

Schlussbericht **Dezember 2004**

Hocheffizienter, getriebeloser Antrieb

ausgearbeitet durch

Ralph Niederer
Vivatec GmbH
Steinenbachgässlein
4051 Basel

Unter Mitarbeit von:

Gebrüder Meier AG; 8105 Regensdorf
Hochschule Wallis; 1950 Sion

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	3
Abstract (deutsch).....	3
Abstract (english).....	4
1. Ausgangslage, Vorgehen.....	5
1.1 Bedeutung.....	5
1.2 Projektpartner.....	6
1.2.1 Technocon AG / Vivatec GmbH.....	6
1.2.2 Bartholdi AG / Gebrüder Meier AG	6
1.2.3 Hochschule Wallis (HEVS)	7
1.2.4 Externe Spezialisten.....	7
1.3 Projektziele.....	7
1.4 Vorgehen.....	7
2. Umrichter und Maschine 1200 kW.....	9
2.1 Auslegung des Gesamtsystems.....	9
2.2 Auslegung des Umrichters.....	9
2.3 Auslegung der Maschine.....	12
2.4 Realisierung und Messungen.....	13
2.4.1 Tests am Umrichter	13
2.4.2 Tests an der Maschine	14
2.4.3 Tests am Gesamtsystem.....	14
2.5 Bewertung.....	19
2.5.1 Reduktion der Baugrösse	19
2.5.2 Reduktion des Gewichts.....	19
2.5.3 Nachweis der Auslegungsdaten des 1200 kW Systems.....	19
2.5.4 Nachweis des Wirkungsgrads des 1200 kW Systems.....	19
3. Umrichter und Maschine 3 kW.....	20
3.1 Auslegung des Gesamtsystems.....	20
3.2 Auslegung des Umrichters.....	20
3.2.1 Netzseitiger Wechselrichter	21
3.2.2 Maschinenseitiger Wechselrichter	22
3.3 Auslegung der Maschine.....	24
3.4 Realisierung und Messungen.....	27

3.4.1	Leerlauf-Messung der Maschine.....	27
3.4.2	Lastmessungen	29
3.5	Bewertung	32
4.	Einspar-Möglichkeiten und –Potenziale	33
4.1	System 1200 kW	33
4.2	System 3 kW	34
5.	Umsetzungsmöglichkeiten	35
5.1	System 1200 kW	35
5.2	System 3 kW	35
6.	Quellenverzeichnis	36
7.	Anhang	36

Zusammenfassung

Résumé

Pour deux gammes de puissance, des systèmes d'entraînement ont été développés à haut rendement et faible vitesse de rotation, sans multiplicateur. Ces systèmes comprennent chaque fois un convertisseur de fréquence à transistors IGBT ou MOSFET et une machine synchrone à aimants permanents. Les systèmes peuvent fonctionner en mode moteur ou en mode générateur. Ces systèmes sont très efficaces, car ils n'ont pas besoin d'un multiplicateur, ce qui diminue aussi le poids, les pertes, les dimensions, le bruit et l'entretien. Les réglages des convertisseurs fonctionnent sans capteur de vitesse, ce qui augmente considérablement la fiabilité et réduit les coûts.

Des applications possibles de ces systèmes d'entraînement à faible vitesse de rotation se trouvent dans l'industrie, les remontées mécaniques ainsi que pour les éoliennes.

Le rendement global et les besoins en matériaux des deux systèmes ont été optimisés de manière itérative.

Pour les deux systèmes, des prototypes ont été développés et testés. Les deux prototypes fonctionnent, sont fiables et remplissent les attentes.

Pour le système à haute puissance (1200 kW, 20 rpm), le rendement global à charge nominale est de 93.1 %. Pour le système à faible puissance (3 kW, 60 rpm), le rendement global est de 85%.

A charge nominale, les pertes des deux systèmes développés sont de 4 % inférieures par rapport aux systèmes conventionnels à multiplicateur mécanique.

Abstract (deutsch)

Für zwei Leistungsklassen wurden hocheffiziente, getriebelose Antriebssysteme für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Diese Systeme bestehen jeweils aus einem Umrichter mit abschaltbaren Halbleitern (IGBTs bzw. MOSFETs) und einer mit Permanentmagneten ausgerüsteten Synchronmaschine, dadurch sind die Systeme sowohl für motorischen wie auch generatorischen Betrieb geeignet. Diese Systeme sind sehr effizient, da sie ohne Getriebe auskommen, was auch Gewicht, Abmessungen, Lärm und Wartungsaufwand reduziert. Die Umrichterregelungen wurden so ausgeführt, dass sie ohne Drehzahlgeber arbeiten können, was die Zuverlässigkeit deutlich erhöht und die Kosten reduziert.

Mögliche Anwendungen von Antriebssystemen mit tiefen Drehzahlen gibt es zum Beispiel bei Industrieantrieben, Seilbahnen und Windkraftanlagen.

Beide Systeme wurden in mehreren iterativen Schritten optimiert hinsichtlich Gesamtwirkungsgrad und Materialeinsatz.

Für beide Systeme wurden Prototypen entwickelt und geprüft. Beide Prototypen funktionierten zuverlässig und erfüllten die Erwartungen.

Beim System hoher Leistung (1200 kW, 20 rpm) wurde bei Nennleistung ein Gesamtwirkungsgrad von 93.1% erreicht, beim System kleiner Leistung (3 kW, 60 rpm) betrug der Gesamtwirkungsgrad 85%.

Damit weisen diese hier entwickelten Systeme bei Nennleistung ca. 4% weniger Verluste auf als die konventionellen Antriebssysteme mit mechanischem Getriebe.

Abstract (english)

High efficient gearless variable speed drive systems for low speed applications had been developed. These systems consist of an inverter with active switches (IGBTs, MOSFETs, resp.) and a synchronous machine excited with permanent magnets, therefore these systems can be used for drive as well as for generator applications. These systems operate very efficiently since a gearbox is obsolete, furthermore weight, dimensions, noise and maintenance can be reduced. The inverter controllers do not require any speed sensors, thus reliability is increased and costs are decreased.

Application for low speed variable speed drive systems can be found in industrial applications, cable railways or wind turbines.

Both systems had been optimized concerning overall efficiency and material expenditure in several iterative loops.

For both systems prototypes had been developed and tested. Both prototypes performed reliably and fulfilled the expectations.

The high power system (1200 kW, 20 rpm) operated at rated load with an overall efficiency of 93.1%, the lower power system (3 kW, 60 rpm) with an overall efficiency of 85%.

Thus the losses of these new systems are at rated load app. 4% lower compared to conventional drive systems equipped with a mechanical gearbox.

1. Ausgangslage, Vorgehen

1.1 Bedeutung

Es wurde die Technologie für ein drehzahlvariables Antriebssystem, bestehend aus IGBT-Umrichter und einer hochpoligen, permanentenerregten Synchronmaschine für eine Leistung bis 1200 kW entwickelt.

Gleichzeitig wurde eine Studie von der Hochschule Wallis durchgeführt, welche die Umsetzung dieses Konzepts auf kleinere Leistungen (1 .. 30 kW) untersucht. Dazu wurde ein Prototyp mit 3 kW Leistung entwickelt und geprüft.

Dieses Antriebssystem ist geeignet für den getriebelosen Antrieb bei tiefen Drehzahlen. Da dieses System für beide Drehrichtungen und beide Energierichtungen ausgelegt ist, kann es auch als Generatorsystem bei der Stromerzeugung verwendet werden.

Dieses getriebelose Antriebssystem hat folgende Vorteile:

- Keine Getriebe-Verluste
- Keine Getriebe-Geräusche
- Platz-, Gewicht- und Materialreduktion
- Erhöhte Zuverlässigkeit, da keine Getriebeausfälle
- Geringer Wartungsaufwand

Getriebelose Antriebs- bzw. Generatorsysteme sind insbesondere für folgende Anwendungen geeignet:

- Förderanlagen
- Mühlen (Zement, Zucker, ...)
- Walzwerke
- Schiffsantriebe
- Evtl. Traktion
- Windgeneratoren
- Evtl. Wassergeneratoren

Da bei diesem System die Getriebeverluste entfallen, wird eine Reduktion der Verluste des Gesamtsystems um mindestens 3% bezogen auf die Nennleistung erwartet.

1.2 Projektpartner

Die Firmen Technocon AG und Bartholdi AG bildeten für dieses Entwicklungsprojekt ein Konsortium. Dieses Konsortium blieb auf das eigentliche Entwicklungsprojekt beschränkt. Die Projektleitung lag bei der Technocon AG.

Dieses Konsortium arbeitete mit der Hochschule Wallis zusammen.

Zusätzlich wurden mit diversen anderen spezialisierten Firmen zusammengearbeitet.

Im Verlaufe des Projektes gingen sowohl die Bartholdi AG wie auch die Technocon AG Konkurs. Ihre Arbeiten an diesem Projekt wurden von der Gebrüder Meier AG bzw. Vivatec GmbH weitergeführt.

Im folgenden sind die involvierten Firmen und ihre an diesem Projekt beteiligten Mitarbeiter aufgeführt:

1.2.1 Technocon AG / Vivatec GmbH

Technocon AG; Technoparkstrasse 1; 8005 Zürich

Vivatec GmbH; Steinenbachgässlein 25; 4051 Basel

Verantwortliche Person: Ralph Niederer niederer@vivatec.ch

Mitarbeiter	Ausbildung	Spezialkenntnisse
Ralph Niederer:	Dipl. El. Ing. ETH NDS Betriebswirtschaft	Umrichtertechnik
René Schäfer:	Dipl. El. Ing. FH	Antriebssysteme
John Eckerle:	Dipl. El. Ing. ETH	Umrichtertechnik IGBT-Stromrichter Regelungs-Software
Lukas Graber:	Dipl. El. Ing. ETH	IGBT-Stromrichter Stromrichter-Simulation
Thierry Koenigsberger:	Dipl. El. Ing. ETH	Software
Philipp Tellenbach:	Elektroniker	Geräte-Entwicklung und -prüfung

1.2.2 Bartholdi AG / Gebrüder Meier AG

Otto Bartholdi AG; Tüftelstrasse 50; 5322 Koblenz

Gebrüder Meier AG; Althardstrasse 190; 8105 Regensdorf

Verantwortliche Person bei Bartholdi AG: Hans-Rudolf Siegrist

Verantwortliche Person bei Gebr. Meier AG: Hr. Buser

Mitarbeiter	Ausbildung	Spezialkenntnisse
H. Siegrist	Dipl. El. Ing. HTL	Elektromaschinenbau
K. Weber	Dipl. El. Ing. FH	Berechnung elektrischer Maschinen

P. Huber	Dipl. Ing. FH	Maschinenbau
V. Bütler	Werkzeugmacher	AVOR/PPS
L. Rotzinger	Elektromechaniker	Prüfung elektrischer Maschinen

1.2.3 Hochschule Wallis (HEVS)

Hochschule Wallis; Kompetenzgruppe Energie; Route du Rawyl 47; 1950 Sion

Verantwortliche Person: Serge Lillo serge.lillo@hevs.ch

Mitarbeiter	Ausbildung	Spezialkenntnisse
Serge Lillo,	Dipl. El. Ing EPFL	Professor für Elektronik, Leiter des Kompetenzzentrums Energie
Pierre Poffet	Dipl. El. Ing. EPFL	Professor für elektrische Maschinen
Hans-Peter Biner	Dipl. El. Ing. ETHZ	Professor für industrielle Elektronik
Al Blaise Evéquoz	Dipl. El. Ing. FH	Umrichterregelung, Tests
Marc Emery	Dipl. El. Ing. FH	Umrichterregelung, Tests

1.2.4 Externe Spezialisten

Zusätzlich arbeiteten an diesem Projekt mit :

Reto Rickenbacher (Rauscher & Stoecklin AG, Sissach): Konstruktion und Fertigung des Umrichters

Daho Taghezout (Hochschule Waadt und Applied Magnetics) : Feldberechnungen mit flux2d

Ehem. Prof. Reichert Prof. ETH: Berechnung der elektrischen Maschine 1200 kW

Ingenieurbüro Braun: Berechnung der elektrischen Maschine 1200 kW

Sensoplan AG: Messung der 1200 kW Maschine

1.3 Projektziele

Die Zielsetzungen für dieses Projektes waren:

- Verbesserung des Wirkungsgrades des gesamten Antriebssystems
- Reduktion der Baugrösse
- Verkleinerung des Gewichts

1.4 Vorgehen

Umrichter und permanenterregte Maschinen wurden auch schon von anderen Firmen entwickelt. Das besondere an diesem Projekt war jedoch, dass das Gesamtsystem betrachtet und hinsichtlich Wirkungsgrad, Materialeinsatz und Verfügbarkeit optimiert wurde.

Dem gegenüber wurden bisher Maschine und Umrichter weitgehend unabhängig von einander ausgelegt und optimiert, wodurch viele Optimierungsmöglichkeiten nicht ausgeschöpft werden konnten.

