



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 30. Juni 2009

Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet- Motoren

Zusammenfassung und Update

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

CIRCLE MOTOR AG
Tannackerstrasse 25
CH-3073 Gümligen
info@circlemotor.ch www.circlemotor.ch

Autoren:

Markus Lindegger, dipl.el.Ing.HTL, CIRCLE MOTOR AG
Prof. Hans-Peter Biner, dipl.el.Ing.ETHZ, Hochschule Westschweiz
Blaise Evéquo, dipl.el.Ing.HTL, Hochschule Westschweiz
Prof. Dr. Dominique Salathé, dipl.el.Ing.ETHZ, Hochschule Luzern Technik und Architektur

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153746 / 101374

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Ausgangslage.....	4
2. Ziel der Technologiestudie.....	4
3. Lösungsweg und Methode.....	4
4. Ergebnisse.....	5
4.1 Theoretischer Teil.....	5
4.2 Praxis bezogener Teil.....	11
4.2.1 Leerlaufmessungen.....	16
4.2.2 Lastmessungen.....	17
4.2.3 Effizienz.....	18
5. Marktbezogene Aussagen zu den effizienten Permanent-Magnet-Motoren.....	21
5.1 Einsparungen von Rohstoffen und Gewicht.....	23
5.2 Kleine Anlaufenergie durch reduziertes Massenträgheitsmoment des Rotors.....	24
5.3 Höhere Wirkungsgrade bei kleineren Leistungen.....	25
5.4 Getriebemotoren / Direktantriebe.....	25
5.5 Betriebsverhalten.....	26
5.6 Kosten.....	27
5.7 Grenzen der Baugröße.....	27
5.8 Potenzial der Energieeinsparung mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren.....	27
5.9 Für welche Anwendungen sind Permanent-Magnet-Motoren nicht geeignet.....	28
6. Weiterführende Arbeit.....	29
Symbolverzeichnis, Definitionen.....	31
Referenzen.....	31
Quellen der Abbildungen.....	31

1. AUSGANGSLAGE

Mit Permanent-Magneten aus Seltenerdmetallen, vor allem Neodym–Eisen–Bor, lassen sich in elektrischen Maschinen starke Magnetfelder aufbauen. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass für den Aufbau des Magnetfelds keine el. Energie von aussen zugeführt werden muss, wie beispielsweise beim Asynchronmotor. Zudem sind Neodym-Eisen-Bor Magnete preiswert erhältlich. Deshalb sind beim Permanent-Magnet–Motor eine hohe Effizienz und der Einsatz als Energiesparmotor gegeben.

2. ZIEL DER TECHNOLOGIESTUDIE

Als „roter Faden„ durch die Technologie Studie „**Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren**“ [1] wird dieser Motortyp mit dem Asynchronmotor verglichen. Der Asynchronmotor ist am Markt als IEC Normmotor in hoher Zahl eingesetzt. Deshalb bilden die IEC Normmotoren die Referenz für die Gegenüberstellung. Das Ziel der Studie ist, die Vorteile und die Grenzen der Permanent-Magnet–Motoren zu kennen und vorteilhafte Anwendungen am Markt aufzuzeigen. Mit Unterstützung des *Bundesamts für Energie BFE*, führten drei Projektpartner die folgenden Arbeiten aus:

- **Circle Motor AG** Projektleitung und Markt-bezogene Untersuchungen
- **Hochschule Luzern Technik und Architektur** Theoretischer Teil
- **HES-SO VALAIS WALLIS Hochschule Westschweiz** Praxis bezogener Teil

3. LÖSUNGSWEG UND METHODE

Im theoretischen Teil wird untersucht, wie sich mit zunehmender Baugrösse der Motoren, Wirkungsgrad, Gewicht, Volumen und Leistung verhält. Zu den Permanent-Magnet–Motoren, die im preislichen Wettbewerb zu drehzahlverstellbaren IEC Normmotoren stehen, gab es zum Zeitpunkt der Technologiestudie sehr wenige Daten von namhaften Herstellern. Die *Hochschule Luzern* berechnete deshalb die benötigten Daten der Permanent-Magnet–Motoren im Software Programm *Maxwell 3D*. Die Daten zu den Normmotoren konnten Katalogen entnommen werden. Für den Vergleich wurden die Leistungsstufen 5.5, 15, 55, 90kW ausgewählt.

