwingungen sind die 17. und

⁷² Vgl. Zhang Bingyi, Pu Yanzhou, Sun Guanggui, Feng Guihong, *A Novel Contactless Auto-generator*

⁷³ Vgl. Melcescu L., Popescu M., Covrig M., Cistelean M., Craiu O., *Numerical and Experimental Analysis of Two Permanent Magnet Claw Poles Wind Generators*

19. und für hohe Drehzahlen die 7. und 13..

Der Anteil an harmonischen Schwingungen ist bei diesem Maschinentyp noch verbesserungswürdig und sollte durch weitere Forschung noch gesenkt werden.⁷⁴

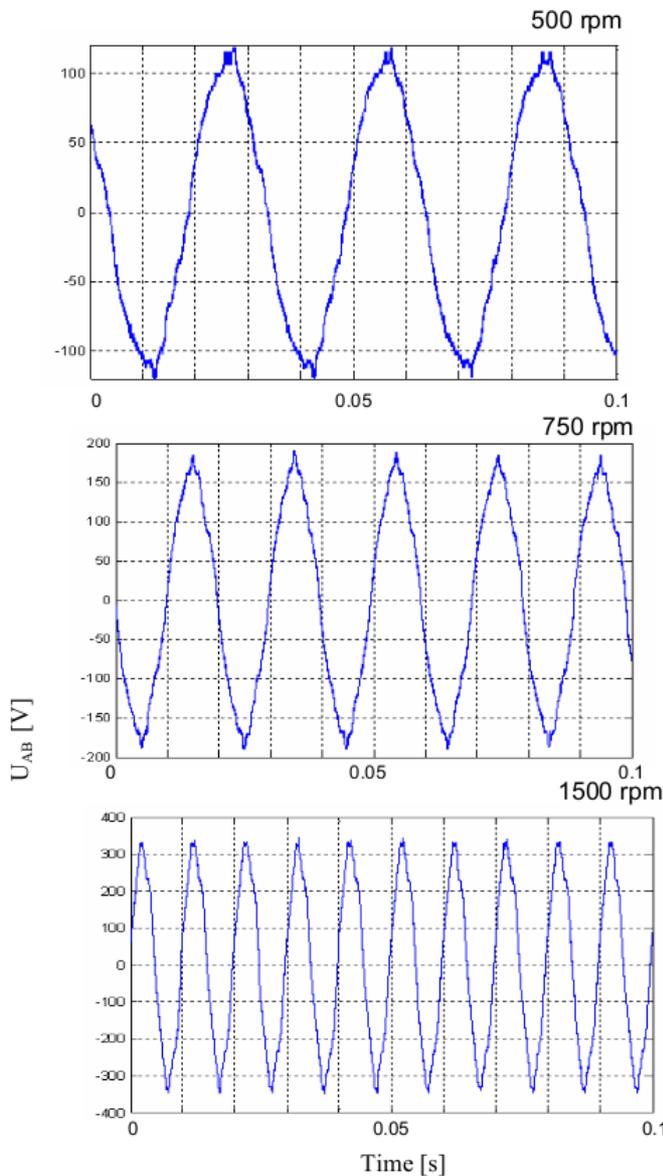


Abbildung 34: Spannungsform der permanentmagneterregten Klauenpolmaschine für unterschiedliche Drehzahlen

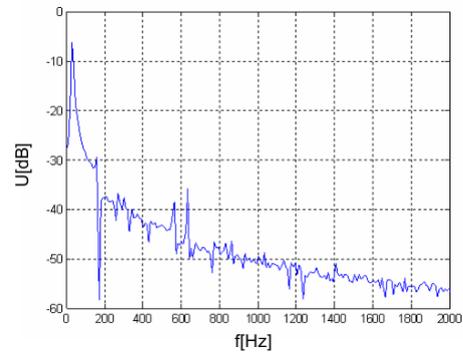


Abbildung 33: Spektrum der Statorspannung bei 500U/min, Grundschwingung bei 33,3Hz

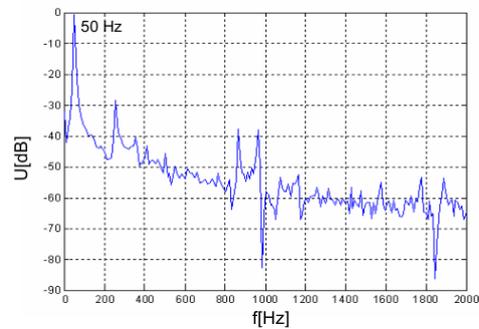


Abbildung 35: Spektrum der Statorspannung bei 750U/min, Grundschwingung bei 50Hz

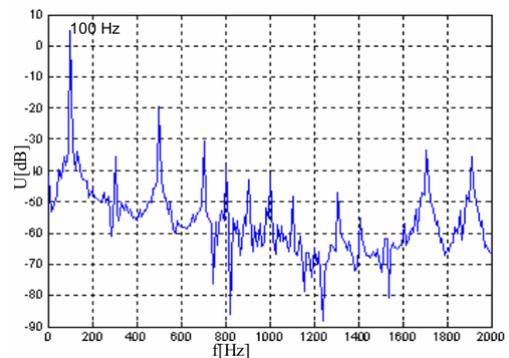


Abbildung 36: Spektrum der Phasenspannung bei 1500U/min, Grundschwingung bei 100Hz

⁷⁴ Vgl. Jurca F., Martis C., Biro K., *Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D*

3.2.8.3 Zusammenfassung

Die Spannungsqualität, aber hauptsächlich der schlechte Wirkungsgrad im Vergleich zu den anderen permanentmagneterregten Bauformen, machen diese Maschine für ein System, das einen möglichst hohen Gesamtwirkungsgrad anstrebt, nicht interessant.

3.2.9 Hybrid Permanentmagnet Maschinen

Unter Hybrid wird ein System verstanden, das zwei Technologien miteinander kombiniert. Im Bereich der elektrischen Maschinen bedeutet dies, dass zusätzlich zur Permanentmagneterregung auch eine elektrische Erregung vorhanden ist.

3.2.9.1 Permanentmagnet Reluktanz Generator

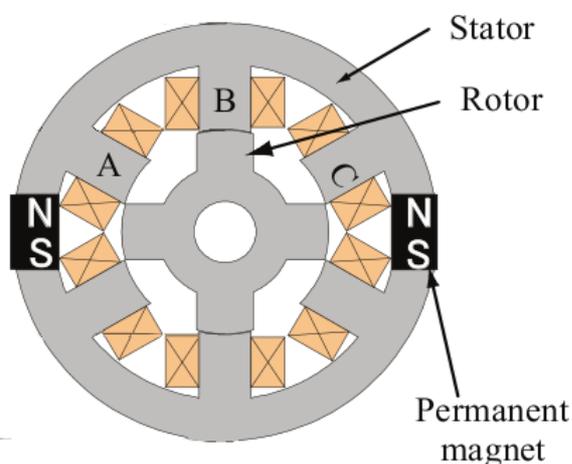


Abbildung 37: Permanentmagnet-Reluktanz-Generator

Konventionelle geschaltete Reluktanzmotoren haben bei einer Verwendung als Generator für ein Kleinwindkraftwerk den Nachteil, dass eine Erregerschaltung mit einem Rotorlagegeber und eine Energiequelle benötigt werden. Werden allerdings Permanentmagnete im Stator eingebettet, wie in Abbildung 37 dargestellt, entfällt dieser Aufwand und es ist auch ein höherer Wirkungsgrad möglich.

Die Form des Rotors gleicht der des geschalteten Reluktanzmotors und bringt auch dessen Vorteile mit sich (Robustheit, einfache und günstige Herstellung, Zuverlässigkeit bei hohen Drehzahlen).⁷⁵ Reluktanzmaschinen neigen aber ebenso wie Schrittmotoren durch deren Funktionsprinzip zu einer sehr starken Geräusentwicklung. Dies wird in Abschnitt 3.5.3 näher erläutert.

⁷⁵ Vgl. Goto H., Hai-Jiao Guo, Ichinokura O., *A Micro Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Reluctance Generator*

3.2.9.2 Synchronmaschine mit Doppelstator

Hybriderregte Synchronmaschinen vereinen die Vorteile von permanentmagneterregten Maschinen mit der Möglichkeit, die Luftspaltflussdichte mit einer Hilfswicklung zu kontrollieren. Sie sind besonders für Anwendungen geeignet, die bei der Energieerzeugung eine konstante Spannung und eine konstante Leistung über einen weiten Drehzahlbereich fordern.

Es gibt sehr viele Topologien dieser Bauweise, die sich in vier Gruppen unterteilen lassen:

- hybriderregte Maschinen mit ausgeprägten Zähnen auf Rotor und Stator (hybrid excitation doubly salient machine)
- Folgepol PM Maschinen (consequent pole PM machine)
- bürstenlose PM hybrid erregte Maschinen mit Klauenpolrotor (brushless PM hybrid machine with claw-pole-type-rotor)
- homopolare und bipolare hybriderregte Synchronmaschinen (homopolar and bipolar hybrid excited synchronous machine).

Die Folgepol PM Maschine kann auch als Generator für konstante Spannung eingesetzt werden. Dafür wird die Erregerwicklung am äußeren Stator untergebracht. Allerdings können die relativ langen Erregerwicklungen zu hohen Erregerverlusten führen. Verglichen mit dieser Maschine kann ein hybriderregter Generator mit Klauenpolrotor mit einem relativ geringen Erregerstrom die Spannung konstant halten, jedoch treten hier größere Streuflüsse auf.

Um die Streuflüsse klein zu halten werden beim hybriderregten Synchrongenerator die Permanentmagnete und Erregerwicklungen unabhängig auf der Welle untergebracht. Dieser für die Fahrzeugindustrie entwickelte Generator hat allerdings den Nachteil, dass Bürsten und Schleifringe verwendet werden und es bis heute keine bekannte Anwendung in Windkraftanlagen gibt.

Die üblichen Windgeneratoren haben aufgrund der relativ geringen Windgeschwindigkeiten und damit kleinen Drehzahlen einen großen Durchmesser und kleine Leistungsdichten. Zusätzlich variiert die Ausgangsspannung mit den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten oder der Last. Diese Nachteile soll der hybriderregte Synchrongenerator mit Doppelstator ausgleichen.

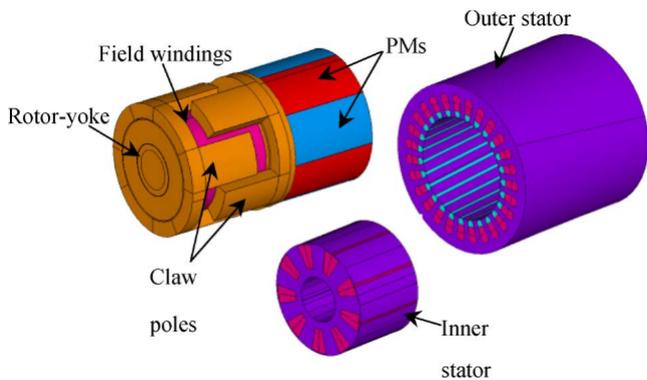


Abbildung 39: Strukturmodell des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

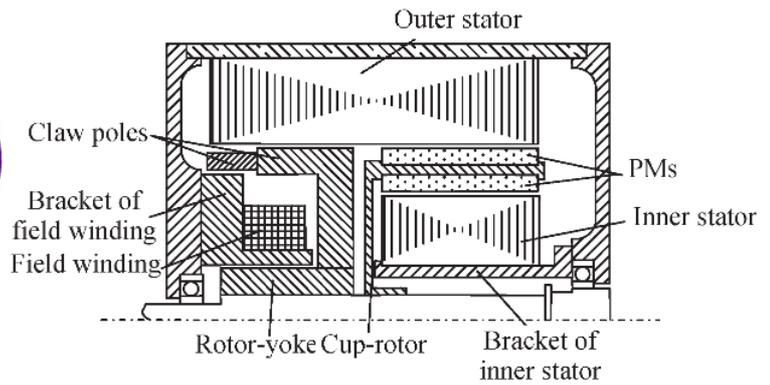


Abbildung 38: Schnitt des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

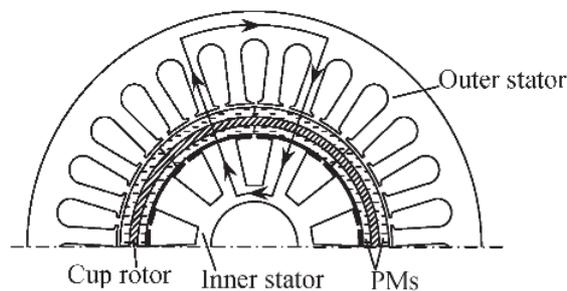


Abbildung 41: Permanentmagnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

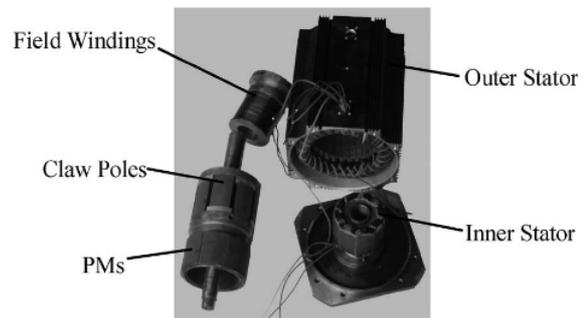


Abbildung 40: Prototyp des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

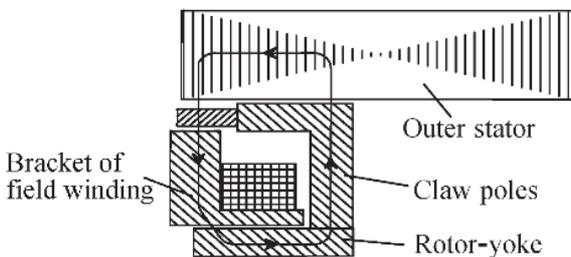


Abbildung 42: DC-Feld Magnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Es gibt zwei unabhängige Magnetkreise. Der Permanentmagnetkreis, dargestellt in Abbildung 41, besteht aus Permanentmagneten, Luftspalt, Glockenläufer und zwei geblechten Statoren. Der DC-Feld Magnetkreis in Abbildung 42 besteht aus Klauenpolen, Luftspalt, geblechtem Kern des äußeren Stators und Halteblech der Feldwicklung.⁷⁶ Dieser relativ komplexe Aufbau der Maschine macht sie allerdings auch teuer. Da Wechselrichter, die für Windenergieanlagen ausgelegt sind, meist mit variablen Eingangsspannungen arbeiten können, ist fraglich, ob die Eingriffsmöglichkeit in den Erregerkreis überhaupt notwendig ist.

⁷⁶ Vgl. Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, *A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator*

3.2.10 Zusammenfassung Generatoren mit Permanentmagneten

Generatoren mit Permanentmagneten sind gut geeignet für den Einsatz in kleinen Windturbinen. Ihre Hauptvorteile sind die Selbsterregung, hohe Leistungsfaktoren und hohe Wirkungsgrade. Der Wirkungsgradvorteil gegenüber anderen Maschinen ergibt sich aufgrund der Tatsache, dass die Erregung von den Permanentmagneten ohne zusätzlichen Energiebedarf bereitgestellt wird und der momentbildende Strom nur in der Ständerwicklung fließt. Für hohe Drehmomente bleibt der Wirkungsgrad auch hoch, fällt dann aber bei kleinen Drehmomenten stark ab. Ein Nachteil sind die höheren Kosten für das Permanentmagnetmaterial. Auch der erforderliche Umrichter erhöht die Gesamtsystemkosten, bringt aber den Vorteil, dass die Turbine für sehr viele Windgeschwindigkeiten in einem Bereich mit gutem Wirkungsgrad betrieben werden kann.