Bei diesem Projekt war deshalb über die ganze Projektdauer eine enge Zusammenarbeit zwischen Umrichter-Entwickler, Maschinen-Entwickler und Hochschule nötig.

Dieses Projekt wurde initiiert durch die Firmen Bartholdi AG und Technocon AG, dazu wurde eine Zusammenarbeit mit der Hochschule Wallis etabliert.

Die Hochschule Wallis verfügt aufgrund früherer Projekte über ein hohes Knowhow insbesondere für Umrichter im kW-Bereich und die Auslegung von elektrischen Maschinen, so dass sie ihre Arbeiten mit hoher Kompetenz durchführen konnten.

Die Firma Technocon AG war spezialisiert auf die Entwicklung von Umrichtern im MW-Bereich. Für dieses Projekt konnte sie auf den Erfahrungen eines ähnlichen Umrichters mit 800 kW Nennleistung aufbauen.

Die Firma Bartholdi AG war spezialisiert in der Entwicklung, Produktion und Wartung von elektrisch und permanenterregten Synchrongeneratoren.

Die Projektplanung sah vor, dass das Konsortium Technocon / Bartholdi den Prototyp grosser Bauleistung (1200 kW), die Hochschule Wallis den Prototyp kleiner Bauleistung (3 kW) entwickelt. Das hatte den Vorteil, dass sich die involvierten Firmen auf den hohen Leistungsbereich konzentrieren konnten, in welchem sie sehr viel Erfahrung hatten, ohne den kleinen Leistungsbereich, welcher über ein bedeutendes Energiesparpotential verfügt, vernachlässigen zu müssen.

Bei der Entwicklung der beiden Prototypen, insbesondere beim Prototypen grosser Leistung (1200 kW), wurde grosser Wert darauf gelegt, dass komplett industrietaugliche Systeme entstanden, welche auch alle für die Anwendung notwendigen Funktionen wie Bedienung, Kommunikation und Schutzfunktionen aufwiesen und zu konkurrenzfähigen Preisen produziert werden könnten.

Für die Berechnung der 1200 kW Maschine wurde mit diversen spezialisierten Firmen zusammengearbeitet, zB mit Applied Magnetics für die Finite-Elemente-Simulation, mit dem Ingenieurbüro Braun und Prof. Reichert von der ETH für die Auslegungs-Rechnungen. Auch die Messungen an der Maschine wurden von einer spezialisierten Firma (Sensoplan) durchgeführt.

Es hatte sich gezeigt, dass es für dieses Projekt von Vorteil war, dass alle involvierten Firmen in der Schweiz tätig waren, so dass die recht aufwendigen gemeinsamen Optimierungsarbeiten effizient durchgeführt werden konnten.

Nachdem an der Hochschule Wallis festgestellt wurde, dass ein einfaches „Downsizing“ zur Auslegung der 3 kW Maschine nicht optimal war, wurden zusätzliche finanzielle Mittel gesucht, um eine tiefer gehende Optimierung der Maschine durchführen zu können, als dies in diesem Projekt ursprünglich vorgesehen war.

Diese zusätzlichen finanziellen Mittel konnten bei der « réserve stratégique de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) » gefunden werden. Bestandteil des Pflichtenheftes der HES-SO war, dass die 3 kW Prototyp-Maschine auch im generatorischen Betrieb verwendet werden können muss.

Im Verlaufe dieses Projektes gingen sowohl die Technocon AG wie auch die Bartholdi AG Konkurs. Zur Fertigstellung dieses Entwicklungsprojektes übernahm die Vivatec GmbH die Arbeiten der Technocon AG, während die Arbeiten der Bartholdi AG durch die Gebrüder Meier AG übernommen wurden.

2. Umrichter und Maschine 1200 kW

2.1 Auslegung des Gesamtsystems

Die Auslegung von Umrichter und Maschine wurden in mehreren Iterationsschritten auf einander abgestimmt, so dass hinsichtlich des Gesamtsystems ein Optimum gefunden werden konnte.

So wurden gleichzeitig mit den verschiedenen Maschinenberechnungen auch die Abstimmung der Daten mit dem Umrichter durchgeführt. Massgebend waren dabei insbesondere die Leerlaufspannung innerhalb des im Einsatz auftretenden Drehzahlbereichs sowie die Streuinduktivität. Für beide Parameter konnten Werte gefunden werden, welche sowohl für Maschine wie auch Umrichter gut passten.

Der Gesamtwirkungsgrad konnte optimiert werden und die notwendigen Schutzeinrichtungen zur Beherrschung aller möglicher Störfälle wurden auf einander abgestimmt.

2.2 Auslegung des Umrichters

Die Auslegung des Umrichters basierte auf den Grundkonzepten des bereits bei Technocon vorhandenen Umrichters kleinerer Bauleistung (750 kW). Dieser verfügte bereits über die kleinsten Abmessungen für einen Umrichter dieser Leistungsklasse.

Der Umrichter besteht aus 2 unabhängigen Leistungsteilen, welche symmetrisch in den Schrank eingebaut werden. Beide Leistungsteile werden von einem einzigen Ventilator mit Kühlluft versorgt. Jeder Leistungsteil besteht aus 6 IGBT-Modulen, diese bilden die 3 maschinenseitigen und die 3 netzseitigen Phasen. Ihre Gleichspannungsanschlüsse sind zu einem gemeinsamen Spannungszwischenkreis zusammengeschaltet.

Dieser Umrichter wurde so weiter entwickelt, dass die doppelte Leistung (d.h. mindestens 1500 kVA) in den fast unveränderten Abmessungen installiert werden konnte. Damit konnte eine sehr gute Ausnutzung des eingesetzten Materials erreicht werden.

Dies wurde insbesondere erreicht durch eine verbesserte Anordnung der Hauptstromschienen und -kabel sowie einer Aufteilung in modulare Baugruppen. Die Abmessungen des 1500 kW Umrichters betragen $B \times T \times H = 1700 \times 800 \times 2250 \text{ mm}^3$. Damit konnte gegenüber dem Vorläufer-Modell bei bloss 3% grösserem Volumen die doppelte Leistung erreicht werden. Nach neusten Berechnungen ist zu erwarten, dass bei unveränderten Schrankabmessungen bis zu 2000 kW Bauleistung erreicht werden könnten.

Trotz dieser sehr kompakten Konstruktion des Umrichters konnten die Zugänglichkeit verbessert und der Montageaufwand reduziert werden. Mit der besseren Zugänglichkeit können Reparaturzeiten reduziert und somit die Verfügbarkeit erhöht werden. Die Reduktion des Montageaufwandes wirkt sich direkt auf die Kosten des Umrichters aus. Trotz der kompakten Bauweise des Umrichters blieb der Aufbau funktional und übersichtlich.

Um dieses Optimum an Kompaktheit, Zugänglichkeit und Montagefreundlichkeit erreichen zu können, wurde die Konstruktion des Umrichters komplett mit einem 3D-CAD-Programm durchgeführt (siehe Figur 1). Dies erforderte einen grossen Initialaufwand, ermöglicht es aber später weitere Optimierungen oder Weiterentwicklungen mit geringem Aufwand durchführen zu können.

Trotz der kompakten Bauweise des Umrichters blieb der Aufbau funktional und übersichtlich.

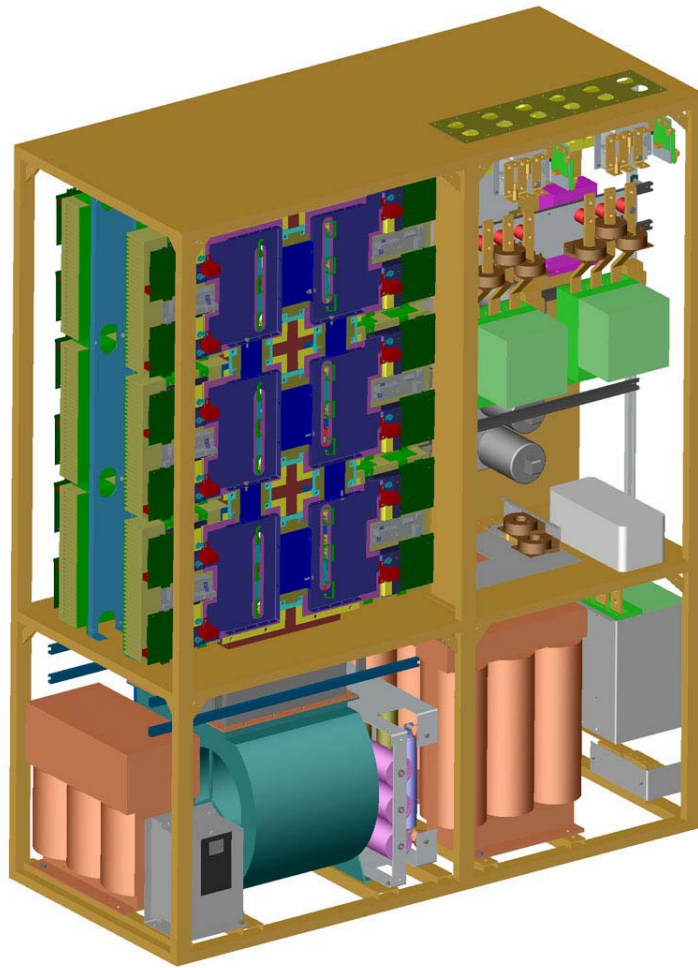


Fig. 1: Konstruktionszeichnung in 3D-CAD des 1200 kW Umrichters

Um den für den Umrichter notwendigen Materialeinsatz zu minimieren, wurde folgende Optimierungen vorgenommen:

- Möglichst geringe Anzahl Bauteile
- Möglichst wenige Messwandler
- Hohe Leistungsdichte, dadurch kleiner Schrank, d.h. wenig Montagematerial
- Intelligentes konstruktives Konzept: z.B. kurze Kabel, wenig zusätzliches Montagematerial

Die Minimierung der Anzahl Bauteile führt auch zu einer höheren Verfügbarkeit des Umrichters.

Zusätzlich wurde ein konsequentes, auf die Daten der Maschine abgestimmtes Schutzkonzept erarbeitet. Dieses Schutzkonzept muss Schäden im Umrichter oder anderen Anlagenteilen vermeiden, wenn das System vom Normalbetrieb abweicht (z.B. Überdrehzahl der Maschine, Unterbruch der Netzspannung). Ausserdem soll es bei Ausfall eines Bauteiles Folgeschäden weitgehend vermeiden.

Mithilfe eines Computer-Simulationsprogramms (Simplorer) wurde der Wirkungsgrad für alle Arbeitspunkte berechnet und optimiert. In dieser Simulation wurden die Regelung und der Leistungsteil des Umrichters komplett abgebildet und direkt die Verluste anhand der vorliegenden Datenblattwerte der massgebenden Komponenten berechnet.

Ein hoher Wirkungsgrad wurde insbesondere durch folgende Massnahmen erreicht:

- Intelligente Steuerung des Kühl-Ventilators
- Optimierte Auslegung des Netzfilters
- Moderate Schaltfrequenz der IGBTs