Die vom Generator erzeugte Spannung ist direkt proportional zur Wellendrehzahl. Dies kann bei Drehzahlen über der Nenndrehzahl zu gefährlich hohen Spannungen führen. Dem kann durch Feldschwächung entgegenwirkt werden. Dazu ist ein spezielles mechanisches Design des Feldsystems unter Ausnutzung des Reluktanzeffektes und ein zusätzlicher Strom im Ankerkreis, der das magnetische Feld schwächt, erforderlich. In dieser Betriebsart sinkt dann auch der Wirkungsgrad. Der Generator sollte aber ohnehin durch eine geeignete Regelung in einem sicheren Drehzahlbereich gehalten werden, und somit eine Feldschwächung nicht erforderlich machen. Auf die Spannungsregelung mit Hilfe von Blindleistung wurde bereits in Kapitel 3.2.2 eingegangen.

Zu beachten ist bei diesen Generatoren auch, dass die Permanentmagnete bei höheren Temperaturen empfindlicher gegen Entmagnetisierung werden und dann ihre magnetischen Eigenschaften einbüßen können.⁷⁷

3.3 Synchronmaschine mit elektrischer Erregung

Die elektrisch erregte Synchronmaschine ist größer, schwerer und besitzt einen geringeren Wirkungsgrad als Synchronmaschinen mit Permanentmagneten. Zusätzlich ist immer eine Energiequelle für die Erregung erforderlich und diese Erregerenergie muss meist über Schleifringe übertragen werden. Dies erhöht den Wartungsaufwand.

Aus diesen Gründen wurde die elektrisch erregte Synchronmaschine in dieser Arbeit als Generator für eine Mikrowindturbine nicht näher betrachtet.

⁷⁷ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

3.4 Bürstenbehaftete Gleichstrommaschine

Die klassische Gleichstrommaschine wurde in dieser Arbeit als möglicher Generator nicht in Betracht gezogen. Grund dafür ist vor allem der Verschleiß der Bürsten und des Kommutators und der damit verbundene Wartungsaufwand.

3.5 Geschalteter Reluktanzgenerator

Der auch als „switched reluctance motor“ bezeichnete Motor oder Generator hat den Vorteil eines recht einfachen, robusten und kostengünstigen Aufbaus. Das Funktionsprinzip ist schon seit ca. 100 Jahren bekannt, wurde aber erst vor 20 Jahren aufgrund der Fortschritte in der Leistungselektronik wieder näher untersucht. Das Funktionsprinzip erlaubt prinzipiell sehr hohe Drehzahlen und hohe Drehmomente bei geringen Drehzahlen.⁷⁸

3.5.1 Aufbau

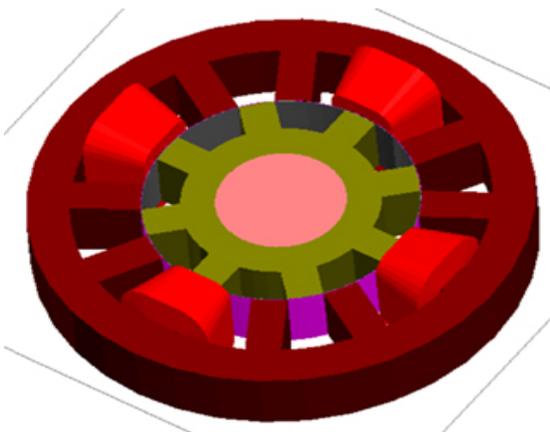


Abbildung 43: 3D-Modell eines dreiphasigen geschalteten Reluktanzgenerators, dargestellt sind nur die Wicklungen einer Phase

Sowohl Stator als auch Rotor besitzen ausgeprägte Pole. Das ist der Grund für die ältere Bezeichnung „doubly salient variable reluctance motor“. Im Stator sind kostengünstige konzentrierte Wicklungen untergebracht, von denen im allgemeinen zwei gegenüberliegende einen Wicklungsstrang bilden. Der Läufer besitzt keine Wicklungen und kann daher für sehr hohe Drehzahlen und sehr trägheitsarm konstruiert werden. Die Anzahl der Zähne des Läufers ist geringer als jene der Ständerpole.⁷⁹

⁷⁸ Vgl. Rabinovici R., *Torque ripple, vibrations, and acoustic noise in switched reluctance motors*

⁷⁹ Vgl. Stölting H.D., Kallenbach E., *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*

3.5.2 Funktionsprinzip

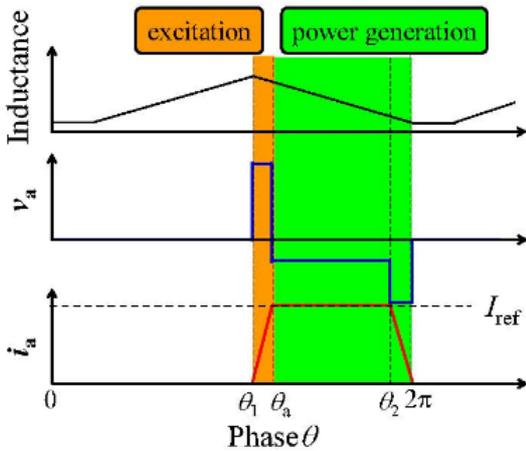


Abbildung 45: Induktivitäts-, Spannungs- und Stromverlauf eines geschalteten Reluktanzgenerators

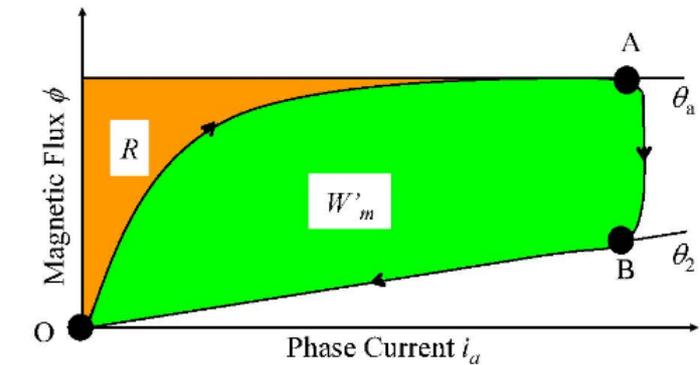


Abbildung 44: Magnetischer Fluss als Funktion des Stromes in einem geschalteten Reluktanzgenerator

Bewegt sich der Rotor des geschalteten Reluktanzgenerators, ändert sich der Abstand zwischen Stator und Rotorzähnen und die Folge ist eine Induktivitätsänderung. Dies ist für eine Phase in Abbildung 45 ganz oben dargestellt. Sind ein Stator und ein Rotorzahn genau aufeinander ausgerichtet, so hat die Induktivität ein Maximum. In diesem Punkt beginnt die Erregung mit einer positiven Spannung v_a . Als Folge nimmt der Strom i_a zu. Mit dem Strom steigt auch der magnetische Fluss in der Maschine bis zum Punkt A in Abbildung 44. Zum selben Zeitpunkt beginnt die Induktivität abzunehmen. Sobald der Strom einen Referenzwert I_{ref} erreicht hat, ist der Vorgang der Erregung abgeschlossen. Nun wird der Strom konstant gehalten. Während der Fluss von Punkt A nach Punkt B abnimmt wird Leistung abgegeben, weil die Spannung das Vorzeichen gewechselt hat. Ab dem Punkt B wird negativere Spannung angelegt, der Strom nimmt wieder ab und der Fluss geht gegen null. In Abbildung 44 bezeichnet die Fläche R die für die Erregung notwendige Energie und die Fläche W'_m die abgegebene Energie.⁸⁰

3.5.3 Eigenschaften

Für die Erregung ist immer eine Energie erforderlich, diese muss in Abhängigkeit der Rotorposition zum richtigen Zeitpunkt aufgebracht werden. Dies ergibt ähnliche Probleme beim Bremsverhalten wie bei der Asynchronmaschine. Zusätzlich wird ein Rotorlagegeber

⁸⁰ Vgl. Ogawa K., Yamamura N., Ishida M., *Study for Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator*

benötigt, der wiederum die Zuverlässigkeit verringert und den Wartungsaufwand erhöht. Ersetzt man den Rotorlagegeber durch eine Rotorpositionserkennung mit Hilfe der Induktivität, verkompliziert sich das System und die Kosten nehmen zu.

Aufgrund des erforderlichen Blindstromes für die Erregung ist der Wirkungsgrad schlechter als bei permanentmagneterregten Generatoren und ein leistungsstärkerer Umrichter ist erforderlich.

Das Drehmoment wird vom Induktivitätsunterschied zwischen ausgerichteter und unausgerichteter Stellung bestimmt. Um diesen Unterschied möglichst groß zu machen, werden diese Generatoren hoch gesättigt betrieben. Der Leistungsfaktor ist schlechter als bei Asynchronmaschinen und daher verringert sich die Umrichterausnutzung. Der große Induktionsunterschied ist auch verantwortlich für hohe radiale, stark pulsierende Kräfte. Dies führt zu einer erheblichen Geräusentwicklung. Die geringe Luftspaltbreite und die hohe Kraftkonzentration machen den Aufbau empfindlich gegenüber Unsymmetrien. Diese können zusätzliche Geräusche verursachen.⁸¹

Die Geräusche entstehen durch mechanische Vibrationen des Stators. Diese werden wiederum durch die pulsförmigen Ströme in den Statorwicklungen hervorgerufen. Das Frequenzspektrum dieser Pulse ist sehr breit und führt leicht zu Resonanzerscheinungen mit dem Stator Kern bzw. dem Gehäuse. Jede Verringerung der Vibrationen bewirkt aber auch wieder eine Verringerung des durchschnittlichen Drehmoments.⁸²

Zusätzlich erweist sich die Drehmomentwelligkeit als problematisch. Jeder Versuch diese durch konstruktive Maßnahmen zu verkleinern, führt unweigerlich zu einem geringeren durchschnittlichen Moment. Abhilfe schaffen können Kompensationsströme, oder die gleichzeitige Erregung von zwei Phasen, die als „Torque Sharing“ bezeichnet wird. Die Regelung der Maschine gestaltet sich aber generell aufgrund der magnetischen Nichtlinearitäten und der Struktur mit ausgeprägten Polen auf Stator und Rotor schwierig.

3.5.4 Zusammenfassung

Der geschaltete Reluktanzgenerator ist zwar prinzipiell als Generator für kleine Windturbinen geeignet, aber das starke Auftreten von Geräuschen und Vibrationen machen ihn für den Einsatz in Wohngebieten eher unbrauchbar. Auch der schlechtere Wirkungsgrad als der von permanentmagneterregten Generatoren und der

81 Vgl. Stölting H.D., Kallenbach E., *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*

82 Vgl. Rabinovici R., *Torque ripple, vibrations, and acoustic noise in switched reluctance motors*

Blindleistungsbedarf sind wesentliche Nachteile. Daher wurde der geschaltete Reluktanzgenerator beim Vergleich der Generatoren nicht näher betrachtet.

3.6 Klauenpolmaschine

Die Klauenpolmaschine ist eine Sonderform der Synchronmaschine mit ausgeprägten Polen. Sie wird weltweit als Lichtmaschine in Kraftfahrzeugen eingesetzt und daher in großer Stückzahl gefertigt. Die übliche Bauform besitzt Schleifringe, welche die Erregerenergie auf den Rotor transportieren. Attraktiver hinsichtlich der Lebensdauer ist allerdings die schleifringlose Ausführung mit einer fest stehende Erregerwicklung. Dies erfordert zwei zusätzliche Luftspalte, die wiederum den Erregerbedarf erhöhen. Dadurch sinkt das Leistungsgewicht.

Da die Klauenpolstruktur den Fluss in der Maschine dreidimensional führt, macht dies für die Berechnung der Maschine 3D-Berechnungsprogramme erforderlich. Dies verkompliziert Berechnungen und macht sie zeitintensiv.

Nachteilig wirken sich die großen Streuflüsse aus. Ungefähr ein Drittel des Flusses in der Maschine ist Streufluss zwischen den einzelnen Klauen, dem dann noch ein bedeutender Anteil an Aussenstreufluss und Streufeldern folgt.

Wird sie als Kleinmaschine gebaut, liegt die Materialausnutzung verglichen mit anderen Drehstrommaschinen bei nur 60-70%. Daraus ergeben sich dann hohe Wicklungswiderstände und ein schlechter Wirkungsgrad, der meist unter 60% liegt.

Als vorteilhaft erweisen sich, wenn gefordert, hohe mögliche Drehzahlen, die einfache Erregerwicklung mit wenig Kupferbedarf, geringe Material- und Fertigungskosten, eine hohe Lebensdauer, die Unempfindlichkeit gegen äußere Einflüsse und der einfache Betrieb in beide Drehrichtungen.⁸³

Da die Klauenpolmaschine in fast jedem Kraftfahrzeug als Generator dient, besitzt sie eine sehr gut etablierte Technologie und ist leicht und günstig zu beschaffen. Diese Standardmaschinen haben aber einen Drehzahlbereich von 5000–12500 U/min bei einer Ausgangsspannung von 0-28V.⁸⁴ Daher ist es entweder erforderlich ein Getriebe zu verwenden, oder die Ständerwicklung zu verändern. Beide Maßnahmen erhöhen die Kosten, wobei die Vor- und Nachteile eines Getriebes bereits in Kapitel 2.5 besprochen

⁸³ Vgl. Farschtschi A., *Elektromaschinen in Theorie und Praxis*

⁸⁴ Vgl. Walter J., Ceglia G., Guzman V., *Evaluation of an Automotive Alternator as a Power Generation Element for its Use on an Alternative Energy System*

wurden. Der geringe Wirkungsgrad und der ständige Bedarf an elektrischer Erregerenergie dieser Bauart erweisen sich als ohnehin uninteressant für eine Windturbine, mit einem möglichst hohen geforderten Gesamtsystemwirkungsgrad. Aus diesem Grund wurde auf eine nähere Untersuchung verzichtet.

4 Vergleich permanentmagneterregter Generatoren

4.1 Vergleich von Axial- und Radialflussmaschinen

4.1.1 Vergleich aus „PM Wind Generator Topologies“⁸⁵

Alle verglichenen Generatoren haben eine Phasenspannung von 220V und der Leistungsfaktor ist mit 0,9 festgelegt. Der Leistungsbereich beträgt 1-200kW, die Nenndrehzahl ist 100 U/min bis 50 kW und 50 U/min ab 50 kW. Beim Vergleich wird zwischen Inselsystem und Netzbetrieb unterschieden.

Üblicherweise liegt die Frequenz für direkt gekoppelte Generatoren in einem Bereich von 10-60Hz. Um die Drehzahl zu verringern, kann die Polpaarzahl erhöht werden. Dies erfordert aber einen größeren Maschinendurchmesser bzw. einen kleineren Polabstand. Ein größerer Maschinendurchmesser bedeutet mehr Materialbedarf und somit steigende Kosten. Ein Verringern des Polabstandes führt zu einem kleineren Nutabstand des Ankers. Werden die Ankerzähne zu eng platziert, führt das geringe Verhältnis von Nutbreite zu Nuttiefe zu einem geringen Nutfüllfaktor und damit zu erhöhten Streuverlusten. Zusätzlich wird das Wickeln einlagiger Wicklungen fast unmöglich und das von zweilagigen erschwert. Aus diesem Grund müssen die Polzahl und das Design der Maschine aufeinander abgestimmt werden.

Der Nutfüllfaktor für alle genutzten Maschinen bleibt für die Untersuchung nahezu konstant. Es gibt nur sehr kleine Veränderungen in den verschiedenen Leistungsklassen. Für die nutlosen Ausführungen werden allerdings andere Füllfaktoren gewählt. Die Isolationsdicke wird ebenfalls konstant gehalten. Alle Maschinen werden mit rechteckigem Leiterquerschnitt berechnet, auch wenn es sich um eine runde Ausführung handeln würde.