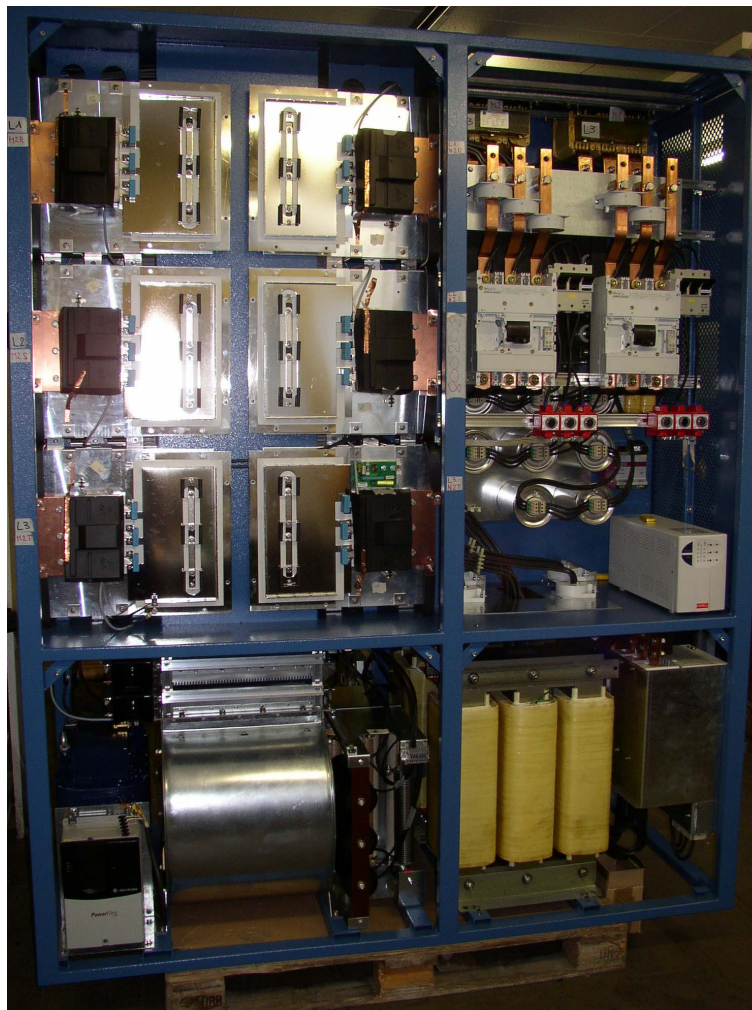


Fig. 2: Prototyp des 1200 kW Umrichters kurz vor der Fertigstellung

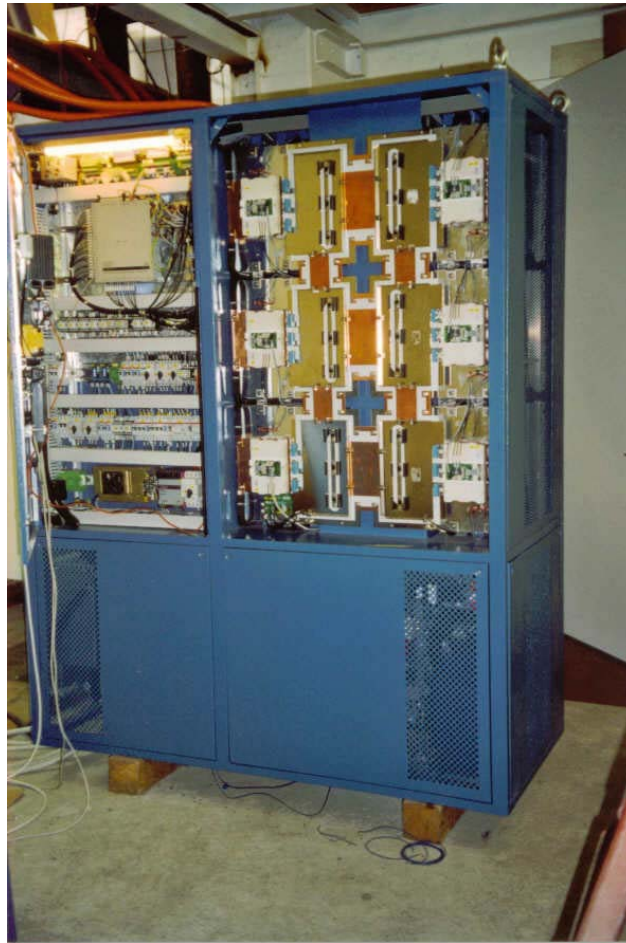


Fig. 3: Ansicht des 1200 kW Umrichter mit geöffnetem Control-Feld und geöffnetem IGBT-Feld

Die Regelung wurde im TUCS, dem Standard-Control-System von Technocon, komplett digital implementiert. Der maschinenseitige Regelkreis wurde so ausgeführt, dass auf einen Winkelgeber verzichtet werden kann. Auf der Netzseite können Wirk- und Blindleistung unabhängig voneinander geregelt werden.

2.3 Auslegung der Maschine

Bei der Entwicklung der Maschine wurden anfänglich 3 Konstruktionskonzepte verfolgt und mit einander verglichen. Das gewählte Konzept wurde anschliessend in mehreren Schritten optimiert.

Es konnte ein sehr guter Kompromiss zwischen Wirkungsgrad, Materialaufwand und Fertigungskosten gefunden werden.

Viel zeitlicher Aufwand wurde in die fertigungstechnischen Optimierungen investiert. Diese waren nötig, um die vorgesehenen Kostenziele für die Maschine zu erreichen.

Bei der Auslegung der Maschine wurden insbesondere folgende Verbesserungen vorgenommen:

- Verbesserter Magnetkreis
- Vereinfachter Wicklungsaufbau
- Erhöhung der Kraftdichte im Luftspalt (ca. 60 kN/m² statt wie bisher 30 – 40 kN/m²)

- Verbesserung des Wirkungsgrads auf ca. 95.8% (statt 83 .. 91% wie beim konventionellen Synchronmotor)
- Reduktion des Gewichtes (um ca. 30% gegenüber dem konventionellen Synchronmotor)

Der erreichte Wirkungsgrad liegt mit 95.8% über den Erwartungen. Das war insbesondere dank zusätzlichen Verbesserungen im Magnetkreis möglich.



Fig. 4: 1200 kW Maschine, liegend

2.4 Realisierung und Messungen

2.4.1 Tests am Umrichter

Folgende Tests wurden mit dem Umrichter durchgeführt:

- Spannungsprüfung (d.h. Überprüfung der Spannungsfestigkeit des Aufbaus)
- Überprüfung aller Funktionen
- Prüfung der Kommunikation über RS232-Schnittstelle und Ethernet
- Überprüfung der Diagnose-Funktionen und der Bedienung
- Überprüfung der Kühlluft-Verteilung, dh Luftmenge in jedem Kühlkörper

Diese Tests wurden erfolgreich durchgeführt. Die weiteren Tests wurden zusammen mit der Maschine durchgeführt.

2.4.2 Tests an der Maschine

Folgende Tests wurden mit der Maschine durchgeführt:

- Spannungsprüfung (d.h. Überprüfung der Spannungsfestigkeit des Aufbaus)
- Überprüfung der Datenblatt-Parameter

Diese Tests wurden erfolgreich durchgeführt. Die weiteren Tests wurden zusammen mit dem Umrichter durchgeführt.

Aus der Messung der Datenblatt-Werte konnte der Wirkungsgrad der Maschine berechnet werden (Fig. 5). Es wurde ein Wert von 95.77% bei Nennbetrieb erreicht.

Leerlauf-Verluste total	29600	W
Nennstrom	547	A
Ohmscher Widerstand	0.0118	Ohm
Kupfer-Verluste einer Phase	3531	W
Kupfer-Verluste total	21184	W
Pleerlauftot	29600	W
Verluste total bei Nennbetrieb	50784	W
Nennleistung	1200000	W
Wirkungsgrad	95.77	%

Fig. 5: Berechnung des Wirkungsgrades der 1200 kW Maschine

2.4.3 Tests am Gesamtsystem

Um den Aufwand für die Tests am Gesamtsystem zu reduzieren, wurde ein neues Testverfahren realisiert. Mit diesem Testverfahren wurden ausser dem Umrichter und der Maschine keine weiteren Anlagenteile wie Belastungsmaschine, Rückspeisenumrichter, leistungsfähiger Netzanschluss, Drehzahlgeber usw. benötigt.

Dieses Testverfahren wurde bereits bei der Auslegung von Maschine und Umrichter berücksichtigt:

- Die Maschine weist 2 von einander unabhängige 3-phasige Statorsysteme auf
- Der Umrichter besteht aus 2 von einander unabhängigen 600 kW Systemen, die unabhängig von einander geregelt und in beide Energierichtungen arbeiten können
- Der Umrichter ist mit einer Software sowohl für motorischen wie auch generatorischen Betrieb ausgerüstet, welche in beiden Fällen keinen Drehzahlgeber benötigt.

Mit diesen Voraussetzungen war es möglich, über jeweils ein Umrichter- und Maschinen-System die Maschine anzutreiben und mit dem anderen System zu bremsen. So konnte die elektrische

Leistung „im Kreis herum“ fließen und der Netzanschluss musste lediglich die Umrichter- und Maschinenverluste aufbringen.

Mit dieser Testmethode konnte beinahe Nennleistung gefahren werden. Dies war nicht selbstverständlich, denn regelungstechnisch ist diese Testmethode sehr anspruchsvoll, da das mechanische Trägheitsmoment sehr klein und damit das System ziemlich instabil ist.

Um Maschine und Umrichter dennoch mit Nennstrom belasten zu können, wurde zusätzlich zum Wirkstrom noch ein Blindstrom erzeugt, so dass die Summe dem Nennstrom entsprach.

In diesem Versuchsaufbau wurden umfangreiche Messungen vorgenommen (siehe Anhang 2, 3):

- Messung der Kurvenformen von allen Spannungen und Strömen
- Detaillierte Ausmessung der Maschine durch die Firma Sensoplan AG
- Erwärmungsmessungen an Maschine und Umrichter
- Wirkungsgradmessungen an Maschine und Umrichter
- Prüfung von diversen Störfällen wie Netzabschaltung oder Maschinenklemmen-Kurzschluss

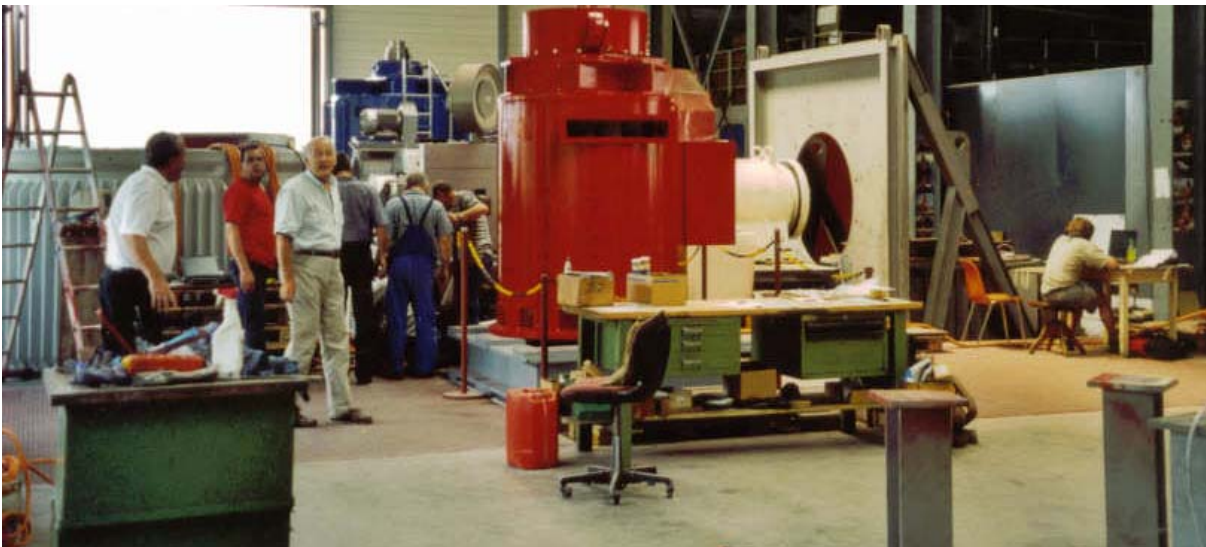


Fig. 6: Prüfung des 1200 kW Systems

links: Maschine; rechts: Bedienung des Umrichters und Messwertanalyse über Laptop

Alle Messungen wurden erfolgreich durchgeführt. Es traten keine Schäden auf und Design-Änderungen waren weder an Maschine noch Umrichter nötig.

Alle im voraus berechneten Werte (Spannungen, Ströme, Datenblattwerte, Wirkungsgrad) wurden bestätigt.

Im folgenden sind einige der Testergebnisse aufgeführt:

Betrieb des Gesamtsystems mit 25 rpm und 465 A (motorisch) bzw. 400 A (generatorisch):

Figur 6 zeigt die Motorströme, Figur 7 die Netzströme.

Über 1.6 Sekunden wurden die Wirkleistungen bei beiden Systemen gemessen und gemittelt:

System1: -543 kW

System2: +548 kW

Diese Messwerte haben allerdings eine unzureichende Genauigkeit, um den Wirkungsgrad des Gesamtsystems zu bestimmen.