Für Axialflussmaschinen wird das Verhältnis zwischen Aussen- und Innendurchmesser mit 2,5 festgelegt. Die Zahn- und Jochflussdichten werden konstant auf ungefähr 1,5T gehalten. Die Dicke des Magnetmaterials wurde so gewählt, dass der Arbeitspunkt weit genug entfernt vom irreversiblen Teil der Kennlinie liegt, sodass auch plötzliche

85 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

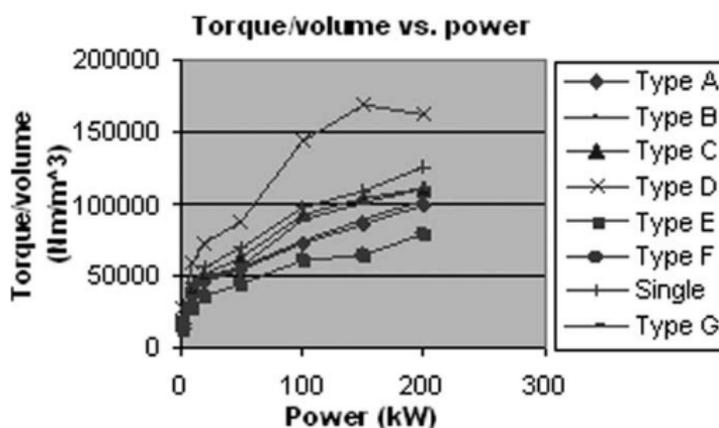
Kurzschlüsse nicht zu einer Entmagnetisierung führen. Der Luftspalt wird mit steigender Maschinenleistung aufgrund von mechanischen Erfordernissen vergrößert.

Alle Maschinendesigns sind hinsichtlich Drehmomentdichte und Wirkungsgrad optimiert und verwenden NdFeB Magnetmaterial.

Die Vergleiche wurden von den Autoren mit Hilfe der Finiten-Element-Methode berechnet. Um die Berechnungen zu überprüfen, wurden sie mit zwei realen Maschinen verglichen.⁸⁶

4.1.1.1 Drehmomentdichte

Die Drehmomentdichte ist anders als die Leistungsdichte unabhängig von der Wellendrehzahl. Diese Aussage ist bis zu einer Drehzahl gültig, die normalerweise von Windturbinen nicht überschritten wird. Als Drehmomentdichte wird das Verhältnis des Drehmoments, das ein Generator entwickelt, zum Volumen des aktiven Materials bezeichnet. Als aktives Material gelten die Magnete, das Kupfer, die Statorzähne und die Joche.



Legende:

Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine

Type B: Außenläufer Radialflussmaschine

Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator

Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor

Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung

Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung

Single: Einseitige Axialflussmaschine

Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 46: Drehmomentdichte für direkt angetriebene Generatoren

Die genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor (D) erreicht die höchste Drehmomentdichte. Am schlechtesten schneiden hier die Axialflussmaschinen mit Stator- oder Rotorbalancierung ab. Bei den Radialflussmaschinen ist die Aussenläufervariante der konventionellen Innenläuferbauweise überlegen. Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung liegt hinsichtlich der Drehmomentdichte unter den doppelseitigen und über den einseitigen Axialflussmaschinen und nähert sich damit dem Wert der Radialflussmaschinen.

⁸⁶ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

Die Drehmomentdichte von direkt angetriebenen Generatoren ist wesentlich besser als jene von Generatoren mit Getriebe und höherer Drehzahl.

Das Verhältnis von Drehmoment zu Gewicht ist für die einzelnen Maschinen sehr ähnlich der Drehmomentdichte.⁸⁷

4.1.1.2 Magnetgewicht

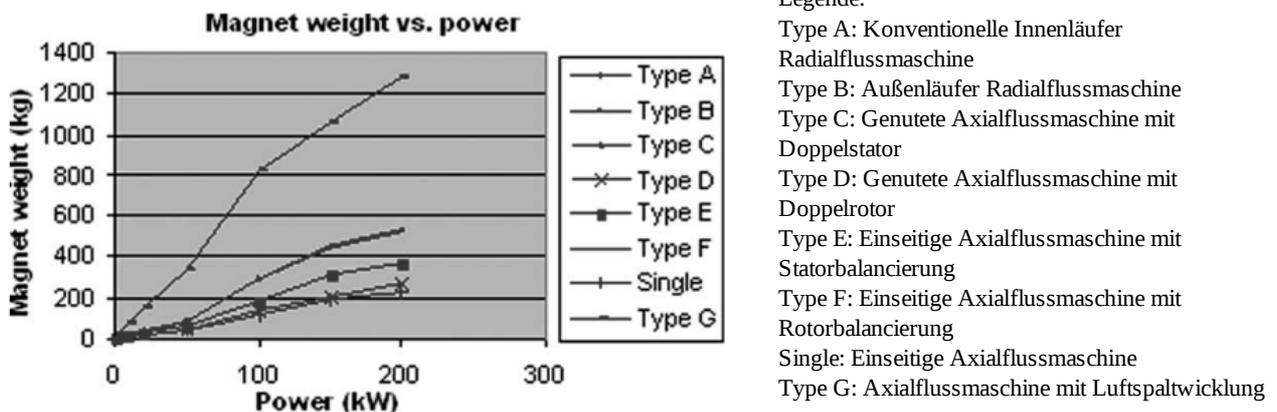


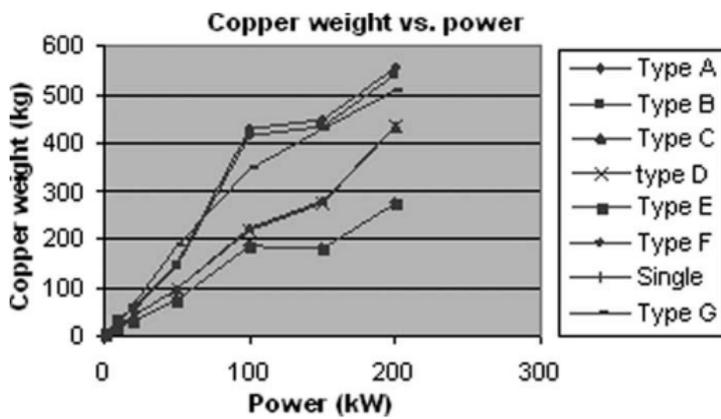
Abbildung 47: Magnetgewicht für direkt angetriebene Generatoren

Abbildung 47 zeigt den Bedarf an Magnetmaterial für Axial- und Radialflussmaschinen. Da die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung den größten Luftspalt besitzt, um die Statorwicklung unterzubringen, ist auch das meiste Magnetmaterial erforderlich. Generell benötigen Axialflussmaschinen weniger Magnetmaterial als Radialflussmaschinen, mit Ausnahme der Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung. Die beste Ausnutzung der Permanentmagnete wird mit doppelseitigen Axialflussmaschinen erreicht. Bei den Radialflussmaschinen ist die Aussenläufervariante besser als die konventionelle Innenläufermaschine.⁸⁸

⁸⁷ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

⁸⁸ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

4.1.1.3 Kupfergewicht

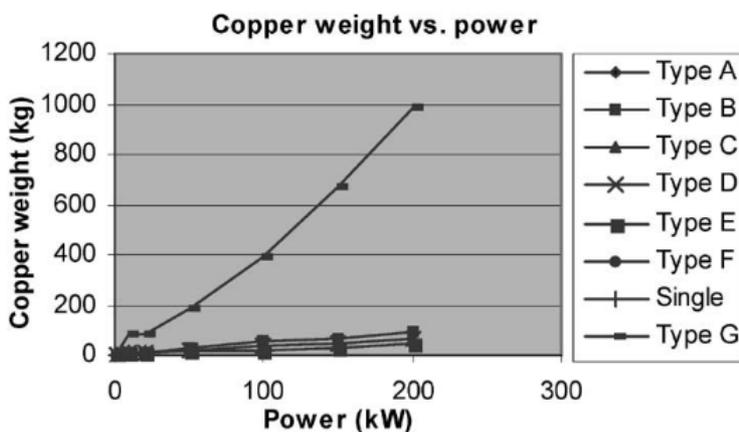


Legende:

- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 48: Kupfergewicht für direkt angetriebene Generatoren

Die größte Masse an Kupfer in Abbildung 48 benötigt die Innenläufer-Radialflussmaschine. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wickelköpfe einer Radialflussmaschine größer sind als bei der Axialflussmaschine. Den geringsten Kupferbedarf haben die einseitigen Axialflussmaschinen. Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung und der dadurch geringen Luftspaltflussdichte benötigt mehr Kupfer als die doppelseitigen genuteten Axialflussmaschinen.



Legende:

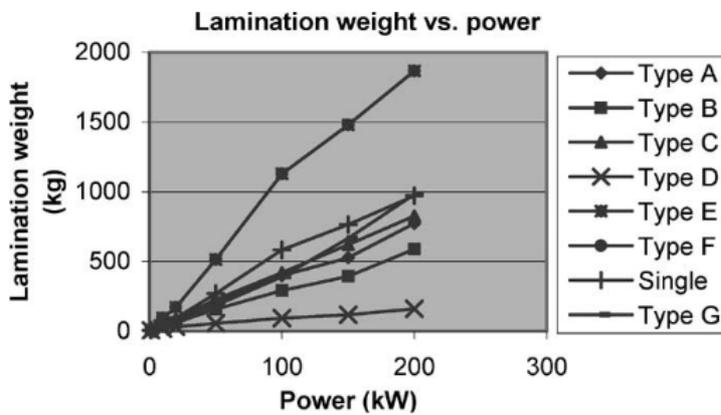
- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 49: Kupfergewicht für schnell laufende Generatoren mit Getriebe

In Abbildung 49 ist deutlich zu erkennen, dass bei höherer Drehzahl die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung bei weitem mehr Kupfer benötigt als alle anderen Typen. Bei geringen Polzahlen verlängern sich die magnetischen Wege in der Maschine und damit auch die Wickelköpfe. Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung ist daher

eher für langsam laufende, mehrpolige Anwendungen geeignet.⁸⁹

4.1.1.4 Blechgewicht



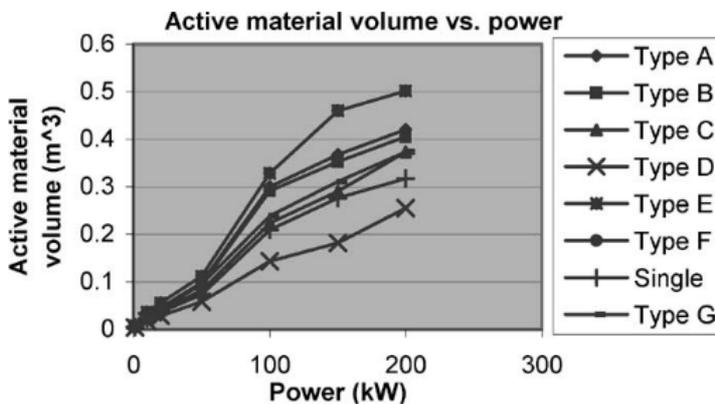
Legende:

- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 50: Blechgewicht für direkt angetriebene Generatoren

Einseitige Axialflussmaschinen benötigen am meisten, die Axialflussmaschinen mit Luftspaltwicklung hingegen durch die fehlenden Nuten am wenigsten Blech. Die Radialflussmaschinen haben ein höheres Blechgewicht als die doppelseitigen Axialflussmaschinen.⁹⁰

4.1.1.5 Aktives Material



Legende:

- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 51: Aktives Material für direkt angetriebene Generatoren

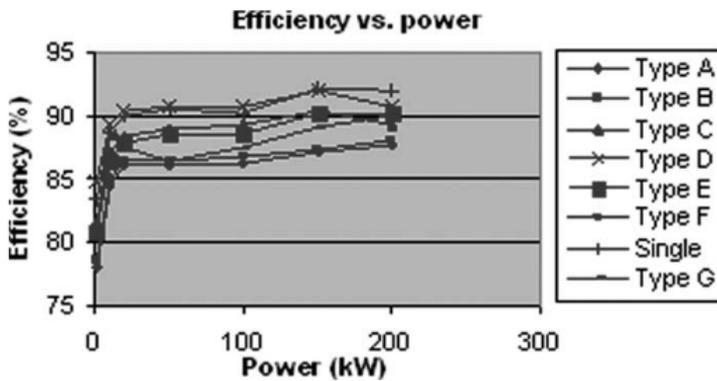
Die einseitigen Axialflussmaschinen verbrauchen das meiste, die genuteten Axialflussmaschinen mit Doppelrotor am wenigsten aktives Material. Bei letzteren erfüllt das rückseitige Statorjoch lediglich mechanische Zwecke und kann daher sehr dünn sein. Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung verwendet nahezu gleich viel Material wie die

⁸⁹ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

⁹⁰ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

Axialflussmaschine mit Doppelstator, allerdings weniger als die Radialflussmaschinen.⁹¹

4.1.1.6 Wirkungsgrad

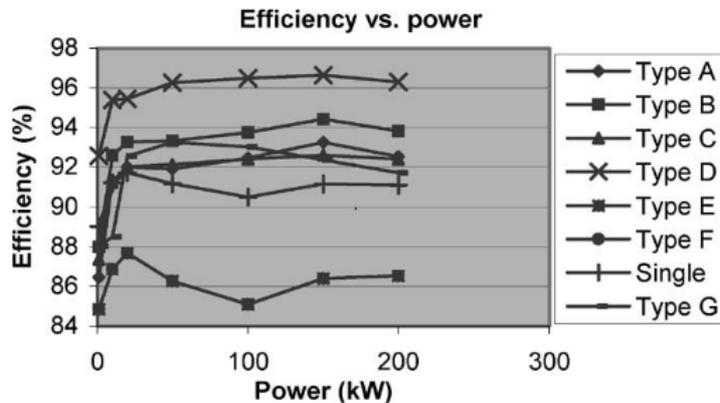


Legende:

- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 52: Wirkungsgrad für direkt angetriebene Generatoren

Die genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor hat aufgrund der geringen Eisenverluste die höchste Effizienz. Radialflussmaschinen schneiden hier am schlechtesten ab. Es ist auch eine generelle Effizienzsteigerung mit zunehmender Leistung festzustellen.



Legende:

- Type A: Konventionelle Innenläufer Radialflussmaschine
- Type B: Außenläufer Radialflussmaschine
- Type C: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
- Type D: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- Type E: Einseitige Axialflussmaschine mit Statorbalancierung
- Type F: Einseitige Axialflussmaschine mit Rotorbalancierung
- Single: Einseitige Axialflussmaschine
- Type G: Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Abbildung 53: Wirkungsgrad für schnell laufende Generatoren mit Getriebe

Wird ein Getriebe verwendet und damit die Drehzahl erhöht, sinkt der Wirkungsgrad der einseitigen Axialflussmaschinen. Dies begründet sich durch die Verringerung der Polzahl und die Vergrößerung der axialen Länge.⁹²

91 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

92 Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

4.1.1.7 Zusammenfassung

Genutete Axialflussmaschinen haben bei gegebener Leistung ein kleines Volumen und damit sehr hohe Leistungsdichten. Zweiseitige Ausführungen sind besser als einseitige, jedoch haben einseitige geringere Kupferverluste und sind einfacher in der Konstruktion.

Bei Radialflussmaschinen ist speziell für Windenergieanwendungen ein Aussenläufer aufgrund der einfacheren Montage der Rotorblätter und der besseren Kühlung vorzuziehen.

Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung ist eher für kleine Leistungsbereiche geeignet. Um die Spulen unterzubringen, ist ein größerer Luftspalt erforderlich, das Gewicht der Magnete erhöht sich. Mit steigender Nennleistung nehmen der Luftspalt und die Luftspaltreluktanz zu.⁹³

4.2 Drehmomentdichte und Kosten/Drehmoment

4.2.1 Vergleich anhand von Prototypen

In diesem Abschnitt werden 60 verschiedene Maschinenprototypen von unterschiedlichen Autoren hinsichtlich ihrer Drehmomentdichte und der Kosten/Drehmoment untersucht. Bei der Untersuchung wurde nur das aktive Material berücksichtigt.

Eine analytische Herleitung der Drehmomentdichte und des aktiven Materials ist für alle Maschinentopologien möglich, aber durchaus schwierig. Um das thermische Verhalten zu berücksichtigen, müssen auch magnetisch inaktive Maschinenteile in die Untersuchung einbezogen werden. Diese sind jedoch wieder stark von der Bauform bzw. der Anwendung abhängig. In diesem Vergleich wird daher auf Literatur zurückgegriffen, in der das Verhalten von Prototypen beschrieben wird.

4.2.1.1 Drehmomentdichte

Die Leistungsdichte ist abhängig von der Drehzahl, aus diesem Grund wird die Drehmomentdichte untersucht. Sie ist bis zu einer Drehzahl, die von direkt angetriebenen Windturbinen normal nicht überschritten wird, drehzahlunabhängig.

4.2.1.2 Kosten/Drehmoment

- Nur aktives Material wird berücksichtigt, Herstellungskosten und inaktives Material nicht

⁹³ Vgl. Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*

- Eisen, Kupfer und Ferritmagnete haben Kosten von 6 ECU/kg (european currency unit)
- Seltene-Erden-Magnete haben Kosten von 40 ECU/kg.⁹⁴

4.2.1.3 Vergleich Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Axialflussmaschine mit Toruswicklung

In Abbildung 54 ist zu erkennen, dass die Axialflussmaschine mit Toruswicklung in der Lage ist, ca. doppelt so hohe Drehmomentdichten zu erzielen wie die Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten.

Dem gegenüber stehen teilweise erhöhte Kosten (siehe Abbildung 55) für die Axialflussmaschine. Die Luftspaltwicklung macht ein größeres Permanentmagnetvolumen erforderlich.⁹⁵

Die Kosten vergrößern sich bei einem größeren Maschinendurchmesser, weil die Geometrie der Axialflussmaschine aus konstruktiven Gründen einen größeren Luftspalt erforderlich macht. Das ist der Grund, weshalb dieser Maschinentyp eher für kleine Leistungen gebaut wird, bzw. mehrere Maschinen auf einer Welle hintereinander angeordnet werden.

4.2.1.4 Vergleich Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Transversalflussmaschine

Die Transversalflussmaschine ist in der Lage höhere Drehmomentdichten zu erreichen als die Radialfluss- und Axialflussmaschine. Die Kosten für das aktive Material liegen jedoch deutlich unter denen für die anderen beiden Bauweisen.⁹⁶

Bei der Transversalflussmaschine sind der Aufwand für die Konstruktion und die inaktiven Teile ein erheblicher Kostenfaktor und hier nicht berücksichtigt.

94 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

95 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

96 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

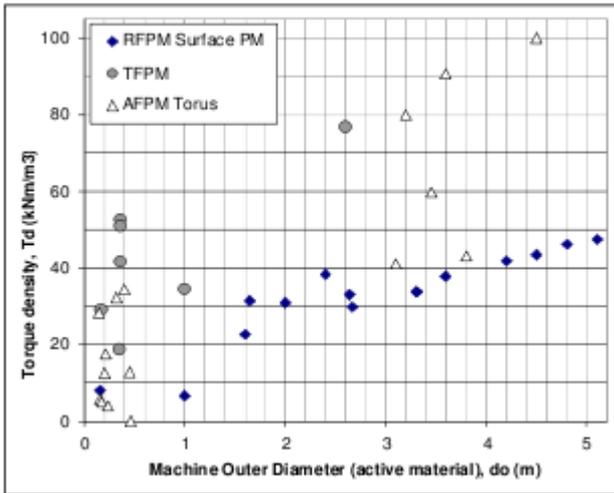


Abbildung 54: Drehmomentdichte für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung)

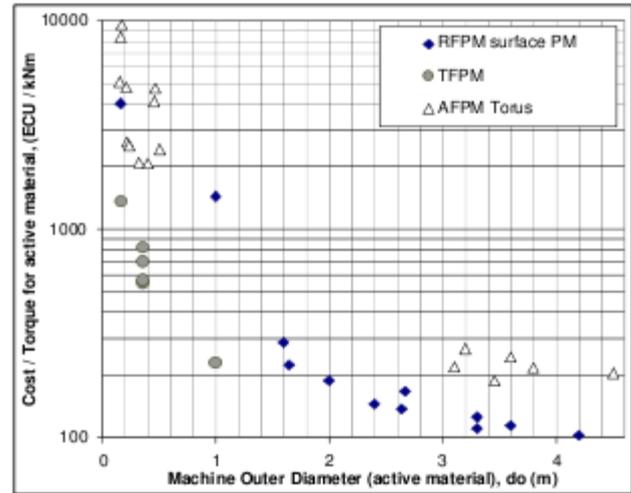


Abbildung 55: Kosten/Drehmoment für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung)

4.2.1.5 Vergleich permanentmagneterregte Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten mit Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten (Flusskonzentration)

Abbildung 56 zeigt, dass die Verwendung von vergrabenen Ferritmagneten keinen wesentlichen Vorteil gegenüber oberflächenbefestigten Seltene-Erden-Magneten bringt. Wie in Abbildung 57 gezeigt, liegen die Kosten für die Flusskonzentration der günstigeren Ferritmagnete gleich oder sogar leicht höher als bei der Verwendung der teureren Seltene-Erden-Magnete ohne Flusskonzentration.

Sollten die Preise für Seltene-Erden-Magnete sinken rechnet sich die Flusskonzentration nicht mehr.⁹⁷

4.2.1.6 Geschaltete Reluktanzmaschine (switched reluctance machine)

In Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigt die geschaltete Reluktanzmaschine für kleinere Maschinendurchmesser ein ähnliches Verhalten bezüglich Drehmomentdichte und Kosten/Drehmoment wie die Radialflussmaschine. Bei einem Maschinendurchmesser von 4.2m wird die höhere Drehmomentdichte mit dem Nachteil einer großen Rotormasse und damit Mehrkosten erreicht.⁹⁸

97 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

98 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

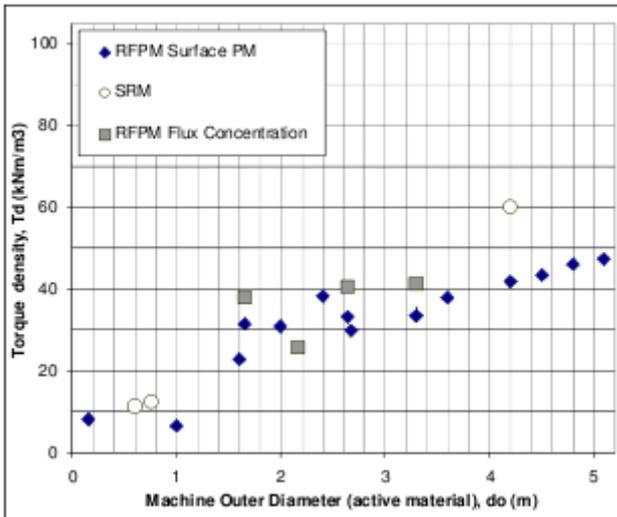


Abbildung 56: Drehmomentdichte für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten

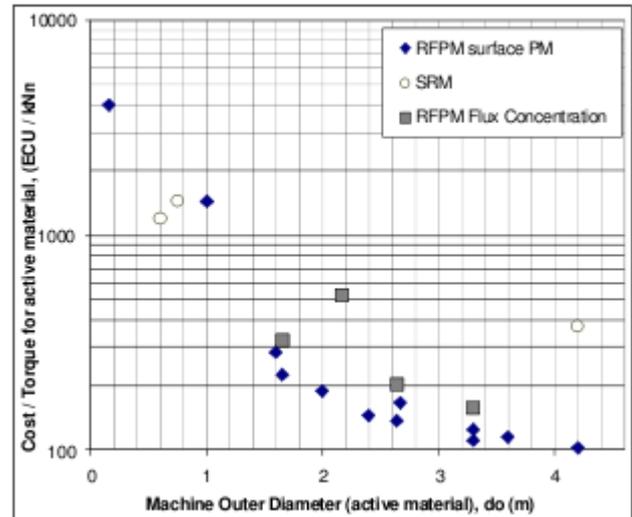


Abbildung 57: Kosten/Drehmoment für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten

4.2.1.7 Axialflussmaschine mit vergrabenen Magneten

Es wurde in der Literatur nur ein Prototyp dieser Maschine gefunden. Aufgrund der Verwendung von Zähnen wird weniger Magnetmaterial benötigt als bei der Toruswicklung. In Tabelle 2 wird dieser Prototyp mit anderen Modellen verglichen. Zusammen mit der Transversalfeldmaschine mit einseitig oberflächenbefestigten Magneten zeigt er eine bessere Leistung als die Radialfluss- und Axialflussmaschine mit Toruswicklung.⁹⁹

4.2.1.8 Transverse Vernier Individual Hybrid Reluctance Machine

Auch hier wurde nur ein optimierter Prototyp gefunden. Die Drehmomentdichte, wie in Tabelle 3 aufgelistet, liegt unterhalb der von der Axialflussmaschine mit Toruswicklung und der Transversalfeldmaschine mit doppelseitiger Flusskonzentration. Bei den Kosten/Drehmoment liegt sie zwischen diesen beiden Maschinentypen.¹⁰⁰

99 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

100 Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*

Topology	Diameter	Torque density	Approximate cost/Torque
	(m)	(kNm/m ³)	(ECU/kNm)
AFIPM	0,17	26,1	1663
TFPM SSSM	0,17	28,9	1360
RFPM surface magnets	0,16	11,5	4021
"Torus" 1-stage	0,21	12,4	4777

Tabelle 2: Vergleich von Axialflussmaschine mit vergrabenen Magneten, Transversalflussmaschine mit einseitigen oberflächenbefestigten Magneten (Single-Sided Surface Magnets), Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung

Topology	Diameter	Torque density	Approximate cost/Torque
	(m)	(kNm/m ³)	(ECU/kNm)
TVIHRM	0,40	9,1	1565
AFPM Torus - 1 stage	0,40	34,4	2063
TFPM DSFC	0,36	50,9	566

Tabelle 3: Vergleich von Transverse Vernier Individual Hybrid Reluctance Machine, Axialflussmaschine mit Toruswicklung und Transversalflussmaschine mit doppelseitiger Flusskonzentration

4.2.2 Vergleich mit Hilfe eines Computermodells¹⁰¹

Genutete Axial- und Radialflussmaschinen werden bezüglich Kosten/Drehmoment und Drehmoment/Volumen untersucht und optimiert.

Mit einem Computermodell werden 4320 verschiedene Designs von genuteten Axialflussmaschinen berechnet. Maschinendurchmesser von 1 - 5 Meter werden näher untersucht. Kupfer-, Stahl- und Permanentmagnetmassen werden für jedes Design berechnet und mit den spezifischen Kosten multipliziert.

Die Kosten für das Material wurden folgendermaßen angesetzt:

Stahl und Kupfer: 6 €/kg

Permanentmagnete NdFeB: 40 €/kg

Diese Kosten berücksichtigen das verwendete aktive Material und einige Fertigungskosten. Sie sind allerdings nur Näherungswerte.

Die axiale Länge der Radialflussmaschine wird so berechnet, dass das Drehmoment der optimierten Axialflussmaschine erreicht wird. Danach erfolgt eine Berechnung dieser Maschine für 432 Designs.

Sättigungseffekte werden durch den Ausschluss aller Designs, die eine Flussdichte in den Zähnen größer als 1,9 T aufweisen, berücksichtigt. Der Luftspalt bei den Axialflussmaschinen wird mit 0,1% des Außendurchmessers angesetzt und vergrößert sich daher mit zunehmendem Durchmesser.

¹⁰¹ Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines*

Für alle Maschinendurchmesser von 1 – 5 Meter zeigt die Radialflussmaschine 9-12% geringere Kosten/Drehmoment als die genutete Axialflussmaschine.

Axialflussmaschinen können ein 4,3 fach höheres Drehmoment/Volumen Verhältnis erreichen, allerdings sind dann auch die Kosten um 80% höher.

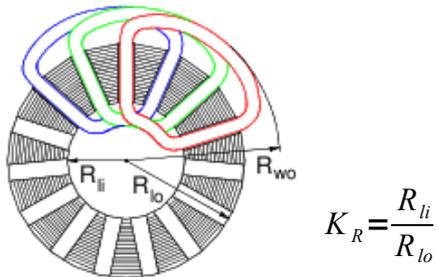


Abbildung 58: Nuten einer Axialflussmaschine mit R_{ii} :innerer Radius und R_{lo} :äußerer Radius

Für alle Durchmesser der Axialflussmaschine werden die geringsten Kosten/Drehmoment für ein $K_R \sim 0,88$ und das beste Drehmoment/Volumen für ein $K_R \sim 0,66$ erreicht. Je näher K_R an 1 herankommt, desto geringer werden die Kosten/Drehmoment. Je größer K_R wird, desto kürzer werden die Leiter in den Nuten und die relative Länge in den Wickelköpfen nimmt zu. Da das Leitermaterial in den Wickelköpfen aber nicht zur Drehmomentbildung beiträgt, sinkt dadurch der Wirkungsgrad. Ein guter Kompromiss zwischen Kosten und Wirkungsgrad wird für ein K_R zwischen 0,75 und 0,8 erreicht. Werden die Maschinen auch hinsichtlich des Wirkungsgrades optimiert ($K_R = 0,78$), kann die Radialflussmaschine 22% geringere Kosten/Drehmoment erreichen, unabhängig vom Durchmesser.

Genutete Axialflussmaschinen können 2-5 mal mehr Drehmoment/Volumen erzeugen als Radialflussmaschinen. Der Hauptunterschied liegt also in der axialen Länge. Da bei direkt angetriebenen Generatoren die Kostenminimierung weitaus bedeutender ist als die axiale Länge, ist die Radialflussmaschine der genuteten Axialflussmaschine vorzuziehen.¹⁰²

¹⁰² Vgl. Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines*

D _{out}	T _{nom}	Cost/ Torque	Torque density	Eff.
(m)	(kNm)	Euro/ kNm	kNm/m ³	(%)
1.0	2.0	551	33	90.0
1.5	9.7	354	53	91.8
2.0	31.2	260	73	92.8
2.5	66.0	206	95	93.6
3.0	116	168	113	94.3
3.5	189	146	135	94.6
4.0	260	127	147	94.6
5.0	516	105	187	94.5

Tabelle 4: Designs der Axialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment

D _{out}	T _{nom}	Cost/ Torque	Torque density	Eff
(m)	(kNm)	Euro/ kNm	kNm/m ³	(%)
1.0	2.0	434	16	90.0
1.5	9.8	280	24	91.3
2.0	31.2	201	32	92.7
2.5	65.9	158	37	93.3
3.0	116.2	130	41	94.3
3.5	188.8	111	44	94.6
4.0	259.8	99	45	94.9
5.0	515.4	81	48	94.7

Tabelle 5: Designs der Radialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment

Tabelle 4 und Tabelle 5 verdeutlichen den Vorteil größerer Maschinen. Alle drei Faktoren, Kosten/Drehmoment, Drehmomentdichte und Wirkungsgrad verbessern sich mit zunehmenden Durchmessern und größerer Leistung.