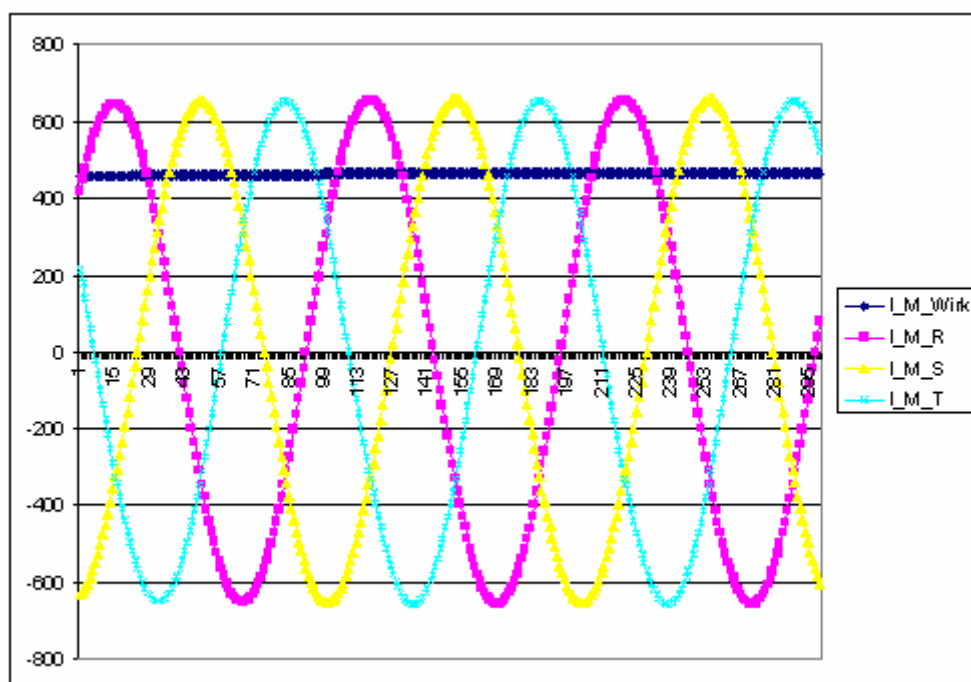


Fig. 7: Motorströme [A] von System 1

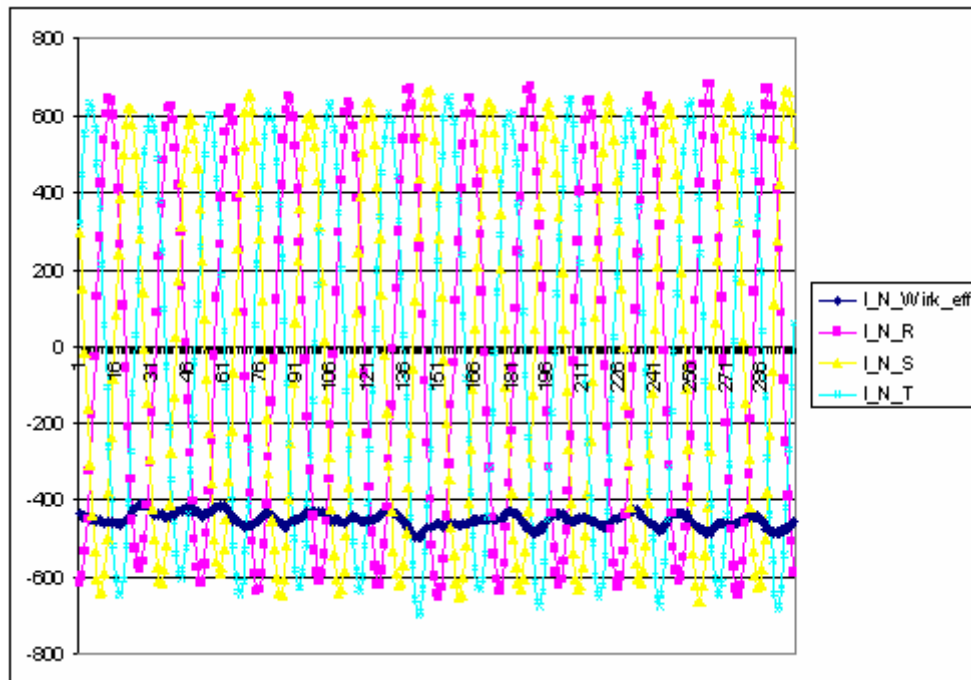


Fig. 8: Netzströme von System 1

Betrieb des Gesamtsystems mit 25 rpm und Nennstrom:

Messung der Umrichterverluste aufgrund der Erwärmung der IGBT-Kühlkörper:

Das Gesamtsystems wird mit 25 rpm und Nennstrom betrieben:

Temperaturen der IGBT-Kühlkörper auf der Motorseite (die Umgebungstemperatur betrug 23 °C):

	Sytem 1	System 2
Phase U	55 °C	55 °C
Phase V	60 °C	55 °C
Phase W	55 °C	55 °C

Daraus kann der Wirkungsgrad des Umrichters bei Nennstrom berechnet werden:

Lufttemperatur	23°C			
Thermischer Widerstand des Kühlkörpers	15 K/kW			
Temperatur Kühlkörper 1	55°C	Verluste IGBT 1	2133 W	
Temperatur Kühlkörper 2	55°C	Verluste IGBT 2	2133 W	
Temperatur Kühlkörper 3	55°C	Verluste IGBT 3	2133 W	
Temperatur Kühlkörper 4	55°C	Verluste IGBT 4	2133 W	
Temperatur Kühlkörper 5	55°C	Verluste IGBT 5	2133 W	
Temperatur Kühlkörper 6	60°C	Verluste IGBT 6	2467 W	
		Verluste IGBT total 1 System	13133 W	
		Verluste IGBT total beide Systeme	26267 W	
		Leistung Ventilator	3500 W	
		Verluste Netzfilter	2000 W	
		übrige Verluste	1000 W	
				W
		Verluste total	32767 W	
				W
		Nennleistung	1200000 W	
		Wirkungsgrad	97.27%	

Diese Messung ergibt also einen Umrichter-Wirkungsgrad von ca. 97.3%.

Berechnung des Wirkungsgrades aus der Netz-Versorgungsleistung:

Das Gesamtsystems wird mit 25 rpm und Nennstrom betrieben.

Es wurden die folgenden Netz-Versorgungsleistungen gemessen:

System 1: -31 kW

System 2: -14 kW

Dies ergibt eine Gesamt-Versorgungsleistung von 45 kW. Dieser Wert entspricht den Gesamtverlusten des Systems (Umrichter und Maschine) im Nennbetrieb. Daraus lässt sich ein Gesamtwirkungsgrad von über 96% berechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dieser Messung auch die durch den Umrichter verursachten Zusatzverluste der Maschine berücksichtigt sind. Somit sind diese Resultate sehr aussagekräftig.

Dieser Wert konnte mit guter Genauigkeit ermittelt werden und liegt erheblich über dem aus den einzelnen Werten für Umrichter und Maschine berechneten Gesamtwirkungsgrad (93.1%).

Im weiteren wird dennoch mit dem tieferen Wert (93.1%) für den Wirkungsgrad gerechnet.

2.5 Bewertung

2.5.1 Reduktion der Baugrösse

Der Umrichter konnte sehr kompakt konstruiert werden bei zusätzlich verbesserter Zugänglichkeit und reduziertem Montageaufwand. Dies wurde insbesondere erreicht durch eine verbesserte Anordnung der Hauptstromschienen und –kabel sowie einer Aufteilung in modulare Baugruppen.

Die Abmessungen des 1200 kW Umrichters betragen $B \times T \times H = 1800 \times 800 \times 2250 \text{ mm}^3$.

Damit konnte gegenüber dem Vorläufer-Modell bei bloss 3% grösserem Volumen die doppelte Leistung erreicht werden.

2.5.2 Reduktion des Gewichts

Das Gewicht der Maschine konnte gegenüber dem konventionellen Synchronmotor um ca. 30% reduziert werden.

2.5.3 Nachweis der Auslegungsdaten des 1200 kW Systems

Das gewählte Testverfahren mit Verzicht auf eine Belastungsmaschine erwies sich dank dem geringen Aufwand als sehr praktikabel und lieferte aussagekräftige Resultate.

Die umfangreichen Versuche im Prüffeld der Firma Bartholdi verliefen erfolgreich. Maschine und Umrichter konnten mit den Nenndaten betrieben werden, ohne dass es zu unzulässigen Belastungen kam.

Auch das Verhalten bei möglichen Störfällen, zB Netzausfall oder Kurzschluss der Maschinenklemmen, wurde erfolgreich getestet.

2.5.4 Nachweis des Wirkungsgrads des 1200 kW Systems

Die Maschine wurde in mehreren Schritten optimiert. Es konnte ein sehr guter Kompromiss zwischen Wirkungsgrad, Materialaufwand und Fertigungskosten gefunden werden. Der erreichte Wirkungsgrad liegt mit 95.8% über den Erwartungen. Das war insbesondere dank zusätzlichen Verbesserungen im Magnetkreis möglich.

Für den Umrichter konnte ein Wirkungsgrad von 97.3% gemessen werden, was ebenfalls über den Erwartungen lag.

Aus diesen Werten kann ein Gesamtwirkungsgrad des Systems von 93.1% berechnet werden.

Somit werden die Verluste des Gesamtsystems total bei nur ca. 6.9% liegen. Im Vergleich zu den angestrebten Verlusten von 8% ist das eine Reduktion um ca. 14%, im Vergleich zum konventionellen System sogar um ca. 37%.

3. Umrichter und Maschine 3 kW

3.1 Auslegung des Gesamtsystems

Aufgrund der Topologie des 1200 kW Systems wurde eine erste Dimensionierung der Komponenten im Leistungsbereich von 1kW bis 100kW durchgeführt und simuliert.

Die Dimensionierung wurde für eine Drehzahl von einer Umdrehung pro Sekunde durchgeführt. Insbesondere wurde auch untersucht, welche minimalen Drehzahlen realisierbar sind.

Die Leistung des Prototyps wurde so festgelegt, dass die Tests mit den bestehenden Möglichkeiten an der Hochschule Wallis durchgeführt werden können. Man entschied sich deshalb für eine Nennleistung von 3 kW.

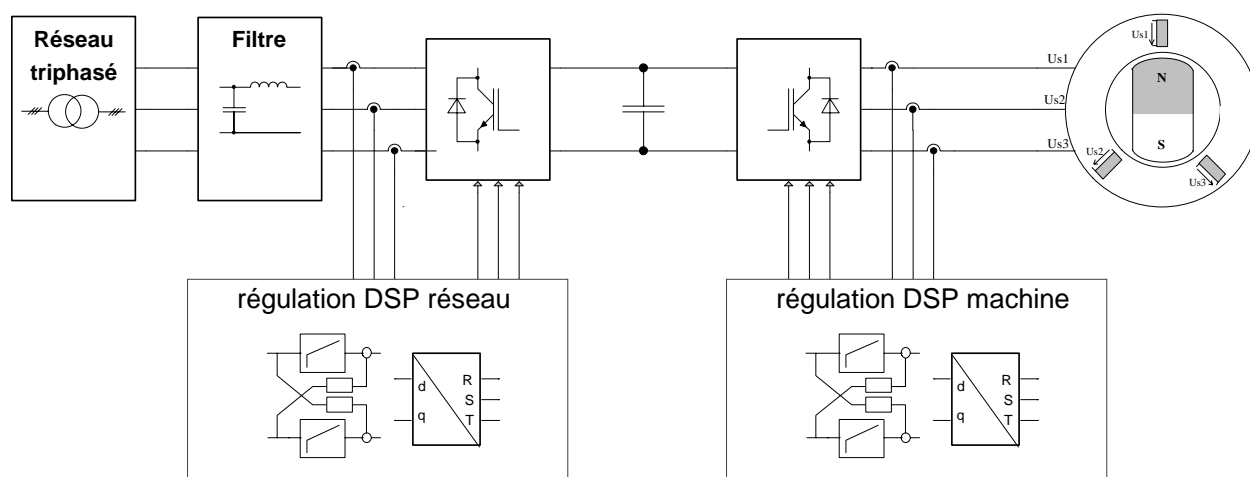


Fig. 9: Blockschema des realisierten Systems.

3.2 Auslegung des Umrichters

Die Bedienung und Regelung des Antriebes musste möglichst kostengünstig sein. Aus diesem Grund war es nicht möglich, den gleichen Controller wie beim 1200 kW Antrieb (TUCS) zu verwenden. Deshalb wurden die an der Hochschule Wallis optimierten kostengünstigen Leistungsmodule und Regler eingesetzt.

Der Umrichter besteht aus zwei dreiphasigen Wechselrichtern mit abschaltbaren Halbleitern. Für die Leistungsmodule wurden MOSFET-Labormodule verwendet. Die Schaltfrequenz beträgt 20 kHz.

Aufgrund dieser hohen Schaltfrequenz mussten auf der Netzseite nur kleine Filter verwendet werden.

Zur Ansteuerung der MOSFETs wurden zuerst analog ausgeführte Regelkreise untersucht, welche dann durch ein komplett digitales System ersetzt wurden. Das digitale Regelsystem besteht aus zwei Signalprozessoren (DSPs), der eine für die Netzseite, der andere für die Maschinenseite. Für eine zukünftige Anwendung wäre es möglich, beide Regler in einem einzigen DSP zu integrieren.

Spezielle Anstrengungen wurden unternommen um verschiedene Regelkonzepte, sowohl auf der Netz- wie auch auf der Maschinenseite, zu vergleichen.

3.2.1 Netzseitiger Wechselrichter

Der netzseitige Wechselrichter, links in der Figur 9, produziert eine konstante Zwischenkreisspannung für den maschinenseitigen Wechselrichter. Er bezieht Wirkleistung aus dem Netz wenn die Maschine im motorischen Betrieb ist und gibt Wirkleistung ans Netz ab, wenn die Maschine im generatorischen Betrieb ist.

Es wurde eine dreiphasige Brücke mit abschaltbaren Halbleitern (MOSFETs) verwendet. Diese Schaltung hat gegenüber einem Dioden-Gleichrichter den Vorteil, dass sie die Zwischenkreisspannung regeln und hochsetzen kann, Energie in beide Richtungen übertragen kann und nur geringe Oberschwingungen im Netz verursacht.