4.3 Zusammenfassung

In Tabelle 6 sind die Eigenschaften der Maschinen hinsichtlich der Verwendung in einer Windturbine kleiner Leistung bewertet. Wurde zur Eigenschaft der Maschine keine Untersuchung durchgeführt, oder waren keine näheren Informationen dazu zu finden, weist die Liste Lücken auf. Die Bewertung ist teilweise subjektiv und beruht auf der Erfahrung, die während dieser Arbeit gewonnen wurde.

Übersicht der Generatoreigenschaften für eine Windturbine kleiner Leistung										
		Konstruktionsaufwand	Zuverlässigkeit/Wartungsaufwand	Wirkungsgrad	Bremsen ohne Hilfsenergie	Kosten	Kühlung der Permanentmagnete	Verhältnis Drehmoment/Volumen	Geräusche/Vibrationen	Drehmomentwelligkeit
Asynchronmaschine	Radialfluss	Käfigläufer	+	-	-	+	-	-	-	-
		Schleifringläufer	~	-	-	~	-	-	-	-
Synchronmaschine permanentmagneterregt	Radialfluss	Innenläufer	+	+	+	+	-	-	-	-
		Außenläufer	+	+	+	++	+	~	+	-
		E-Kern	~	+	-	+	~	~	+	-
	Axialfluss	genutzt mit Doppelstator	~	+		+	+	~	+	-
		genutzt mit Doppelrotor	~	+	++	+	+	+	+	-
		genutzt mit Statorbalancierung	~	+		+	~	~	+	-
Hybrid permanentmagneterregt	Transversalfluss	genutzt mit Rotorbalancierung	~	+	+	~	+	+	+	-
		Luftspaltwicklung	+	+	++	+	+	+	+	-
		Klauenpolmaschine	-	+	~	+	-	+	++	-
Synchronmaschine elektrisch erregt	Klauenpolmaschine	Reluktanzmaschine	+	+	+	+	-	-	-	-
		Synchronmaschine mit Doppelstator	-	~	~	-	-	-	-	-
geschalteter Reluktanzgenerator	geschalteter Reluktanzgenerator	Standard	-	-	-	~	-	-	-	-
		Klauenpolmaschine	+	~	-	+	+	~	+	-

Tabelle 6: Übersicht der Generatoreigenschaften für eine Windturbine kleiner Leistung

Aus Tabelle 6 ergeben sich drei Generatoren, die für diese Anwendung besonders geeignet erscheinen. Diese sind:

- die Aussenläufer-Radialflussmaschine
- die genutete Axialflussmaschine mit Doppelrotor
- die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung.

In der Literatur wird der Aufwand zur Herstellung eines geblechten Stators für eine genutete Axialflussmaschine teilweise als nicht unerheblich beschrieben. Daher wurden alle genuteten Axialflussmaschinen beim Konstruktionsaufwand nicht mit einem Plus bewertet, obwohl der prinzipielle Aufbau recht einfach ist.

Die permanentmagneterregte Aussenläufer-Radialflussmaschine mit oberflächenbefestigten Magneten ist der Standardgenerator für kleine Windkraftwerke. Es handelt sich um eine etablierte Technologie, die beispielsweise auch in Fahrradnabenmotoren eingesetzt wird, und daher auch in größeren Stückzahlen bereits am Markt vorhanden ist. Diese Tatsache verschafft einen zusätzlichen Kostenvorteil.

Die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung hat sich in der Gegenüberstellung als der geeignetste Generator dargestellt. Die sehr simple Konstruktion macht sie auch zum Favoriten vieler Hobbybastler. Es lassen sich sehr hohe Wirkungsgrade, hohe Spannungsqualitäten, rastmomentfreier Anlauf, geräuschloser und vibrationsfreier Betrieb ohne viel Aufwand erreichen. Nachteilig, aber für die hier betrachtete Anwendung irrelevant ist die Tatsache, dass der Generator nur für kleine Leistungen geeignet ist.

5 Elektrische Bremsung

Um eine kleine Windturbine auch bei starkem Wind sicher zu betreiben ist eine Bremsung erforderlich. Ohne regelnde Eingriffe in das System kann sich die Drehzahl stark erhöhen und die in der Trägheitsmasse gespeicherte Energie wird sehr groß. Dies kann zur Beschädigung oder zur Zerstörung der Windturbine führen. Um dem entgegenzuwirken, ist eine Bremsung vorzusehen.

Am Ende des Ladevorganges eines Akkumulators muss dieser bei vollem Ladezustand vom Generator getrennt werden. Dieser Lastabwurf kann zu einer starken Erhöhung der Drehzahl führen und damit zu einer Verminderung der Lebensdauer und erhöhtem Wartungsaufwand. Lastwiderstände, die die Leistung des Generators dann in Wärme

umsetzen, sind ein möglicher Schutzmechanismus.¹⁰³

Weitere Gründe für die Notwendigkeit eines zuverlässigen Bremssystems sind mögliche Notabschaltungen, beispielsweise bei einer Turbinenbeschädigung, oder um Wartungsarbeiten sicher durchführen zu können. Auch die Forderung von Anlageanrainern, die Windturbine während bestimmter Zeiten stillzulegen, um deren Belästigung durch mögliche Betriebsgeräusche zu verringern, kann ein einfach zu bedienendes Bremssystem erforderlich machen.

Mögliche Bremsverfahren für Windturbinen können in drei Methoden unterteilt werden:

- aerodynamische Bremsung
 - Blattwinkelverstellung
 - Strömungsabriss
 - Windnachführung
- mechanische Bremsung
- elektrische Bremsung.

Aus Sicherheitsgründen können auch mehrere dieser Methoden kombiniert werden.¹⁰⁴

Als Nachteile der mechanischen Bremsung sind erhöhte Kosten und eine Gewichtszunahme zu nennen. Die komplexere mechanische Konstruktion verringert auch die Zuverlässigkeit und trägt zu einem vermehrten Wartungsaufwand bei.

Die Methoden Blattwinkelverstellung, Windnachführung und Strömungsabriss, letzterer wird auch bei der elektrischen Bremsung mit genutzt, wurden bereits im Kapitel 2.3 besprochen.

5.1 Kurzschlussbremsung

Ein permanenterregter Windgenerator kann elektrisch gebremst werden, indem alle drei Phasen kurzgeschlossen werden. Durch den Kurzschluss verringert sich die Drehzahl auf nahezu 0 U/min und damit auch der aerodynamische Wirkungsgrad. Aufgrund der nun kleinen, vom Wind zugeführten Leistung ist dieser Betriebszustand, auch bei hohen Windgeschwindigkeiten, auf Dauer sicher. Nach der Bremsung wird im Generator nur

¹⁰³ Vgl. Fredericks A.F., de Vries I.D., *Design of an auto-braking regulator for a small wind generator*

¹⁰⁴ Vgl. Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*

wenig Leistung umgesetzt, daher ist seine Erwärmung nur gering.

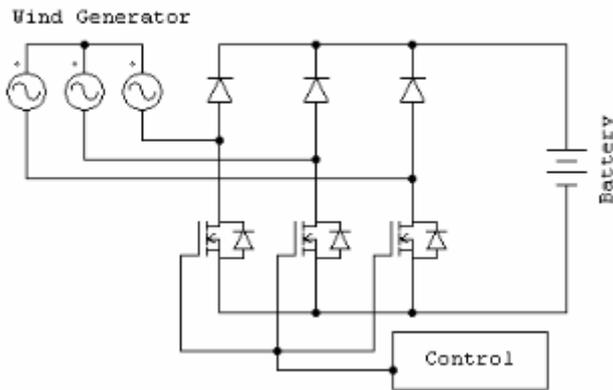


Abbildung 59: dreiphasiger Gleichrichter mit Bremsfunktion

Im dreiphasigen Gleichrichter in Abbildung 59 wurden die unteren Dioden gegen MOSFETs ausgetauscht. Werden alle MOSFETs gleichzeitig eingeschaltet, führt dies zu einem Phasenwiderstand von nur $10\text{ m}\Omega$, was einem Kurzschluss gleichkommt. Hat der Generator im Moment des Kurzschlusses eine hohe Drehzahl, könnte er durch die hohen bremsenden Kräfte beschädigt werden. Daher wird der Kurzschluss langsam eingeleitet. In einer Zeitspanne von 4-5 Sekunden wird der Phasenwiderstand langsam bis zum Kurzschluss abgesenkt. Die in der rotierenden Masse gespeicherte kinetische Energie wird in den MOSFETs in Wärme umgesetzt. Daher müssen diese entsprechende Kühlkörper besitzen. Im kurzgeschlossenen, abgebremsten Zustand ist die Drehzahl des Generators sehr gering und damit auch seine Leistung. Diese wird nun in seinen Wicklungen, die einen sehr viel höheren Widerstand als die MOSFETs besitzen, in Wärme umgesetzt.

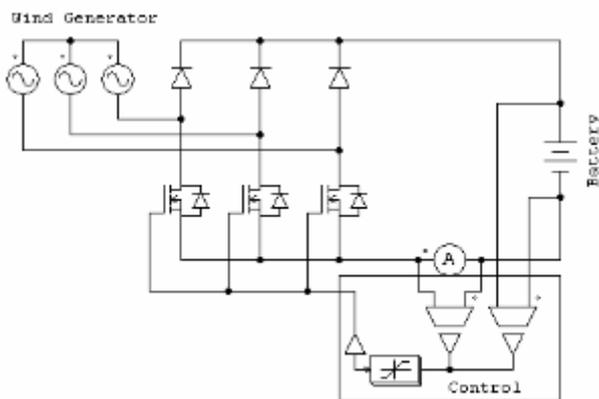


Abbildung 60: dreiphasiger Gleichrichter mit automatischer Bremsfunktion

Der in Abbildung 60 gezeigte Gleichrichter wurde durch einen Ladestrom und eine Spannungsmessung an der Batterie erweitert. Hat die Batterie ihre Ladeschlussspannung erreicht, wird der Generator mit demselben Mechanismus wie bei zu hohen Windgeschwindigkeiten langsam abgebremst und dann kurzgeschlossen. Erst wenn die Batteriespannung, die durch eine Hysterese vorgegebene Spannung unterschreitet, wird der Kurzschluss aufgehoben und der Betrieb fortgesetzt. Zu hohe Windgeschwindigkeiten, die einen Überlastungszustand für den Generator darstellen würden, werden mit Hilfe des Ladestromes erkannt, um den Bremsvorgang einzuleiten. Befindet sich der Generator aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeiten im Kurzschluss, so ist der Strom durch einen MOSFET ein Maß für die Windgeschwindigkeit. Lässt der Wind nach, sinkt der Strom durch den MOSFET und der Kurzschluss kann wieder aufgehoben werden.¹⁰⁵

5.2 Bremsen mit NTC Widerständen

NTC Widerstände haben im kalten Zustand einen Widerstandswert von einigen Ohm. Werden sie von Strom durchflossen, erwärmen sie sich aufgrund der ohmschen Verluste und der Widerstandswert sinkt. Durch diesen Effekt wird der Generator langsam abgebremst und erst bei geringeren Drehzahlen kurzgeschlossen. Kühlt der NTC Widerstand ab, erhöht sich sein Widerstandswert wieder. Laut den Autoren des Papers [106] kann dieser Vorgang allerdings nur bis zu 700 mal wiederholt werden.¹⁰⁷ Die Firma EPCOS gibt für ihre NTC Widerstände an, dass diese nach 1000 Zyklen mit maximalem Strom keine erkennbaren Beschädigungen und eine Abweichung des Widerstandes von weniger als 10% aufweisen.¹⁰⁸

Ein Vorteil gegenüber einem direkten Kurzschluss oder einem konstanten Bremswiderstand ist, dass die maximal auftretenden Ströme im Generator während des Bremsvorganges kleiner sind. Weiters sinkt die mechanische Belastung der Rotorblätter, da diese nicht abrupt abgebremst werden. Dem NTC Widerstand muss aber nach einem Bremsvorgang genügend Zeit gegeben werden, um sich ausreichend abzukühlen und seinen ursprünglichen Widerstandswert wieder zu erreichen.

Das untersuchte System besteht aus Lastwiderstand, Diodengleichrichter, Akku und Wechselrichter. Ist der Akku entladen und die Anfangswindgeschwindigkeit überschritten,

105 Vgl. Fredericks A.F., de Vries I.D., *Design of an auto-braking regulator for a small wind generator*

106 Vgl. Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*

107 Vgl. Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*

108 http://www.epcos.com/inf/50/db/icl_09/ICL_B57237_S237.pdf 24.07.2010

beginnt der Ladevorgang. Ab einem bestimmten Ladezustand wird der Wechselrichter aktiv. Bei voll geladenem Akku schützt der Lastwiderstand den Akku vor einer Überladung.

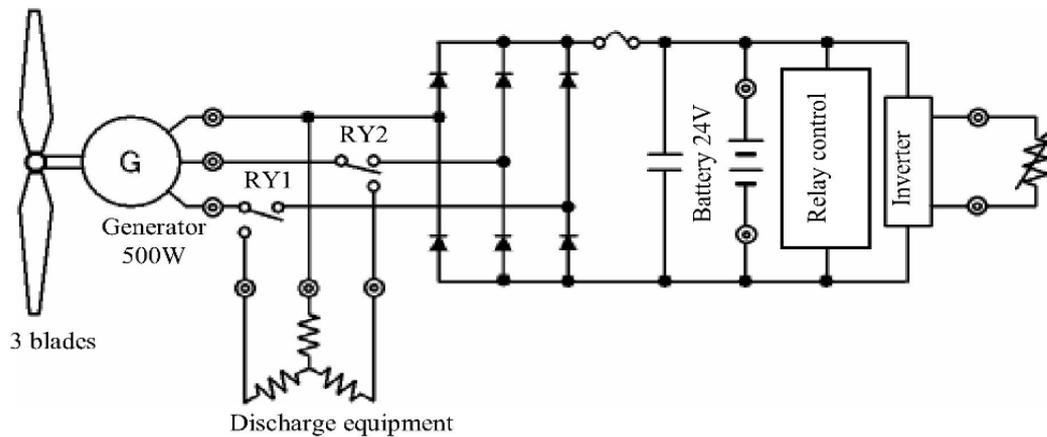


Abbildung 61: System einer Mikrowindturbine

Bis zu einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s wird „furling“ zur Leistungsbegrenzung eingesetzt. Darüber wird der Generator mit dem Lastwiderstand kurzgeschlossen und abgebremst. Dieser Lastwiderstand wird nun durch NTC-Widerstände ersetzt.