Es wurden verschiedene Regelkonzepte überprüft, zuerst in analoger, danach in digitaler Schaltungstechnik. Schlussendlich wurde eine Drehzeiger-Vektorregelung gewählt, welche in einem DSP implementiert wurde. Diese Regelung ist sehr ähnlich zur Regelung des maschinenseitigen Wechselrichters, wodurch einige Synergien bei der Entwicklung und Software-Erstellung genutzt werden konnten.

Zur Erzeugung des Schaltmusters der MOSFETs wurde die Pulsweiten-Modulation mit Injektion der dritten Harmonischen (ausführlich beschrieben in [1]) verwendet. Dasselbe Verfahren wurde auch beim maschinenseitigen Wechselrichter eingesetzt.

Figur 10 zeigt, dass durch das Hinzufügen eines Dreieck-Signals in jeder Phase eine geringere Modulation ausreicht, um die gewünschte Spannung zu erhalten. Dadurch kann die Zwischenkreisspannung um 15% reduziert werden, was auch zu einer Reduktion der Schaltverluste führt.

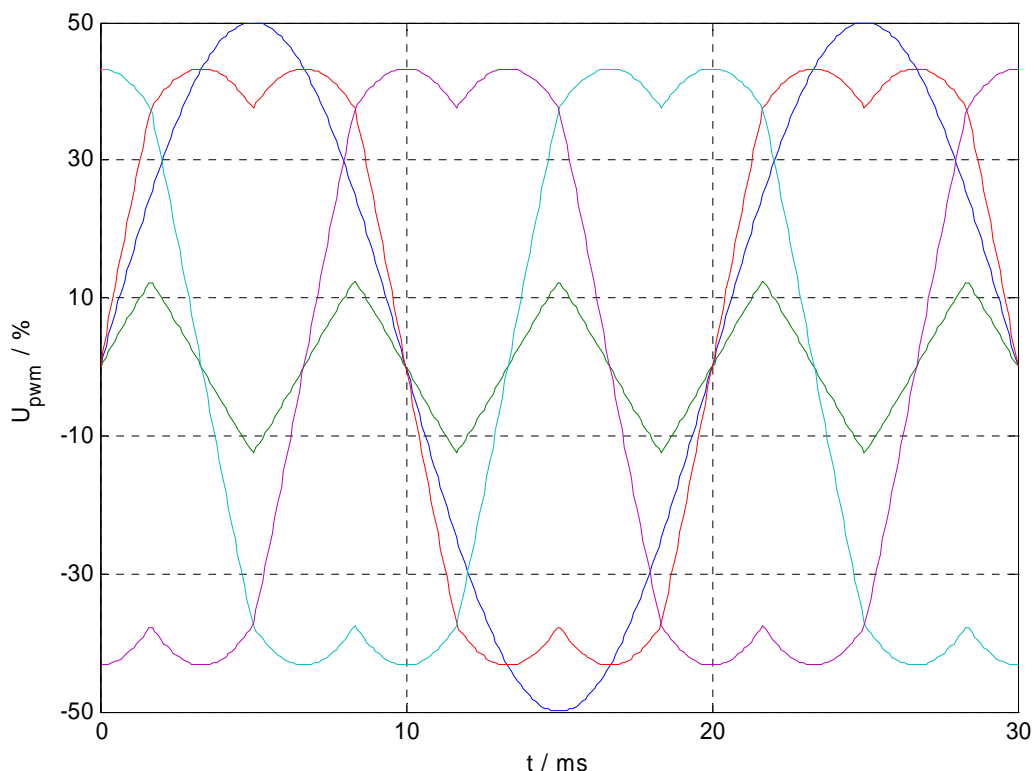


Fig. 10: Modulation mit Injektion der 3. Harmonischen

Zur Synchronisierung des Referenzsystems der Regelung mit der Phasenlage des Netzes wurde ein System basierend auf einem PLL (Phase-Lock-Loop, siehe [2]) entwickelt. Dieses System verhielt sich sehr robust bei Netzstörungen, bei Netzunsymmetrien und bei Netzharmonischen. Figur 11 zeigt als Beispiel das Verhalten des PLLs bei einem Phasensprung um 30 Grad.

Bei den Messungen zeigte es sich, dass die Netz-Harmonischen die durch den PLL erzeugte Frequenz nicht beeinflussen.

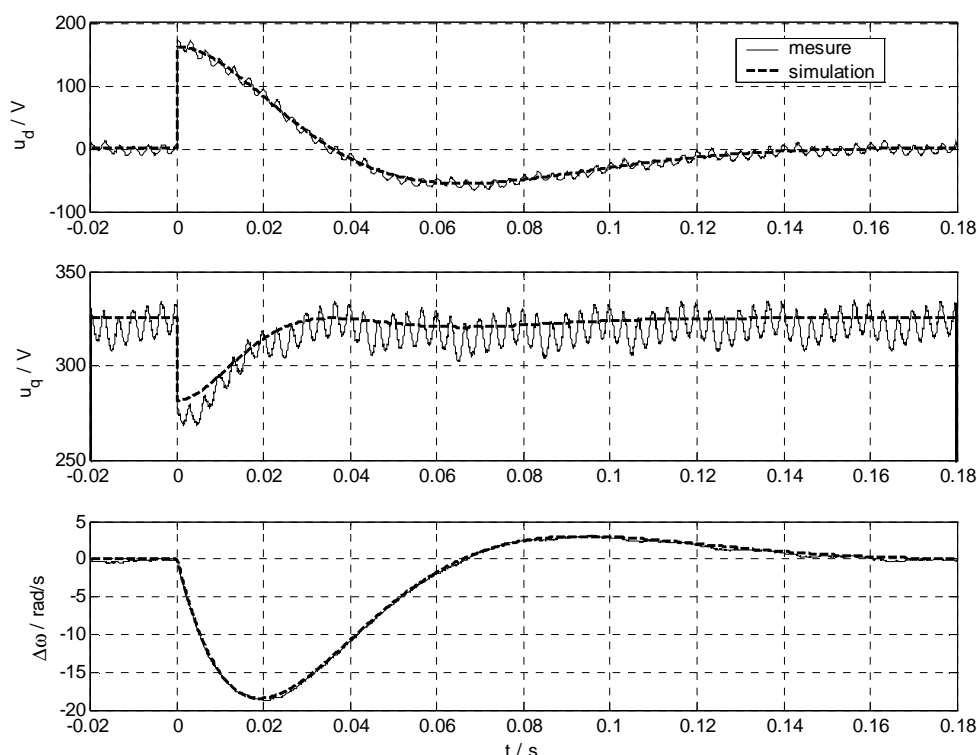


Fig. 11: Verhalten des PLL bei 30° Phasensprung (u_d , u_q und Frequenz ω)

3.2.2 Maschinenseitiger Wechselrichter

Die Leistungsmodule des maschinenseitigen Wechselrichters und das Modulationsverfahren sind identisch zum netzseitigen Wechselrichter.

Es wurden verschiedene Konzepte für die antriebsseitige Regelung analysiert:

Zuerst wurde eine analoge Regelung mit Spannungs-Frequenz-Kennlinie realisiert. Diese kann einfach in Betrieb genommen werden und eignet sich gut für generatorische Anwendungen (siehe auch [3]).

Danach wurde eine digitale Regelung mittels einer einfachen Spannungs-Frequenz-Kennlinie, implementiert in einem DSP (digitaler Signalprozessor) überprüft.

Um auch eine leistungsfähige Regelung für den motorischen Betrieb realisieren zu können, entschied man sich für den Einsatz einer digitalen Regelung mit einem Signalprozessor.

Deshalb wurde die Regelung mittels eines DSPs vertieft untersucht. Das Antriebssystem wurde mithilfe der Programme Matlab und Simploter simuliert, um die Funktionsweise der Regelung zu überprüfen und geeignete Parameter zu evaluieren.

Figur 12 zeigt die Funktionsweise der Regelung des maschinenseitigen Wechselrichters, simuliert mit Simploter.

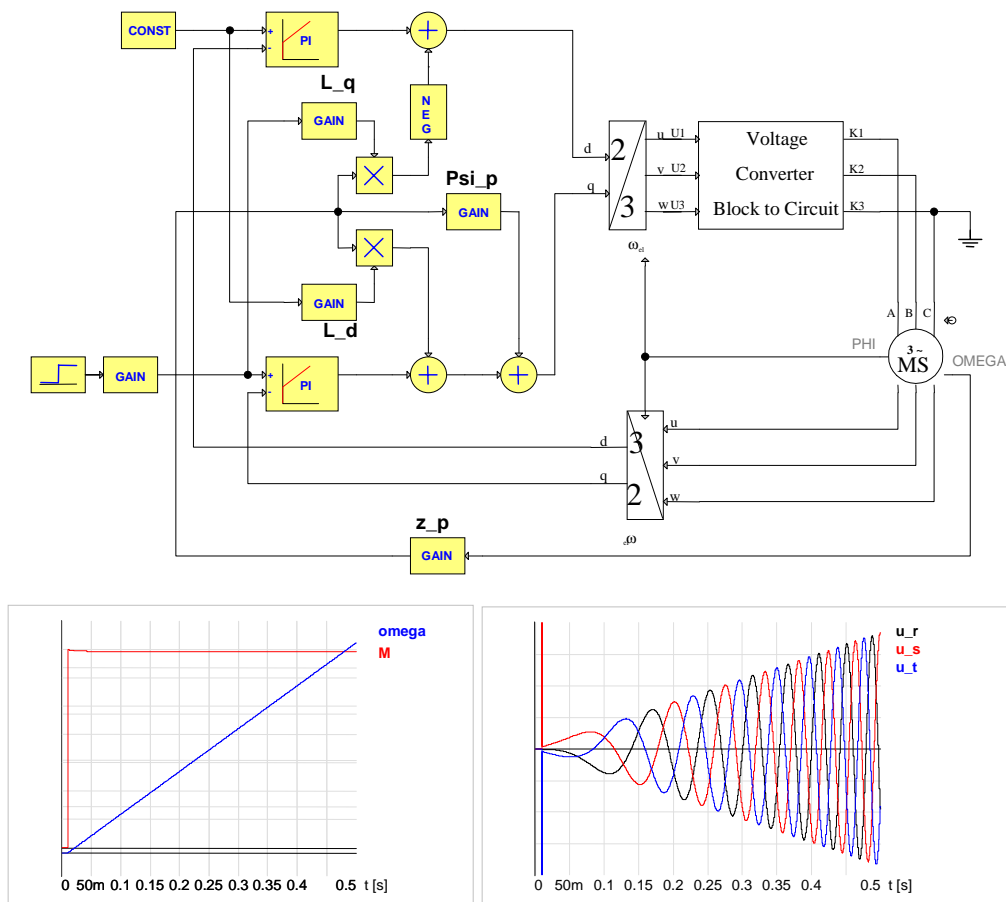


Fig. 12 : Simulation des maschinenseitigen Wechselrichters
(Schema, Moment, Frequenz ω und Maschinenspannungen)

Die Stromregelung wurde im rotorseitigen Referenzsystem durchgeführt (siehe [4]). Dazu werden die dreiphasigen Größen umgerechnet auf 2 Werte in der komplexen Ebene. Einer dieser Werte ist proportional zum Moment, der andere wird auf null geregelt.

Die beiden Grafiken in Figur 12 zeigen das Verhalten des Motors beim Hochlaufen: Die Grafik links zeigt Moment und Winkelgeschwindigkeit, die Grafik rechts zeigt die Phasenspannung des Wechselrichters.

Rotorwinkel-Beobachter:

Da die Regelung im rotorseitigen Referenzsystem gerechnet wird, muss die Winkellage des Rotors permanent bekannt sein. Eine einfache aber teure Methode ist die Installation eines Winkelgebers auf der Rotorwelle. Eine effiziente Methode zur Reduktion der Gesamtkosten ist der Ersatz des Winkelgebers durch eine Software, welche den Rotorwinkel berechnen kann. Diese Software wird Beobachter genannt.

Mit diesem Beobachter kann über einen weiten Drehzahlbereich gearbeitet werden, da er bereits ab 10% der Nenn Drehzahl funktioniert.

Die Regelung verwendet die durch den Beobachter berechneten Werte für die Winkellage und die Geschwindigkeit. Es wurde an der Maschine dennoch ein Winkelgeber montiert, welcher jedoch lediglich zur Kontrolle der Beobachter-Software verwendet wird.

Figur 13 zeigt die Robustheit eines solchen Systems bei einem Phasensprung um 180 Grad.

Der Beobachter benötigt weniger als eine elektrische Periode um wieder den tatsächlichen Rotorwinkel zu berechnen.