In dem im Paper [109] beschriebenen Versuch wird ein Synchrongenerator, an dem ein Reifen montiert ist, der die Trägheitsmasse der Rotorblätter besitzt, mit einer Asynchronmaschine auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt und anschließend abgebremst. Der NTC 10R8A wurde nur bis zu einer Drehzahl von 300 U/min vermessen, da der maximale Strom von 8 A sonst überschritten worden wäre.¹¹⁰

109 Vgl. Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*

110 Vgl. Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*

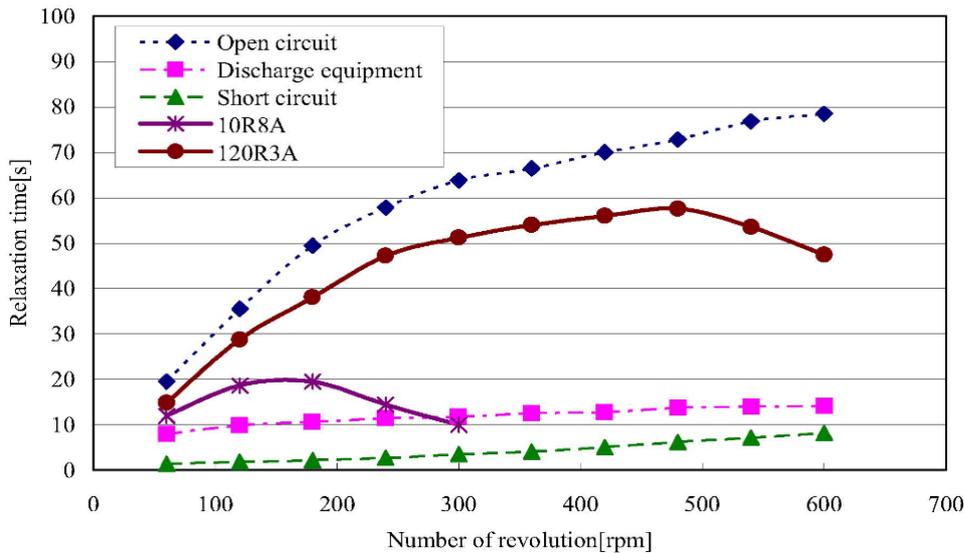
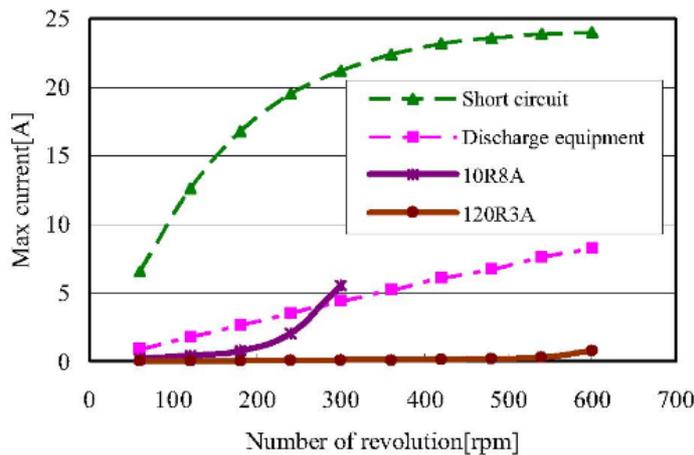


Abbildung 62: Zeitkonstanten für den Bremsvorgang mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen



Model	10R8A	120R3A
Max current [A]	8	3
Resistance [Ω] at 25°C	10	120
Resistance [Ω] at Max current	0.01	0.90
Diameter [mm]	22	22

Tabelle 7: Daten der NTC Widerstände

Abbildung 63: Maximalströme während des Bremsvorganges mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen

In dem Versuch wurden die aerodynamischen Eigenschaften der Windturbine nicht berücksichtigt. Es wurde dem System keine drehzahlabhängige Leistung während des Bremsvorganges zugeführt. In Abbildung 63 ist anhand des NTC-Widerstandes 10R8A zu erkennen, dass der Widerstandswert und damit der Strom in der Nähe des Nennstromes nichtlinear sind. Dadurch wird die Windturbine sogar stärker abgebremst als mit dem konstanten Bremswiderstand. Wird der Widerstandswert des NTC höher gewählt, wie es beim 120R3A der Fall ist, ergibt sich auch ein geringerer Unterschied zwischen frei auslaufendem und mit NTC gebremstem System. Führt der Wind jetzt noch zusätzlich Energie zu, könnte der Abbremsvorgang erst bei unzulässig hohen Drehzahlen eingeleitet

werden. Die Auswahl des richtigen Kaltwiderstandes und der Charakteristik bei Erwärmung sind entscheidend, wenn die Vorteile der Bremsung mit einem NTC genutzt werden sollen. Zu bedenken ist auch, dass sich die Eigenschaften mit der Alterung verändern können.

6 Gleichrichter

6.1.1 Gleichrichter für Generatoren mit Permanentmagneten

Wird ein permanentmagneterregter Synchrongenerator mit variabler Drehzahl betrieben, so wird seine Ausgangsspannung eine variable Frequenz und Amplitude aufweisen. Die Ausgangsspannung kann in dieser Form weder zum Laden eines Akkus, noch zur Netzeinspeisung verwendet werden. Daher muss sie zuerst gleichgerichtet werden, um dann einen Akku mit Gleichstrom zu laden, oder einen Wechselrichter zu versorgen. Die Verwendung eines Wechselrichters mit Gleichspannungs- oder Stromzwischenkreis entkoppelt den Generator vom Netz. Der Wechselrichter ermöglicht die Regelung von Ausgangsspannung und Blindleistung. Er ermöglicht auch den Startvorgang ohne die bei Synchrongeneratoren sonst notwendigen Start- und Synchronisierereinrichtungen. Das System kann durch ihn netzseitig bei nahezu beliebigen Leistungsfaktoren betrieben werden, ohne asynchron zu laufen.¹¹¹

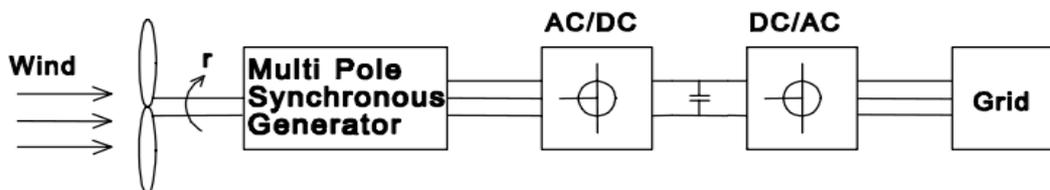


Abbildung 64: Typische Anordnung eines Permanentmagnetgenerators mit variabler Drehzahl und Netzeinspeisung

6.1.1.1 Diodengleichrichter

Synchronmaschinen können direkt mit einem einfachen Diodengleichrichter verbunden werden. Es wird keine Elektronik zur Ansteuerung benötigt und die Bauteilkosten sind gering. Ein Diodengleichrichter verursacht allerdings Oberschwingungen in den Phasenströmen und er kann keine Blindleistung an die Maschine liefern. Die maximale elektrische Ausgangsleistung des Generators ist mit einem Diodengleichrichter geringer

¹¹¹ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

als bei einer direkten Netzkopplung. Die Ausgangsspannung der Maschine nimmt mit steigender Last ab. Sind die gesamten elektromagnetischen Verluste in der Maschine für unterschiedliche Belastungszustände konstant, kann die Maschine mit einem Diodengleichrichter laut Aussage der Autoren nur 81% der Leistung liefern, die sie an eine rein ohmsche Last liefern könnte. Die ohmschen Verluste des Stators und die Wirbelstromverluste des Rotors sind bei Verwendung eines Diodengleichrichters hoch.¹¹²

Die Oberschwingungen verursachen außer Verlusten noch, relativ zum quadratischen Mittelwert gesehen, hohe Spitzenströme. Diese Stromspitzen vergrößern die Gefahr einer Entmagnetisierung der Permanentmagnete bei einer kleinen Belastung der Maschine.¹¹³

6.1.1.2 Gleichrichter mit MOSFETs

Üblicherweise werden in ungesteuerten Gleichrichtern Dioden als Schaltelemente verwendet. Bei einem dreiphasigen Gleichrichter mit insgesamt 6 Dioden sind dann zu jedem Zeitpunkt zwei Dioden leitend. Im leitenden Zustand verursacht jede Diode einen Spannungsabfall von $V_F = 0,7 \text{ V}$. Die Verlustleistung des Gleichrichters kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$P_V = 2 \cdot V_F \cdot I \quad (13)$$

Diese Verluste wirken sich gerade bei Batteriesystemen mit geringer Spannung und daher hohen Strömen stark aus. Hier kann die Verlustleistung des Gleichrichters eines 12 V Systems bis zu ca. 12% betragen.

Eine mögliche Alternative sind MOSFETs. Durchlasswiderstände $R_{DS(on)}$ von 3-4 mΩ sind verfügbar. Werden alle sechs Dioden durch MOSFETs ersetzt, wird die Verlustleistung mit:

$$P_V = 2 \cdot I^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (14)$$

berechnet. Schaltverluste kann man aufgrund der relativ geringen Frequenz vernachlässigen. Mit dem Austausch der Dioden durch MOSFETs verbessert sich der Wirkungsgrad eines 12 V Systems um ca. 10%. Das Schaltverhalten der Dioden wird mit

¹¹²Vgl. Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*

¹¹³Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001

Hilfe eines ORING Controllers, dargestellt in Abbildung 65, nachgebildet.

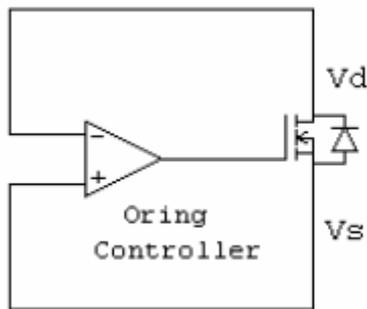


Abbildung 65: ORING Controller IR1167

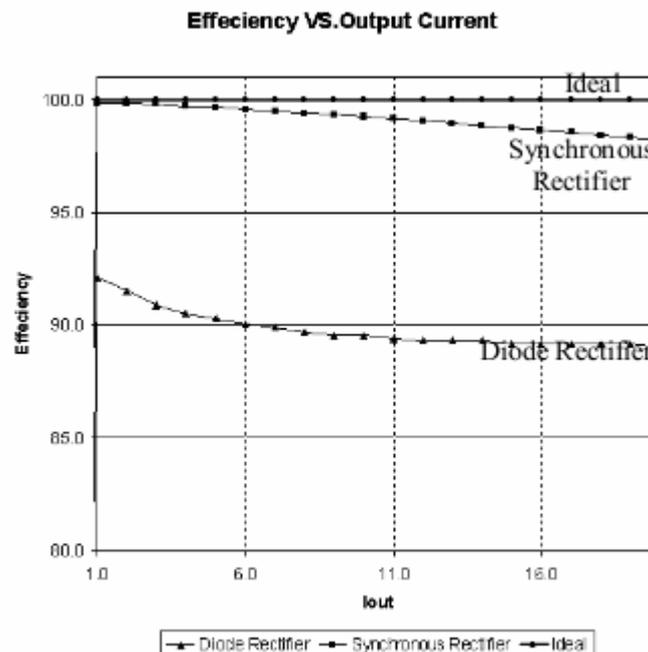


Abbildung 66: Wirkungsgrad idealer, Dioden-, und synchroner Gleichrichter

Eine Anforderung an den ORING Controller ist eine relativ schnelle Ausschaltzeit (z.B.: Modell IR1167: Einschaltzeit 80ns, Ausschaltzeit 60ns). Es muss sichergestellt sein, dass der vorherige Brückenweig, bevor der nächste leitend wird, abgeschaltet ist.¹¹⁴

6.1.1.3 Gesteuerte Gleichrichter

Der Einsatz eines gesteuerten Gleichrichters bringt einige Vorteile gegenüber einem ungesteuerten Diodengleichrichter. Mit ihm ist es möglich den Strom in der Maschine sinusförmig zu halten und somit das Oberschwingungsproblem zu verringern. Die Amplitude der Ausgangsspannung kann unabhängig von der Wellendrehzahl beeinflusst und an verschiedene Erfordernisse angepasst werden. Die Maschine ist besser vom Netz getrennt und Fehlerströme, die von externen Netzfehlern hervorgerufen werden, können unter Kontrolle gebracht werden.¹¹⁵ Der Vorteil der Erzeugung von Blindleistung durch den gesteuerten Gleichrichter wurde bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben.

¹¹⁴ Vgl. Fredericks A.F., de Vries I.D., *Design of an auto-braking regulator for a small wind generator*

¹¹⁵ Vgl. Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*

7 Wechselrichter

7.1 Gesetze in Österreich

Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz

Hauptstück II, Erzeugungsanlagen, §5 Genehmigungspflicht

„(1) Die Errichtung, wesentliche Änderung und der Betrieb einer Erzeugungsanlage mit einer installierten elektrischen Engpassleistung von mehr als 200 Kilowatt bedarf, soweit sich aus Abs. 2 nichts anderes ergibt, nach Maßgabe der folgenden Bestimmungen dieses Hauptstückes einer elektrizitätsrechtlichen Genehmigung (Anlagengenehmigung).“¹¹⁶

Unter Engpassleistung versteht man in der Elektrizitätswirtschaft die maximale Dauerleistung, die ein Kraftwerk unter Normalbedingungen abgeben kann. Sie wird durch den schwächsten Anlagenteil (Engpass) begrenzt.¹¹⁷

Die Errichtung einer Erzeugungsanlage mit einer Engpassleistung von weniger als 200 kW ist also nicht genehmigungspflichtig im Sinne des Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetzes des Landes Steiermark.

Es gibt allerdings für jedes Bundesland unterschiedliche Bestimmungen. In Oberösterreich sind Anlagen unter einer Engpassleistung von 30 kW, in Vorarlberg unter 25 kW, in Burgenland und Niederösterreich unter 20 kW, in Salzburg unter 10 kW und in Tirol und Kärnten unter 5 kW nicht anzeigepflichtig. In Wien gibt es für Anlagen unter 250 kW ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren.¹¹⁸

Die in dieser Arbeit betrachtete Kleinstwindkraftanlage mit einer elektrischen Engpassleistung von 500 W ist also in allen Bundesländern Österreichs nicht anzeigepflichtig. Der für die Netzeinspeisung erforderliche Wechselrichter muss aber die in den Technischen und Organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) festgelegten Bestimmungen erfüllen. Hier ist [Teil D, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen, Version 2.0](#) von besonderer Bedeutung. *„Diese technischen Regeln geben einen allgemeinen Rahmen für den Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen vor. Technische*

116. http://www.e-control.at/portal/pls/portal/portal.kb_folderitems_xml.redirectToItem?pMasterthingId=55787
06.10.2010

117 Vgl. http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=62&Itemid=112
25.07.2010

118 Vgl. <http://www.e-control.at/de/recht/Landesrecht> 05.05.2010

*Besonderheiten des Netzbetriebes können in Einzelfällen jedoch zusätzliche Spezifikationen und Maßnahmen erforderlich machen, welche vom Netzbetreiber festzulegen und schriftlich zu begründen sind. Dies betrifft neu zu errichtende Erzeugungsanlagen bzw. wesentliche Änderungen und wesentliche Erweiterungen an bestehenden Erzeugungsanlagen, unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten und der allenfalls bestehenden Verträge.*¹¹⁹

Die E-Control GmbH achtet darauf, dass die Netzbetreiber die allgemein gültigen Regeln anwenden, transparent vorgehen und alle Anschlusswerber gleich behandeln.

Die TOR stellen kurzgefasst folgende Anforderungen an die Erzeugungsanlage:

- das Schutzkonzept der Erzeugungsanlage muss mit dem des Netzbetreibers abgestimmt sein
- eine Entkopplungsschutzeinrichtung muss die Erzeugungsanlage im Störfall vom Netz trennen und vor einer asynchronen Wiedereinschaltung schützen
- entsprechend den Netzverhältnissen muss zusätzlich zur Wirkleistungseinspeisung auch zum Blindleistungshaushalt beigetragen werden
- die Spannungsqualität des Netzes darf nicht unzulässig beeinflusst werden.

Die Entkopplungsschutzeinrichtung ersetzt eine dem Netzbetreiber stets zugängliche Schaltstelle mit Trennfunktion. Dies gilt für einphasige Anlagen mit einer maximalen Nennscheinleistung von 4,6 kVA wenn die Entkopplungsschutzeinrichtung der ÖVE/ÖNORM E 2750 entspricht. Die Ausführung und der Funktionsumfang der Schutzeinrichtungen für die Entkopplungsstelle sind mit dem Netzbetreiber abzustimmen und dieser kann auch nachträgliche Veränderungen fordern. Es gibt aber in der TOR Kapitel 9.4.1.1 und 9.4.1.2 Tabellen, die für Wechselrichter, die ins Niederspannungsnetz einspeisen, erforderliche und ausreichende Überwachungsfunktionen definieren. Selbsttätig wirkende Freischaltstellen benötigen eine von einer in der EU anerkannten Prüfanstalt ausgestellte Unbedenklichkeitsbescheinigung. Diese Prüfung hat nach ÖVE/ÖNORM E 2750 zu erfolgen.