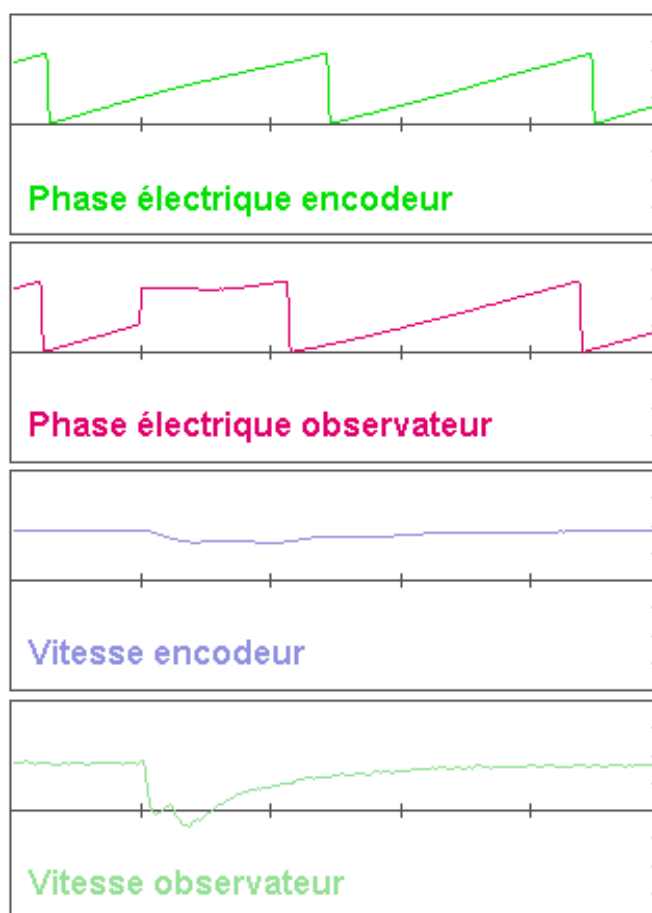


Fig. 13: Phasen-Schrittantwort des Beobachters
(Phasenlage gemessen und berechnet, Drehzahl gemessen und berechnet)

3.3 Auslegung der Maschine

So weit möglich wollte man die Erfahrungen bei der Dimensionierung der 1200 kW Maschine für die Auslegung der Maschine kleinerer Leistung übernehmen.

Bei den ersten Berechnungen der 3 kW Maschine musste man jedoch feststellen, dass das ursprünglich vorgesehene „Down-Scaling“ der 1200 kW Maschine zu keiner optimalen Lösung führt. Ein praktischer Einsatz der „Down-Scale“-Variante wäre aufgrund der Kosten und Abmessungen weitgehend unmöglich gewesen.

Die Auslegung des Magnetkreises, die elektrische Auslegung sowie die konstruktive Auslegung wurden deshalb komplett neu ausgeführt um so eine optimale Ausführung hinsichtlich Wirkungsgrad, Materialaufwand und Kosten zu erreichen.

Da diese Optimierung nur in mehreren iterativen Schritten zu erreichen war, wurde sehr viel Zeit in das Design der 3 kW Maschine investiert.

Verschiedene Varianten von permanenterregten Synchronmaschinen (mit radialer und transversaler Anordnung der Magnete) wurden dimensioniert und mittels eines Feldberechnungs-Programmes die elektromagnetischen Eigenschaften simuliert (siehe Anhang 1).

Einen grossen Einfluss auf die Auslegung dieses Maschinen-Typs hat das Verhältnis Polpaarzahl zu Stator-Nuten-Zahl. Deshalb musste diesem Verhältnis spezielle Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Verschiedene Verhältnisse Polpaarzahl / Stator-Nuten-Zahl wurden iterativ untersucht um das Reluktanzmoment zu minimieren. Jeder Iterationsschritt beinhaltete eine elektromagnetische Auslegung der Maschine, eine elektromagnetische Simulation und ein Konstruktionskonzept. Dazu war eine enge Zusammenarbeit zwischen den Berechnern und den Konstrukteuren notwendig.

Um die iterative Auslegung der Maschine zu vereinfachen, wurde an der Hochschule Wallis ein Software-Tool zur Grobdimensionierung von permanenterregten Synchronmaschinen entwickelt. Dank den im Programm berechneten physikalischen Gleichungen, welche das Verhalten der Maschine beschreiben, kann der Anwender verschiedene Werte wie z.B. Volumen und Wirkungsgrad abhängig von Parametern wie Umdrehungszahl, mechanische Leistung und Spannung abschätzen.

Eine Übersicht dieses Berechnungsprogrammes, welches in Excel erstellt wurde, ist in Figur 14 dargestellt.

Données annexes		Rotor externe		Rotor interne	
Ω	= 6.283E+00 [rad/s]	Ω	= 6.283E+00 [rad/s]	Ω	= 6.283E+00 [rad/s]
M	= 4.775E+02 [Nm]	M	= 4.775E+02 [Nm]	M	= 4.775E+02 [Nm]
f	= 3.100E+01 [Hz]	f	= 3.100E+01 [Hz]	f	= 3.100E+01 [Hz]
R_{bnt}	= 4.382E-01 'x' geän.	R_{bnt}	= 4.382E-01 'x' geän.	R_{bnt}	= 4.382E-01 'x' geän.
K_A	= 1.348E-01 'x' geän.	K_A	= 1.348E-01 'x' geän.	K_A	= 1.348E-01 'x' geän.
d_g^4	= 3.270E-02	d_g^4	= 3.270E-02	d_g^4	= 3.270E-02
d_3	= 4.252E-01 [m]	d_3	= 4.252E-01 [m]	d_3	= 4.252E-01 [m]
d_{ext}	= 5.364E-01 [m]	d_{ext}	= 5.364E-01 [m]	d_{ext}	= 5.364E-01 [m]
l_i	= 1.063E-01 [m]	l_i	= 1.063E-01 [m]	l_i	= 1.063E-01 [m]
A_{en}	= 2.437E-02 [m ²]	A_{en}	= 2.437E-02 [m ²]	A_{en}	= 2.437E-02 [m ²]
h_n	= 4.678E-02 [m]	h_n	= 4.678E-02 [m]	h_n	= 4.678E-02 [m]
τ_p	= 2.155E-02 [m]	τ_p	= 2.155E-02 [m]	τ_p	= 2.155E-02 [m]
F_{out}	= 1.031E-03 [Vs]	F_{out}	= 1.031E-03 [Vs]	F_{out}	= 1.031E-03 [Vs]
h_{out}	= 8.815E-03 [m]	h_{out}	= 8.815E-03 [m]	h_{out}	= 8.815E-03 [m]
A_{cu}	= 1.706E-02 [m ²]	A_{cu}	= 1.706E-02 [m ²]	A_{cu}	= 1.706E-02 [m ²]
l_{cu}	= 1.710E-01 [m]	l_{cu}	= 1.710E-01 [m]	l_{cu}	= 1.710E-01 [m]
V_{ou}	= 2.917E-03 [m ³]	V_{ou}	= 2.917E-03 [m ³]	V_{ou}	= 2.917E-03 [m ³]
P_{ou}	= 2.657E+02 [W]	P_{ou}	= 2.657E+02 [W]	P_{ou}	= 2.657E+02 [W]
V_{red}	= 3.322E-03 [m ³] 'x' geän.	V_{red}	= 3.322E-03 [m ³] 'x' geän.	V_{red}	= 3.322E-03 [m ³] 'x' geän.
m_{red}	= 2.611E+01 [kg]	m_{red}	= 2.611E+01 [kg]	m_{red}	= 2.611E+01 [kg]
P_{red}	= 1.013E+02 [W]	P_{red}	= 1.013E+02 [W]	P_{red}	= 1.013E+02 [W]
V_{fec}	= 9.506E-04 [m ³]	V_{fec}	= 9.506E-04 [m ³]	V_{fec}	= 9.506E-04 [m ³]
m_{fec}	= 7.472E+00 [kg]	m_{fec}	= 7.472E+00 [kg]	m_{fec}	= 7.472E+00 [kg]
P_{fec}	= 1.083E+01 [W]	P_{fec}	= 1.083E+01 [W]	P_{fec}	= 1.083E+01 [W]
P_{tot}	= 3.779E+02 [W]	P_{tot}	= 3.779E+02 [W]	P_{tot}	= 3.779E+02 [W]
η	= 8.881E-01 [%]	η	= 8.881E-01 [%]	η	= 8.881E-01 [%]
A_{ext}	= 7.208E-01 [m ²]	A_{ext}	= 7.208E-01 [m ²]	A_{ext}	= 7.208E-01 [m ²]
T	= 4.369E+01 [°C]	T	= 4.369E+01 [°C]	T	= 4.369E+01 [°C]

Fig. 14: Berechnungsprogramm für permanenterregte Synchronmaschinen in EXCEL

Die Feldberechnungen (Elektromagnetische Simulationen), wurden mit dem Programm flux2D an der Hochschule Waadt durchgeführt. Um diese Feldberechnungen effizient vornehmen zu können, wurde eine Bedienoberfläche in *Visual Basic* programmiert.

Diese Simulationen erlaubten es, das Verhalten der Maschine abzuschätzen, in dem Parameter wie induzierte Spannung, Harmonische, statisches Moment und Reluktanzmoment berechnet werden.

Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Wirkungsgrad der Maschine gewidmet.

Basierend auf den Resultaten der verschiedenen Simulationen wurde eine Maschine mit 19 Polpaaren und 48 Stator-Nuten ausgewählt. Diese Maschine weist ein minimales Reluktanzmoment auf. Es handelt sich dabei um eine Maschine mit Innenläufer-Rotor.

Figur 15 zeigt das statische Moment und die Leerlaufspannung, berechnet mit dem Programm flux2D der Maschine 19/48

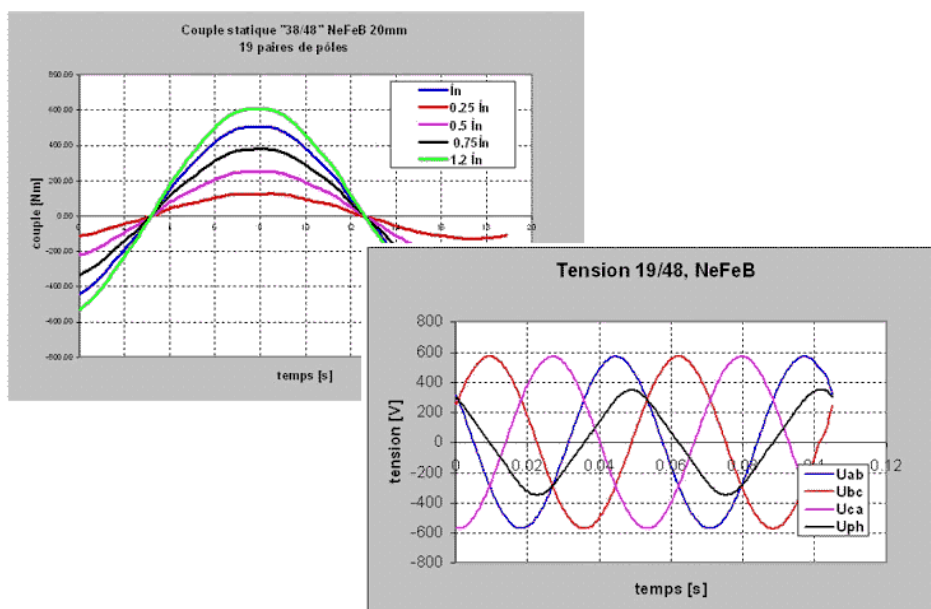


Fig. 15: statisches Moment und Leerlaufspannungen der Maschine 19/48, berechnet mit flux2D

So wurde ein gegenüber dem Down-Scaling erheblich verbessertes Design gefunden. Die 3 kW Maschine weist jetzt eine Länge von ca. 900mm, einen Durchmesser von ca. 530 mm und ein Gewicht von ca. 1100 kg auf.

Der Wirkungsgrad der ausgewählten Maschine wurde mit 91.3% berechnet.

Somit ist der Wirkungsgrad höher als bei den konventionellen, schnell-laufenden Maschinen, welche einen Wirkungsgrad von ca. 90% haben und zusätzlich noch die Getriebeverluste aufweisen.

Im Teillastbetrieb hat die permanentenerregte Synchronmaschine sogar einen noch deutlich besseren Wirkungsgrad als die konventionelle Maschine.

Die Konstruktion der 3 kW Maschine wurde durch die Firma Bartholdi AG begonnen und durch die Firma Gebrüder Meier AG abgeschlossen.

Um die Herstellkosten zu reduzieren wurde der Stator mit konzentrischen Wicklungen ausgeführt, was den wesentlichen Vorteil hat, dass diese Wicklungen ausserhalb der Maschine hergestellt werden können. Erst anschliessend werden die Wicklungen in den Stator eingesetzt. Somit wäre auch eine Automatisierung der Wickel-Herstellung möglich.

Die Herstellkosten einer solchen langsamlaufenden Maschine sind höher als bei einer konventionellen Maschine mit kleiner Polzahl. Dies hat 2 Gründe: einerseits ist die Statorwicklung komplexer (höhere Anzahl Stator-Nuten), andererseits sind die Permanentmagnete des Rotors sehr teuer und benötigen zusätzlich eine geeignete Befestigung um Probleme bei Überdrehzahl und Überhitzung zu vermeiden.

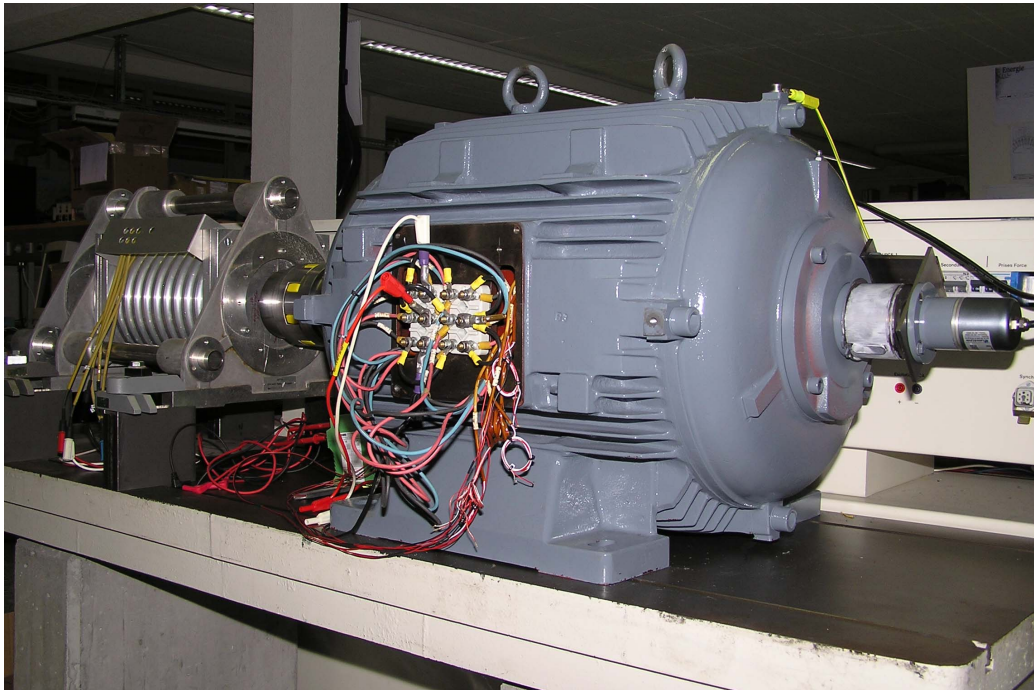


Fig. 17: Prüfaufbau an der Hochschule Wallis
links: Antriebsmaschine; rechts: 3 kW permanenterregte Synchronmaschine (Prüfling)

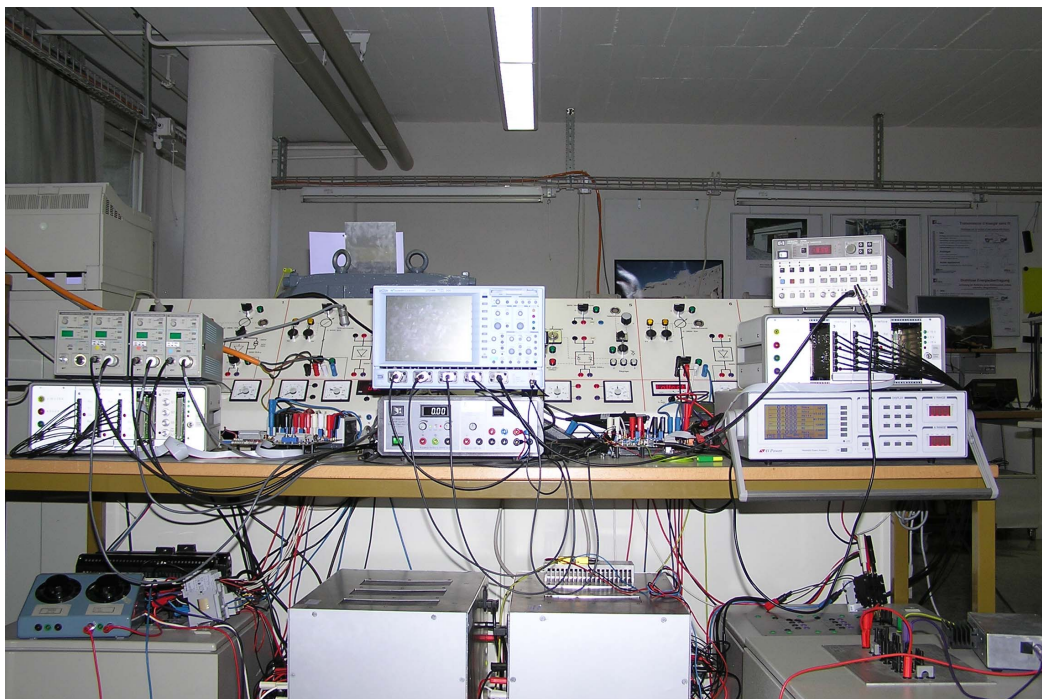


Fig. 18: Prüfaufbau an der Hochschule Wallis: Messgeräte

3.4.2 Lastmessungen

Die Messungen mit Nennleistung wurden in der Werkhalle der ehemaligen Bartholdi AG in Koblenz durchgeführt. Dort stand eine geeignete Testbank zur Verfügung. Verschiedene Lastmomente und Drehzahlen wurden geprüft, sowohl im motorischen wie auch im generatorischen Betrieb. In Figur 21 sieht man z.B. eine Messung im motorischen Betrieb.

Die Testbank bestand aus einer Gleichstrom-Maschine mit Drehmomentmessung und einem Getriebe. Diese Installation mit einem Moment von 4800 Nm war überdimensioniert. Die mechanischen Leerlaufverluste des Getriebes mussten von den gemessenen Werten subtrahiert werden. Dies war nötig, da die Genauigkeit der Wirkungsgrad-Messung im Bereich von 1 .. 2% lag.

Die Messungen im generatorischen Betrieb sind in Figur 22 zusammengefasst.

Der erwartete Wirkungsgrad von 91% bei Nennleistung wurde bestätigt. Auch der für eine permanenterregte Synchronmaschine erwartete hohe Teillastwirkungsgrad konnte bei den Messungen bestätigt werden.

Es konnten keine Vibrationen festgestellt werden, welche möglicherweise durch das Reluktanzmoment hätten verursacht werden können.

Aufgrund des Getriebes konnten keine auswertbaren Daten für den Wirkungsgrad im Motorbetrieb ermittelt werden. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass das Verhalten sehr gut dem generatorischen Betrieb entsprach.

Die Maschine wurde mit bis zur doppelten Nennleistung betrieben, ohne dass eine unzulässige Erwärmung der Wicklungen oder eine Sättigung festgestellt werden konnte. Die Stator-Temperatur ist während den Tests nicht über 45°C gestiegen.

Das lässt darauf schließen, dass die Maschine hinsichtlich Leistung und Abmessungen in Zukunft noch optimiert werden könnte.

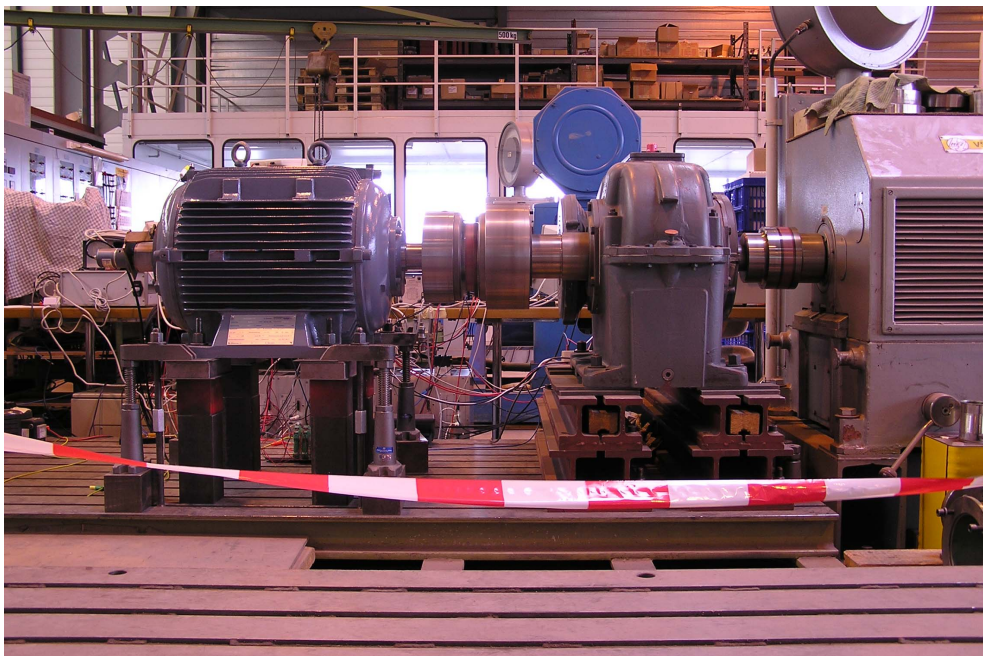


Fig. 19: Prüfaufbau bei Bartholdi AG

links: 3 kW permanenterregte Synchronmaschine (Prüfling); mitte: Getriebe; rechts: Antriebs-/Lastmaschine

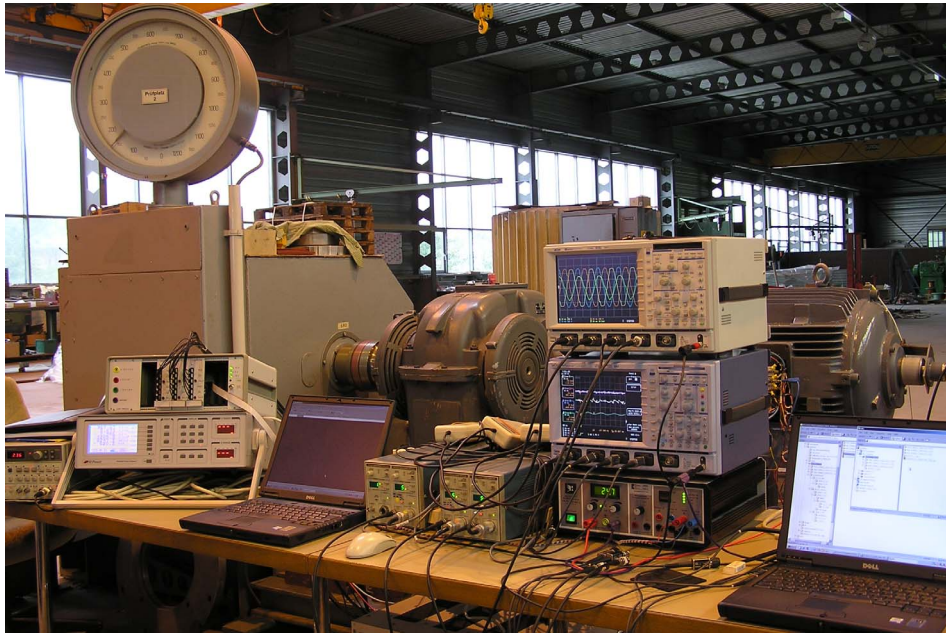


Fig. 20: Prüfaufbau bei Bartholdi AG: Messgeräte

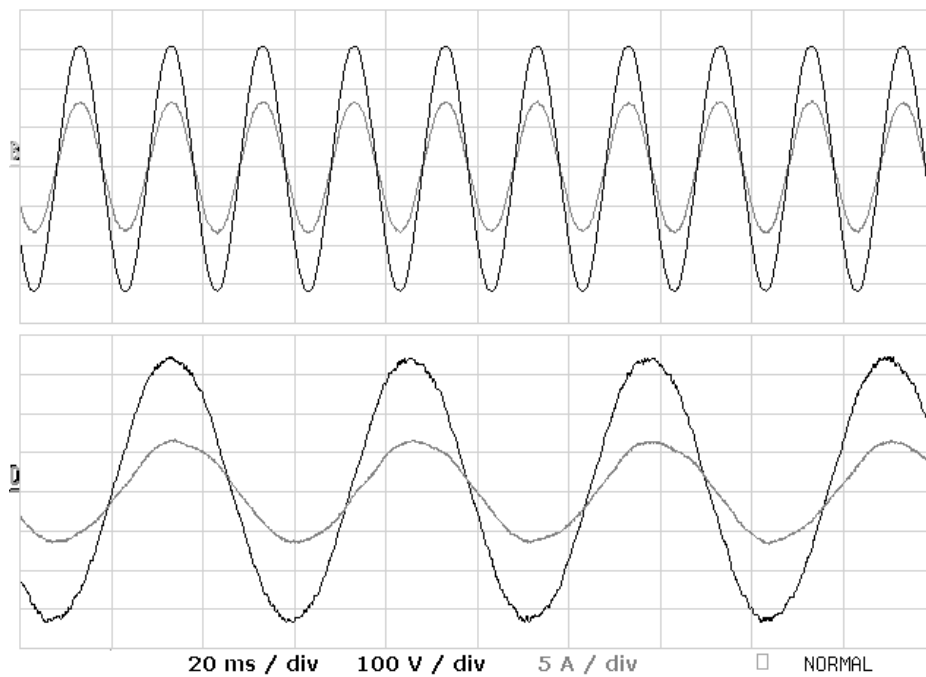


Fig. 21: Gemessene Netzströme (oben) und Netzspannungen (unten)