Der Beitrag zum Blindleistungshaushalt ist vom Typ der Anlage und der vorgesehenen Betriebsweise abhängig. Von Windenergieanlagen kann kein gesicherter Beitrag erwartet werden. Die nicht verbindlichen Richtwerte sehen für Erzeugungsanlagen ≤ 10 kW keinen

¹¹⁹ http://www.e-control.at/portal/pls/portal/portal.kb_folderitems_xml.redirectToItem?pMasterthingId=55787
06.10.2010

7.2 Gegenüberstellung einer Auswahl verfügbarer Windwechselrichter

7.2.1 SMA Windy Boy

Der Wechselrichter „Windy Boy“ von SMA für kleine Windturbinen ist baugleich mit dem Photovoltaikwechselrichter „Sunny Boy“. Der Unterschied besteht in der Software. Die Leistungscharakteristik des Wechselrichters lässt sich auf den Generator abstimmen, um möglichst hohe Energieerträge zu erhalten. Der Unterschied zu Photovoltaikanlagen ist auch, dass ständig schnelle Lastwechsel auftreten und von der Software berücksichtigt werden müssen.

Der Wechselrichter kann auch für windstarke und windschwache Standorte ausgelegt werden. Die Kennlinie der Turbine wird mittels der kostenlosen Software eingestellt. Für diese Einstellung ist eine Polynomkennlinie vorgesehen, die ein optimales Anlaufverhalten, eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit und maximale Energieerträge ermöglicht. Ein zusätzlicher Sanftanlaufparameter erhöht die Lebensdauer der Anlage. Optional kann eine Datenübertragung per Funk erfolgen. Diese Daten werden von der mobilen Sunny BEAM Ertragsanzeige per Bluetooth empfangen. Sie zeigt dann Tagesprofile, aktuelle Leistung sowie Tages- und Gesamtenergieertrag, Leistungen von bis zu 12 Wechselrichtern, Monatsübersichten, den Energieertrag in Euro oder die eingesparte CO₂-Menge an. Eine weitere Möglichkeit ist die Sunny WEBBOX. Sie ermöglicht es alle relevanten Daten übersichtlich auf eine Internetplattform zu übertragen und weltweit darauf zuzugreifen. Für entlegene Standorte gibt es auch ein GSM-Modem. Soll der Wechselrichter in ein Inselnetz einspeisen, ist dafür der Wechselrichter Sunny ISLAND vorgesehen.¹²¹



Abbildung 67: SMA Windy Boy



Abbildung 68: Sunny BEAM
Fernüberwachung per Bluetooth

120 Vgl. http://www.e-control.at/portal/pls/portal/portal.kb_folderitems_xml.redirectToItem?pMasterthingId=55787 06.10.2010

121 Vgl. <http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-1100-1200-1700/dlf/V0IORFICT1ktS0RFMTAwMTE0/download.html> 06.05.2010

Technische Daten Windy Boy 1100:

- Max. DC-Leistung 1210 W
- Min. Leerlaufspannung zur Aktivierung "Turbine Mode" 150 V
- Arbeitsbereich "Turbine Mode" 139 V – 400 V
- Max. Wirkungsgrad 93%
- Eigenverbrauch Betrieb <4 W, Ruhezustand 0,1 W
- Schutzeinrichtungen
 - DC-Verpolungsschutz
 - AC-Kurzschlussfestigkeit
 - Erdschlussüberwachung
 - Netzüberwachung (SMA Grid Guard, entspricht einer selbsttätig wirkenden Freischaltstelle)
 - galvanische Trennung.

Die vollständigen technischen Daten sind unter

<http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-1100-1200-1700.html> verfügbar.

Zusätzlich zum Wechselrichter ist die Windy Boy Protection Box 400 erforderlich. Diese schützt den Wechselrichter vor Überspannungen vom Generator und kann die überschüssige Leistung des Generators in einem externen Widerstand umsetzen, ohne dass der Wechselrichter seinen Betrieb unterbrechen muss. In ihr ist auch der Gleichrichter untergebracht. Der maximale Wirkungsgrad dieses Gleichrichters wird mit >99,95% angegeben.¹²²

Preise:

- Windy Boy 1100 €878,90
- Windy Boy Protection Box / ohne Lastwiderstand €695,90.¹²³

¹²² Vgl. <http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-protection-box.html> 06.05.2010

¹²³ <http://www.preisroboter.de> 06.05.2010

7.2.2 Windmaster 500 von Mastervolt



Abbildung 69:
Windmaster 500 von
Mastervolt

Dieser Wechselrichter basiert auf dem Photovoltaikwechselrichter Soladin 600 von Mastervolt. Die Leistungskurve, um den Wechselrichter an den Generator und die Windturbine anzupassen, ist gleich wie beim Windy Boy mittels kostenloser Software konfigurierbar. Ein Unterschied besteht in der einstellbaren Kennlinie. Der Windmaster unterstützt nur eine lineare Charakteristik im Gegensatz zur Polynomkennlinie des Windy Boys. Es ist ein externer Gleichrichter erforderlich, der den Wechselrichter auch vor zu hohen Eingangsspannungen schützt. Eine Netzüberwachung, die länderspezifisch konfiguriert werden kann, ist auch hier schon integriert. Diese ist aber für Österreich nicht ausreichend. Es muss eine externe selbsttätig wirkende Freischaltstelle (ENS) installiert werden.

Technische Daten:

- Nennleistung 550 W DC
- Eingangsspannung 35-150 V DC
- volle Leistung bei Eingangsspannungen von 65-125 V DC
- Startleistung 1W
- Stand-by Leistung <0,05 W
- Max. Wirkungsgrad 93%
- Schutzeinrichtungen
 - galvanische Trennung
 - DC Verpolungsschutz
 - Netzüberwachung (für Österreich nicht ausreichend)
 - AC und DC Überspannungsschutz vor indirekten Blitzeinschlägen.¹²⁴

124 Vgl. <http://www.mastervolt.com/download.php?id=3523> 07.05.2010

Preis:

- Windmaster 500 €499,90¹²⁵
- ENS Spannungsüberwachung €130,00.¹²⁶

7.2.3 Aurora Windwechselrichter von Power One



Abbildung 70: Aurora
Windwechselrichter von Power One

Der Aurora Wechselrichter verfügt über einen USB Anschluss und eine RS-485 Schnittstelle zur Konfiguration und Datenübertragung. Zusätzlich gibt es die Option „AURORA Easy-Control“ zu verwenden, die dann eine Fernüberwachung über das Internet, ein Analog- oder ein GSM Digitalmodem erlaubt. Die am Wechselrichter installierte Software ist recht umfangreich. Diverse Statistiken, wie zum Beispiel Betriebszeiten, erzeugte Energie, Verdienst und CO₂-Einsparung oder verschiedene elektrische Parameter können direkt am Wechselrichter über ein Display angezeigt, oder ins Internet übertragen werden. Die Leistung des Wechselrichters wird mittels Software und Algorithmus an die Windturbine angepasst und der Ertrag wird durch ein hochgeschwindigkeits Maximum-Power-Tracking optimiert.

Der Wechselrichter ist trafolos, besitzt also keine galvanische Trennung der Ein- und Ausgänge. Durch spezielle Schutzeinrichtungen erfüllt er aber auch ohne Schutztrennung die Normen. Dies ermöglicht auch einen sehr hohen Wirkungsgrad von maximal 96,8%. Der kleinste Wechselrichter ist für eine Leistung von 3 kW ausgelegt. Im Leistungsbereich von 0-500 W hat dieses Modell dann Wirkungsgrade zwischen 85,5 und 95% bzw. 89 und 95%, je nach Eingangsspannung.

Schutzfunktionen wie Netzüberwachung mit Schutz vor Inselbildung, Erdungsüberwachung und interne Temperatur sind bereits integriert. Die Elektronik ist bei

¹²⁵ <http://www.preisroboter.de/> 07.05.2010

¹²⁶ <http://www.prevent-germany.com/installationsmaterial/installationsmaterial-windkraftanlagen/ueberwachungsrelaiss-spannungsueberwachung-fuer-3.html> 07.05.2010

kontinuierlicher Volllast für einen Betrieb von 25 Jahren ausgelegt.

Als Gleichrichter dient die externe Aurora Windschnittstelle mit einem Wirkungsgrad von 99%. Bei Überspannung wird der Wechselrichter von der Windturbine getrennt und die Leistung in einem externen Widerstand umgesetzt.

Technische Daten:

- Nennleistung: 3000 W
- Eigenverbrauch Stand-by: <8 W, Ruhezustand: <2 W
- Eingangsspannung Betriebsbereich MPPT: 50 - 580 V DC
- Eingangsspannung Volllleistung: 160 - 530 V DC.¹²⁷

Preis:

- Wechselrichter PVI-3.0-OUTD-S €1.366,50¹²⁸
- Wind Schnittstelle 6A €435,00.¹²⁹

7.3 Zusammenfassung

Alle drei betrachteten Windwechselrichter sind Weiterentwicklungen eines Photovoltaikwechselrichters und benötigten daher auch einen externen Gleichrichter. Der Windy Boy von SMA bietet als einziger einen großen modular erweiterbaren Funktionsumfang. Sein Preis und die Ausstattung der Basisversion liegen in der Mittelklasse. Der günstigste hier betrachtete Wechselrichter ist der Windmaster 500. Er hat auch den geringsten Stand-by Verbrauch. Der teuerste betrachtete Wechselrichter ist der Aurora, dafür hat er auch den höchsten Wirkungsgrad aller drei Wechselrichter bei Nennleistung.

127 Vgl. http://www.power-one.com/resources/products/appnote/AlternativeEnergy/pvi-3.0_3.6_4.2-outd-de-w_manual.pdf 10.05.2010

128 <http://solartrick.de/privatkunde/erneuerbare-energien/photovoltaik/wechselrichter/wechselrichter-pvi-3-0-outd-s.html> 25.07.2010

129 http://www.energyenv.co.uk/Magnetek_Aurora_Wind_Turbine_Inverter.asp 25.07.2010

8 Conclusio

Der Vergleich von unterschiedlichen Maschinenkonzepten mit Hilfe von Literatur und den dort angeführten Berechnungen gestaltet sich schwierig. Kleinmaschinen wurden in der Vergangenheit hauptsächlich als Antriebe mit geringen Betriebszeiten und teilweise nur kurzer Lebensdauer ausgelegt. Wirkungsgrade spielten nur eine untergeordnete Rolle.

Da seit einigen Jahren das Thema der dezentralen Energieerzeugung immer stärker in der Öffentlichkeit präsent ist, steigt auch die Nachfrage an Generatoren kleiner Leistung. Vergleichende Literatur mit aussagekräftigen Ergebnissen zu dieser Leistungsklasse von Generatoren gibt es nur wenig, aber die Zahl der in jüngerer Vergangenheit veröffentlichten Forschungsberichte zeigt eine steigende Tendenz in diese Richtung Untersuchungen anzustellen.

Für jeden Maschinentyp gibt es viele Designparameter, mit deren Hilfe sich die Eigenschaften teilweise stark verändern lassen. Wird nur ein Detail modifiziert, kann dies positive oder negative Auswirkungen auf mehrere Charakteristiken haben. Es ist schwierig, alle möglichen Auslegungsvarianten jedes Maschinentyps zu berücksichtigen und dabei die Wirtschaftlichkeit für alle Versionen nur mit Hilfe von Literatur ohne konkrete Prototypen zu erforschen. Zusätzlich verändern sich manche Eigenschaften mit der Baugröße und viele Untersuchungen werden für Windparks mit Großgeneratoren durchgeführt. In vergleichender Literatur wird oft der favorisierte Maschinentyp für eine Anwendung optimiert und dann mit Standardmaschinen anderer Bauart verglichen. Diese Umstände erschweren eine direkte Gegenüberstellung.

In dieser Arbeit haben sich zwei Generatoren für eine Windturbine kleiner Leistung als empfehlenswert herauskristallisiert:

- die permanentmagneterregte Aussenläufer-Radialflussmaschine mit oberflächenbefestigten Magneten als in diesem Segment etablierte Maschine und daher geringen Kosten
- die Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung als unkonventionelle Maschine, mit simpler Konstruktion, sehr gutem Wirkungsgrad, guter Spannungsqualität und dabei guten Betriebseigenschaften.

Es wurde gezeigt, dass bei permanentmagneterregten Generatoren die Wahl des Gleichrichters nicht nur einen Einfluss auf den Gesamtsystemwirkungsgrad hat, sondern auch auf den Wirkungsgrad der Maschine selbst.

Die Notwendigkeit einer Bremsung der Turbine wurde besprochen und verschiedene Möglichkeiten dafür aufgezeigt.

Am Markt verfügbare Windwechselrichter und ihre technische Ausstattung wurden gegenübergestellt. Hier zeigte sich der Windy Boy von SMA als geeignete Wahl. Zusätzlich wurden für die Netzeinspeisung relevante Passagen aus den in Österreich gültigen Gesetzen kurz zusammengefasst.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

9.1.1 Bücher und Papers

AI-Bahrani A.H., Malik N.H., *Selection of the excitation capacitor for dynamic braking of induction machines*, Electric Power Applications, IEE Proceedings B, vol. 140, pp. 1-6, Jan. 1993

Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., *A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines*, 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, pp. 1-6, Sept. 2008

Chan T.F., Lai L.L., *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*, IEEE Transactions on Energy Conversion vol. 22 no. 1, pp. 86-94, March 2007

Cravero L.G., *Entwurf, Auslegung und Betriebsverhalten von dauermagneterregten bürstenlosen Motoren kleiner Leistung*, Dissertation Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau , Nov. 2005

Dorrell D.G., *Design Requirements for Brushless Permanent Magnet Generators for Use in Small Renewable Energy Systems*, Industrial Electronics Society IECON 2007 33rd Annual Conference of the IEEE, Taipei, pp. 216-212, Nov. 2007

Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines*, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York, pp. 22-26, June 2000

Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., *Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines*, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition Copenhagen, pp. 5-8, 2001

Farschtschi A., *Elektromaschinen in Theorie und Praxis*, VDE Verlag Berlin Offenbach, 2001

Fredericks A.F., de Vries I.D., *Design of an auto-braking regulator for a small wind generator*, Africon 2007, Windhoek, pp. 1-5, Sept. 2007

Garcia J.S.D., Ferreira da Luz M.V., Bastos J.P.A., Sadowski N., *Transverse Flux Machines: What for?*, IEEE MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING EDUCATION MAGAZINE, vol. 2, no. 1, Mar. 2007

Golding E.W., *The generation of electricity by wind power*, London, E. & F. N. SPON LTD, 1978

Goto H., Hai-Jiao Guo, Ichinokura O., *A Micro Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Reluctance Generator*, 13th European Conference on Power Electronics and Applications Barcelona, pp. 1-8, Sept. 2009

Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Dec. 2001

Henderson D.S., *SYNCHRONOUS OR INDUCTION GENERATORS ? THE CHOICE FOR SMALL SCALE GENERATION*, International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation (Conf. Publ. No. 419), Durham, pp. 146-149, Mar. 1996

Jurca F., Martis C., Birou I., Biro K., *Analysis of Permanent Magnet Claw-Pole Synchronous Machine*, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, pp. 75-80, Aug. 2008

Jurca F., Martis C., Biro K., *Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, pp. 1286-1291, June 2008