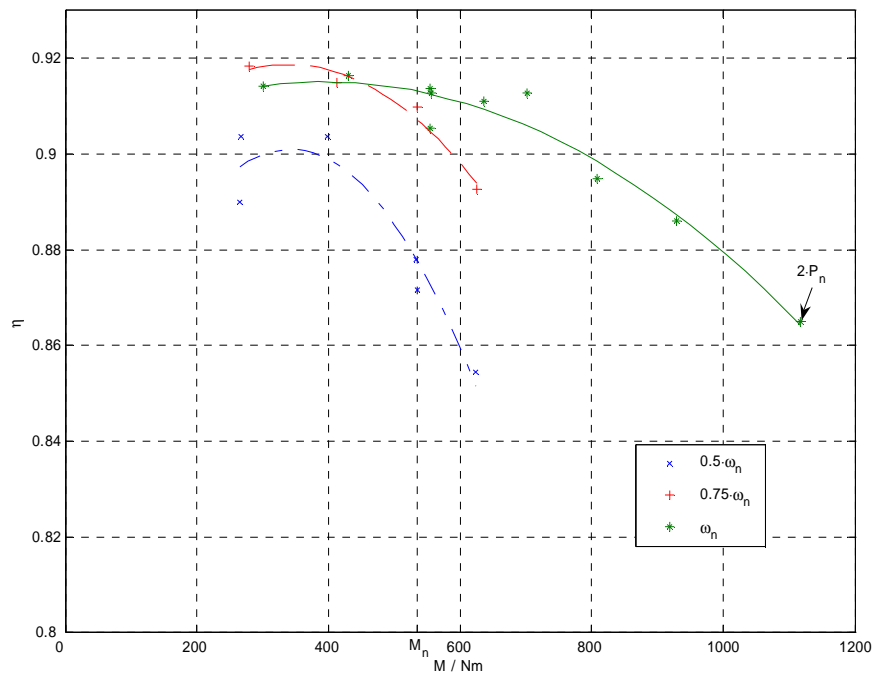


Fig. 22: Gemessener Wirkungsgrad der 3 kW Maschine abhängig von Drehzahl und Moment

Die charakteristischen Werte der Maschine im generatorischen Betrieb sind:

Paramètre	Simulation	Mesure	Unité
Puissance nominale électrique	3000	3244	W
Tension nominale	376	374	V
Courant nominal	4.6	5.09	A
Vitesse nominale	60	61	min ⁻¹
Fréquence électrique nominale	19	19.3	Hz
cos phi	1	0.983	
Tension induite à vide	404	388	V
Résistance par phase	3.28	2.29	Ω
Couple nominal	510	556	Nm
Puissance mécanique	3203	3549	W
Rendement électromécanique	91.3	91.5	%

Auch der Wirkungsgrad des Umrichters wurde bestimmt: dieser liegt bei Nennbetrieb bei ca. 94%, was für einen Umrichter dieser Bauleistung sehr gut ist.

3.5 Bewertung

Es konnte gezeigt werden, dass sich das gewählte Konzept mit entsprechenden Optimierungen auch auf kleinere Bauleistungen anwenden lässt.

Der von der Hochschule Wallis entwickelte Umrichter ist komplett digital geregelt und weist sehr geringe Materialkosten auf.

Die Auslegung der 3 kW Maschine wurde gegenüber dem ursprünglich vorgesehenen „Down-Scaling“ massiv verbessert, insbesondere Gewicht und Abmessungen konnten optimiert werden.

Die Lasttests haben die vorteilhaften Eigenschaften dieses Konzeptes klar gezeigt. Die Getriebeverluste sind eliminiert, der Wirkungsgrad der Maschine liegt bei ca. 91.5%, derjenige des Umrichters bei ca. 94%.

Diese Werte sind im Vergleich zu konventionellen Maschinen und Umrichtern mit einer Leistung von 3kW sehr gut.

Die Schaltfrequenz von 20 kHz im Umrichter konnte wie erwartet dazu genutzt werden, die Netzfilter zu reduzieren. Ausserdem konnte dank der PWM-Modulation das Spektrum der Netz-Oberschwingungsströme gegenüber dem Toleranzbandverfahren eingeschränkt werden. Da die Maschineninduktivitäten sehr hoch sind (ca. 50 mH) werden mit einer Schaltfrequenz von 20 kHz die Maschinen-Oberschwingungsströme kaum mehr messbar.

Das Ersetzen des Winkellagegebers durch einen im DSP implementierten Software-Winkelbeobachter reduzierte die Kosten und erhöhte die Zuverlässigkeit des Antriebssystems. Dieser Beobachter funktionierte bereits ab 10% der Nenndrehzahl.

Die beiden wesentlichen Vorteile des getriebelosen Antriebes sind der bessere Wirkungsgrad und der reduzierte Unterhaltsaufwand.

Allerdings sind die Herstellkosten und das Volumen eines langsamlaufenden Motors höher als bei einem klassischen Motor geringer Polzahl. Es gibt aber verschiedene Ansätze, die Herstellkosten des Gesamtsystems zu reduzieren.

4. Einspar-Möglichkeiten und –Potenziale

4.1 System 1200 kW

Im folgenden wird das Energiesparpotential dieses Antriebssystems dargestellt:

Heutige drehzahlvariable Antriebs- und Generatorsysteme für niedrige Drehzahlen weisen folgende Anlagenteile auf:

Getriebe	ca 3% Verluste
Asynchronmaschine	ca 5% Verluste
Frequenzumrichter	ca 3% Verluste

Das getriebelose System besteht aus folgenden Anlagenteilen:

Permanenterregte Synchronmaschine	ca 4.2% Verluste
Frequenzumrichter	ca 2.7% Verluste

Das Einsparpotential im Nennbetrieb beträgt somit ca. 4.1%, bei Teillast ist das Potential sogar noch grösser, da die permanenterregte Synchronmaschine einen besseren Teillastwirkungsgrad aufweist als alle anderen Maschinentypen.

Aufgrund dieser Daten kann folgendes Energiesparpotential für die verschiedenen Einsatzgebiete berechnet werden:

Industrieantriebe in der Schweiz > 100 kW:	total 400 GWh/a	
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%	
Einsparpotential	4.1% entspricht	3.3 GWh/a
Seilbahnen in der Schweiz:	total 100 GWh/a	
Einsparpotential	4.1% entspricht	4.1 GWh/a
Windkraftanlagen in Europa (Stand Ende 2001):	total 40'000 GWh/a	
Einsparpotential	4.1% entspricht	1640 GWh/a

Aus dieser Zusammenstellung ist zu erkennen, dass ein sehr grosses Energiesparpotential vorhanden ist. Das grösste Potential ist in den Windkraftanlagen (MW-Bereich) zu erkennen.

4.2 System 3 kW

Im folgenden wird das Energiesparpotential dieses Antriebssystems dargestellt:

Heutige drehzahlvariable Antriebs- und Generatorsysteme für niedrige Drehzahlen weisen folgende Anlagenteile auf:

Getriebe	ca 3% Verluste
Asynchronmaschine	ca 10% Verluste
Frequenzumrichter	ca 6% Verluste

Das getriebelose System besteht aus folgenden Anlagenteilen:

Permanenterregte Synchronmaschine	ca 9% Verluste
Frequenzumrichter	ca 6% Verluste

Das Einsparpotential im Nennbetrieb beträgt somit ca. 4% (Einsparung der Getriebeverluste und verbesserter Wirkungsgrad der Maschine), bei Teillast ist das Potential sogar noch grösser, da die permanenterregte Synchronmaschine einen besseren Teillastwirkungsgrad aufweist als alle anderen Maschinentypen.

Aufgrund dieser Daten kann folgendes Energiesparpotential für die verschiedenen Einsatzgebiete berechnet werden:

Industrieantriebe in der Schweiz < 100 kW:	total 1920 GWh/a
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%
Einsparpotential	4% entspricht 15.4 GWh/a

Aus dieser Zusammenstellung ist zu erkennen, dass ein grosses Energiesparpotential bei den Industrieantrieben (kW-Bereich) vorhanden ist.

5. Umsetzungsmöglichkeiten

5.1 System 1200 kW

Die Funktionsweise und das Potential dieses Antriebskonzeptes konnten mit diesem Forschungsprojekt klar aufgezeigt werden.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten sind zu erkennen bei der Reduktion der Herstellkosten und der umrichterabhängigen Maschinengeräusche.

Durch die Konkurse der Firmen Bartholdi AG und Technocon AG hat sich die Umsetzung am Markt verzögert. (Der entwickelte Motor wurde als Antriebseinheit bei einer Liftanlage im Südtirol eingesetzt).

Die Firmen Gebrüder Meier AG und Vivatec GmbH befassen sich zur Zeit mit der Umsetzung dieser Konzepte. Beide Firmen haben insbesondere die Windkraftanlagen als vielversprechendes Einsatzgebiet erkannt.

Die Firma Gebrüder Meier AG hat die Technologie für permanenterregte Synchronmaschinen der Bartholdi AG übernommen. Sie beschäftigt sich zur Zeit mit diversen Marktabklärungen.

Die Vivatec GmbH entwickelt zur Zeit eine komplett neue Hardware (Leistungsteil und Controller) für Umrichter im Leistungsbereich von ca. 200 .. 5000 kW. Dabei werden die bisher bekannten Regelkonzepte zum Einsatz kommen, allerdings mit erheblich schnellerer und genauerer Berechnung. Das neue Hardware-Konzept führt zu einer Reduktion des Montage- und Verdrahtungsaufwandes, so dass geringere Kosten, bessere Prüfbarkeit und eine höhere Zuverlässigkeit erreicht wird. Basierend auf dieser Entwicklung wird die Vivatec GmbH Anfang 2005 Marketingaktivitäten wie Marktabklärungen und Akquisition aufnehmen.

5.2 System 3 kW

Auch für diese Leistungsklasse konnte das Potential klar aufgezeigt werden, allerdings scheint hier die Umsetzung am Markt erheblich schwieriger. Dies hat folgende technische Gründe:

- Das höhere Gewicht und die höheren Kosten der Maschine wirken sich nachteiliger aus
- In dieser Leistungsklasse sind Getriebe oft als Riemengetriebe ausgeführt, welche relativ kostengünstig, zuverlässig und verlustarm sind
- Bezogen auf die Gesamtkosten einer Anlage ist die Wirkungsgradverbesserung finanziell noch zu wenig attraktiv, insbesondere wenn aufgrund der grösseren Maschine konstruktive Änderungen nötig sind

Ausserdem müssten Systeme dieser Leistungsklasse in hohen Stückzahlen produziert werden können, um konkurrenzfähige Kosten zu erreichen. Dazu wären auch entsprechend hohe Investitionen in Produktion und Vertrieb nötig.

Die in diesem Projekt involvierten Firmen sind jedoch nicht im Bereich der hohen Stückzahlen tätig.

In der Schweiz scheint ein gewisses Potential bei der Anwendung in Windkraftanlagen im Leistungsbereich 6 .. 100 kW vorhanden zu sein.

Mögliche nächste Schritte zur Umsetzung dieses Konzeptes bei kleinen Leistungen könnten sein:

- Das ausgewiesene Potential zur Optimierung der Maschine hinsichtlich Gewicht und Kosten nutzen
- Zusammenarbeit mit weiteren Firmen evaluieren
- Pilotanlagen realisieren, z.B. Windkraftanlagen kleiner Leistung

6. Quellenverzeichnis

[1] Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter / Felix Jenni, Dieter Wüest. - Zürich [etc.] : vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich [etc.], cop. 1995

[2] COSTA JR, D. R., ROLIM, L. G. B., AREDES, Mauricio "Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit - PLL Circuit" ISIE'03 - International Symposium on Industrial Electronics. , 2003. v.1. p.292

[3] Réglages de systèmes d'électronique de puissance, Hansruedi Bühler, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997

[4] Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen / Nguyen Phung Quang, Jörg-Andreas Dittrich. - 2., neubearb. Aufl. - Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1999

7. Anhang

1. GENEOLE, Génératrice à Polarité 38 et 40, Daho Taghezout, Hochschule Waadt
2. „Prüfung der Maschine WGP 1500 M56 Permanentmagnet“, Marc Bärmann, Sensoplan AG
3. „Prüfbericht Umrichter 1200 kW“, John Eckerle, Technocon AG