Jurisch F., *Nutrastmomente in elektrischen Maschinen: Neue Betrachtungsweise und Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung*, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG Vortrag auf SPS/IPC/Drives Session Motoren am 26.10.2003 in Nürnberg erschienen im Tagungsband S. 613-620, Nov. 2003

Lampola P., *Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications*, Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No.101, Espoo, May 2000

Li H., Chen Z., *Overview of different wind generator systems and their comparisons*, Renewable Power Generation IET, vol. 2, pp. 123-138, June 2008

Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, *A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator*, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, pp. 22-26, Nov. 2007

Melcescu L., Popescu M., Covrig M., Cistelecan M., Craiu O., *Numerical and Experimental Analysis of Two Permanent Magnet Claw Poles Wind Generators*, 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, pp. 1-5, Sept. 2008

Muljadi E., Green J., *Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator*, 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno Nevada, Jan. 2002

Murthy S.S., Singh B., Goel P.K., Tiwari S.K., *A Comparative Study of Fixed Speed and Variable Speed Wind Energy Conversion Systems Feeding the Grid*, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, pp. 736-743, Nov. 2007

Ogawa K., Yamamura N., Ishida M., *Study for Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator*, IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, pp. 1515-1515, Dec. 2006

- Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., *Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines*, Accepted for publication in EPE Journal, vol. 15, no. 4, 2005
- Rabinovici R., *Torque ripple, vibrations, and acoustic noise in switched reluctance motors*, HAIT Journal of Science and Engineering B, vol. 2, no. 5-6, pp. 776-786, July 2005
- Ribrantand J., Bertling L., *Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005*, IEEE Trans.EnergyConv. vol. 22, no.1, pp. 167–173, March 2007
- Schüttler J., Werner U., Vinogradski M., Orlik B., *Stromregelung einer zweisträngigen Transversalflussmaschine in Sammlerbauweise*, Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) Universität Bremen, 2004
- Stölting H.D., Kallenbach E., *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*, Carl Hanser Verlag München Wien, 2002
- Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., *On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology*, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, pp. 99-104, May 2008
- Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., *Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine*, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, pp. 1597-1601, Aug. 2006
- Torrey D.A., Childs S.E., Haan S., *A Variable-Speed Wind Turbine Based on a Direct-Drive Variable-Reluctance Generator*, Windpower '94, Minneapolis, 1994
- Walter J., Ceglia G., Guzman V., *Evaluation of an Automotive Alternator as a Power Generation Element for its Use on an Alternative Energy System*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, pp. 1165-1169, June 2008
- Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., *PM Wind Generator Topologies*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 1619-1626, Nov.-Dec. 2005
- Zhang Bingyi, Pu Yanzhou, Sun Guanggui, Feng Guihong, *A Novel Contactless Auto-generator*, Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 992-995, Sept. 2005

9.1.2 Internetquellen

<http://www.e-control.at/de/recht/Landesrecht> 05.05.2010

Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen, Version 2.0 2008
http://www.e-control.at/portal/pls/portal/portal.kb_folderitems_xml.redirectToItem?pMasterthingId=55787 06.10.2010

http://www.energyenv.co.uk/Magnetek_Aurora_Wind_Turbine_Inverter.asp 25.07.2010

http://www.epcos.com/inf/50/db/icl_09/ICL_B57237_S237.pdf 24.07.2010

http://www2.fh-gelsenkirchen.de/FH-Sites/FH-Main/fileadmin/FH-GE/pressestelle/trikon_pdf/Trikon2010_1.pdf 17.05.2010

http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/rohstoffe-selten-wird-teuer_aid_261514.html
22.07.2010

http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=62&Itemid=112 25.07.2010

<http://www.mastervolt.com/download.php?id=3523> 07.05.2010

http://www.power-one.com/resources/products/appnote/AlternativeEnergy/pvi-3.0_3.6_4.2-outd-de-w_manual.pdf 10.05.2010

<http://www.prevent-germany.com/installationsmaterial/installationsmaterial-windkraftanlagen/ueberwachungsrelaisspannungsuueberwachung-fuer-3.html> 07.05.2010

<http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-1100-1200-1700/dlf/V0IORFICT1ktS0RFMTAwMTE0/download.html> 06.05.2010

<http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-protection-box.html>
06.05.2010

<http://solartrick.de/privatkunde/erneuerbare-energien/photovoltaik/wechselrichter/wechselrichter-pvi-3-0-outd-s.html> 25.07.2010

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Windturbine mit Ummantelung der Firma qpunkt

Quelle: <http://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/graz/2326819/kleine-kraftwerk-fuer-zuhause.story> 17.05.2010

Abbildung 2: Typische Leistungskurven und Betriebspunkte einer Windturbine mit Strömungsabriss "stall limited" (gestrichelte Linie) und einer Windturbine mit verstellbaren Rotorblättern "pitch controlled" (durchgezogene Linie)

Quelle: http://www.uni-hildesheim.de/~irwin/inside_wind_turbines.html 17.05.2010

Abbildung 3: Strömungsabriss an einem Rotorblatt

Quelle: Polinder H., de Haan S.W.H., Dubois M.R., Slootweg J.G., Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines, Accepted for publication in EPE Journal, 2005

Abbildung 4: Gesamtsystemwirkungsgradvergleich einer Käfigläufer-Asynchronmaschine bei fixer (FSIG) und variabler (VSIG) Drehzahl

Quelle: Murthy S.S., Singh B., Goel P.K., Tiwari S.K., A Comparative Study of Fixed Speed and Variable Speed Wind Energy Conversion Systems Feeding the Grid, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 5: Wirkungsgrad einer typischen Windturbine bei unterschiedlichen Schnelllaufzahlen
Quelle: Muljadi E., Green J., Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator, 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno Nevada, 2002

Abbildung 6: Nutrustmoment bei konstantem Luftspalt (schwarz) und variablem Luftspalt (blau)
Quelle: Muljadi E., Green J., Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator, 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno Nevada, 2002

Abbildung 7: Nutrustmoment für verschiedene Polbreiten
Quelle: Muljadi E., Green J., Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator, 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno Nevada, 2002

Abbildung 8: Nutrustmoment mit unterschiedlichen Graden der Schrägung
Quelle: Muljadi E., Green J., Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator, 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno Nevada, 2002

Abbildung 9: Jahresenergieertrag in Abhängigkeit der Generatornennleistung
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 10: Drehzahl-, Drehmomentkennlinie einer typischen Asynchronmaschine
Quelle: Walling R.A., Reichard M.L., Short Circuit Behavior of Wind Turbine Generators, 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2009

Abbildung 11: Wirkungsgrad eines Asynchronmotors als Funktion von Drehmoment und Drehzahl
Quelle: Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001

Abbildung 12: Innenläufer-Radialflussmaschine
Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 13: Außenläufer-Radialflussmaschine
Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 14: Radialflussmaschine mit E-Kernen
Quelle: Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001

Abbildung 15: Genutete Axialflussmaschine mit Doppelstator
Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 16: Einseitige genutete Axialflussmaschine mit Statorbalancierung

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Quelle: Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008

Abbildung 18: Rotor mit Permanentmagneten einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Quelle: Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008

Abbildung 19: Stator einer Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung

Quelle: Bumby J.R., Stannard N., Dominy J., McLeod N., A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008

Abbildung 20: 2D Flussverlauf in einer PM Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung (a) unbelastet (b) belastet

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 21: Berechnete axiale Komponente der Luftspaltflussdichte in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 22: Berechnete Komponente der Luftspaltflussdichte entlang des Umfanges in y-Richtung und bei unbelasteter Maschine

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 23: Ersatzschaltbild einer Phase der Axialflussmaschine mit Luftspaltwicklung und ohmscher Last

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 24: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei verschiedenen konstanten Drehzahlen:

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 25: Testergebnisse einer Axialflussmaschine mit eisenlosem Stator bei variabler Drehzahl und bei verschiedenen konstanten Lastwiderständen:

Quelle: Chan T.F., Lai L.L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, IEEE Transactions on Energy Conversion VOL. 22 NO. 1, 2007

Abbildung 26: permanentmagneterregte Transversalflussmaschine

Quelle: Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008

Abbildung 27: Transversalfluss Reluktanzmaschine

Quelle: Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008

Abbildung 28: zweiseitige permanentmagneterregte Transversalflussmaschine

Quelle: Garcia J.S.D., Ferreira da Luz M.V., Bastos J.P.A., Sadowski N., Transverse Flux Machines: What for?, IEEE MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING EDUCATION MAGAZINE VOL. 2 NO. 1, 2007

Abbildung 29: permanentmagneterregte Transversalflussmaschine mit einfacherem Aufbau

Quelle: Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008

Abbildung 30: Ein Phasenmodul der permanentmagneterregten Transversalflussmaschine mit einfacherem Aufbau

Quelle: Strete L., Viorel I.-A., Viorel A.C., On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008

Abbildung 31: Rotor einer permanentmagneterregten Klauenpolmaschine

Quelle: Melcescu L., Popescu M., Covrig M., Cistelean M., Craiu O., Numerical and Experimental Analysis of Two Permanent Magnet Claw Poles Wind Generators, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008

Abbildung 32: berechnetes Nutrastmoment einer 1,6kW permanentmagneterregten Klauenpolmaschine, blaue Linie: ohne Schrägung, schwarze Linie: mit Schrägung

Quelle: Melcescu L., Popescu M., Covrig M., Cistelean M., Craiu O., Numerical and Experimental Analysis of Two Permanent Magnet Claw Poles Wind Generators, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008

Abbildung 33: Spektrum der Statorspannung bei 500U/min, Grundschiwingung bei 33,3Hz

Quelle: Jurca F., Martis C., Biro K., Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008

Abbildung 34: Spannungsform der permanentmagneterregten Klauenpolmaschine für unterschiedliche Drehzahlen

Quelle: Jurca F., Martis C., Biro K., Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008

Abbildung 35: Spektrum der Statorspannung bei 750U/min, Grundschiwingung bei 50Hz

Quelle: Jurca F., Martis C., Biro K., Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008

Abbildung 36: Spektrum der Phasenspannung bei 1500U/min, Grundschiwingung bei 100Hz

Quelle: Jurca F., Martis C., Biro K., Claw-Pole Generator Analysis Using Flux 3D, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008

Abbildung 37: Permanentmagnet-Reluktanz-Generator

Quelle: Goto H., Hai-Jiao Guo, Ichinokura O., A Micro Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Reluctance Generator, European Conference on Power Electronics and Applications, 2009

Abbildung 38: Schnitt des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Quelle: Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 39: Strukturmodell des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Quelle: Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 40: Prototyp des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Quelle: Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 41: Permanentmagnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Quelle: Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 42: DC-Feld Magnetkreis des hybriderregten Synchrongenerators mit Doppelstator

Quelle: Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng, Fang Shuhua, Guo Jian, A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007

Abbildung 43: 3D-Modell eines dreiphasigen geschalteten Reluktanzgenerators, dargestellt sind nur die Wicklungen einer Phase

Quelle: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/2005/RX/RX51S-choi1.html>

Abbildung 44: Magnetischer Fluss als Funktion des Stromes in einem geschalteten Reluktanzgenerator

Quelle: Ogawa K., Yamamura N., Ishda M., Study for Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006

Abbildung 45: Induktivitäts-, Spannungs- und Stromverlauf eines geschalteten Reluktanzgenerators

Quelle: Ogawa K., Yamamura N., Ishda M., Study for Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006

Abbildung 46: Drehmomentdichte für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 47: Magnetgewicht für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 48: Kupfergewicht für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 49: Kupfergewicht für schnell laufende Generatoren mit Getriebe

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 50: Blechgewicht für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 51: Aktives Material für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 52: Wirkungsgrad für direkt angetriebene Generatoren

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 53: Wirkungsgrad für schnell laufende Generatoren mit Getriebe

Quelle: Yicheng Chen, Pillay P., Khan A., PM Wind Generator Topologies, IEEE Transactions on Industry Applications, 2005

Abbildung 54: Drehmomentdichte für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung)

Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Abbildung 55: Kosten/Drehmoment für Radialfluss und Transversalflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung (Luftspaltwicklung)
Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Abbildung 56: Drehmomentdichte für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten
Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Abbildung 57: Kosten/Drehmoment für Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten, geschaltete Reluktanzmaschine und Radialflussmaschine mit vergrabenen Magneten
Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Abbildung 58: Nuten einer Axialflussmaschine mit R_{li} :innerer Radius und R_{lo} :äußerer Radius
Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition Copenhagen pp. 5-8, 2001

Abbildung 59: dreiphasiger Gleichrichter mit Bremsfunktion
Quelle: Fredericks A.F., de Vries I.D., Design of an auto-braking regulator for a small wind generator, Africon, 2007

Abbildung 60: dreiphasiger Gleichrichter mit automatischer Bremsfunktion
Quelle: Fredericks A.F., de Vries I.D., Design of an auto-braking regulator for a small wind generator, Africon, 2007

Abbildung 61: System einer Mikrowindturbine
Quelle: Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006

Abbildung 62: Zeitkonstanten für den Bremsvorgang mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen
Quelle: Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006

Abbildung 63: Maximalströme während des Bremsvorganges mit verschiedenen Widerständen und Drehzahlen
Quelle: Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006

Abbildung 64: Typische Anordnung eines Permanentmagnetgenerators mit variabler Drehzahl und Netzeinspeisung

Quelle: Hansen L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001

Abbildung 65: ORING Controller IR1167

Quelle: Fredericks A.F., de Vries I.D., Design of an auto-braking regulator for a small wind generator, Africon, 2007

Abbildung 66: Wirkungsgrad idealer, Dioden-, und synchroner Gleichrichter

Quelle: Fredericks A.F., de Vries I.D., Design of an auto-braking regulator for a small wind generator, Africon, 2007

Abbildung 67: SMA Windy Boy

Quelle: <http://www.sma.de/de/produkte/windenergie-wechselrichter/windy-boy-1200-1700.html>
06.05.2010

Abbildung 68: Sunny BEAM Fernüberwachung per Bluetooth

Quelle: <http://www.sma.de/de/produkte/monitoring-systems/sunny-beam-mit-bluetooth.html>
06.05.2010

Abbildung 69: Windmaster 500 von Mastervolt

Quelle: <http://www.prevent-germany.com/netzeinspeise-anlagen-wechselrichter-netzinverter/mastervolt/windmaster-500-von-mastervolt.html> 06.05.2010

Abbildung 70: Aurora Windwechselrichter von Power One

Quelle: <http://www.power-one.com/renewable-energy/wind-inverters.php?loc=de> 06.05.2010

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Jahresenergieertrag bei unterschiedlichen Anlaufwindgeschwindigkeiten

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 2: Vergleich von Axialflussmaschine mit vergrabenen Magneten, Transversalflussmaschine mit einseitigen oberflächenbefestigten Magneten (Single-Sided Surface Magnets),

Radialflussmaschine mit Oberflächenmagneten und Axialflussmaschine mit Toruswicklung

Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Tabelle 3: Vergleich von Transverse Vernier Individual Hybrid Reluctance Machine, Axialflussmaschine mit Toruswicklung und Transversalflussmaschine mit doppelseitiger Flusskonzentration

Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics New York pp. 22-26, 2000

Tabelle 4: Designs der Axialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment

Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition Copenhagen pp. 5-8, 2001

Tabelle 5: Designs der Radialflussmaschine mit geringsten Kosten/Drehmoment

Quelle: Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A., Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition Copenhagen pp. 5-8, 2001

Tabelle 6: Übersicht der Generatoreigenschaften für eine Windturbine kleiner Leistung

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 7: Daten der NTC Widerstände

Quelle: Sugawara A., Yamamoto K., Yoshimi T., Sato S., Tsurumaki A., Ito T., Research for Electric Brake Using NTC Thermistors on Micro Wind Turbine, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006