Im Praxis bezogenen Teil wird die Effizienz von sechs Motoren und von verschiedenen elektronischen Ansteuerungsverfahren, auf einem Prüfstand der *Hochschule Wallis*, untersucht. Drei Normmotoren mit unterschiedlichen Effizienzklassen und drei Permanent-Magnet–Motoren im Leistungsbereich um 3kW sind einander gegenübergestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse werden von *Circle Motor AG* zu **marktbezogenen Aussagen** zusammengefasst, wie:

Ist eine generelle Grenze für Permanent-Magnet–Motoren erkennbar, bei der sich der Einsatz dieser Motoren effizienzbezogen lohnt. Welche Anwendungsgebiete sind bezüglich Stromeinsparung besonders attraktiv. Ab welchen Laufzeiten, Leistungs-, Gewichts-, Volumenklassen, Drehzahlen macht es Sinn, dass Motorenprinzip zu wechseln. Gibt es fertigungstechnische Grenzen für Permanent-Magnet–Motoren, bei der eine wirtschaftliche Herstellung nicht mehr gegeben ist. Für welche Anwendungen sind Permanent-Magnet-Motoren geeignet, wo sind sie nicht geeignet. Gibt es Vorzüge bei den Steuerungsprinzipien bezüglich Effizienz.

4. ERGEBNISSE

4.1 THEORETISCHER TEIL

SIMULATIONSPROGRAMM MAXWELL 3D UND RMXprt



Maxwell 3D ist eine Industriesoftware für die Simulation von elektromagnetischen Feldern. Mit Hilfe dieser Software ist es möglich das Verhalten verschiedener elektromechanischer und elektro-magnetischer Komponenten in einer virtuellen Umgebung zu simulieren. Dadurch können Kosten für real hergestellte Prototypen gespart und die Zeit für Neuentwicklungen minimiert werden.

Die Simulationen basieren auf der *Finiten Element Berechnung*, bei welcher die zu berechnenden Magnetfelder mittels eines Netzes, welches über den Körper gelegt wird, berechnet werden. *Maxwell 3D* kann kombiniert werden mit verschiedenen Zusatztools wie *ePhysics*, *Simplorer* oder für uns von grossem Interesse, das *RMxpert* Tool.



RMxpert ist eine Software für das Design und die Berechnung von elektrischen Maschinen. Der grosse Vorteil dieses Tools ist das schnelle und einfache Definieren von Geometrien eines Motors. Parameter können sehr einfach eingegeben werden und die Maschine kann direkt in 2D dargestellt werden. Mit den vorhandenen Vorlagen können bestehende Motorentypen einfach abgeändert werden, um schnell einen fertigen Motor zu generieren (Abb. 1).

Der fertig konstruierte Motor kann anschliessend mittels Eingabe von Vorgaben, wie Leistung, Spannung oder auch Drehzahl berechnet werden. Die Resultate werden dann auf einem Datenblatt zusammengefasst ausgegeben.

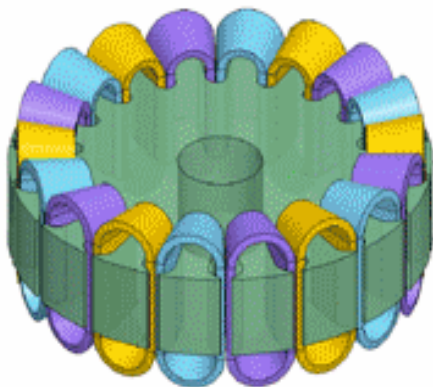


Abb. 1

Als weiteren Vorteil sei hier erwähnt, dass man den definierten Motor im *RMxpert* sehr einfach in das *Maxwell 3D* Programm exportieren kann. Der definierte Motor aus dem *RMxpert* zeigt sich danach in der 3D-Ansicht im *Maxwell*, wie es auf der folgenden Seite ersichtlich ist.

3D-ANSICHTEN IM MAXWELL

Aus Abb. 2 sind die verschiedenen Ansichten eines 6-poligen Permanent-Magnet-Motors sehr schön ersichtlich. Darin kommt auch die Zweischichtwicklung gut zum Ausdruck. Des Weiteren können Ansichten ausgeschaltet werden, um nur den interessierenden Teil zu betrachten. Die Pole zum Beispiel sind hier mit den Farben gelb und blau angedeutet.

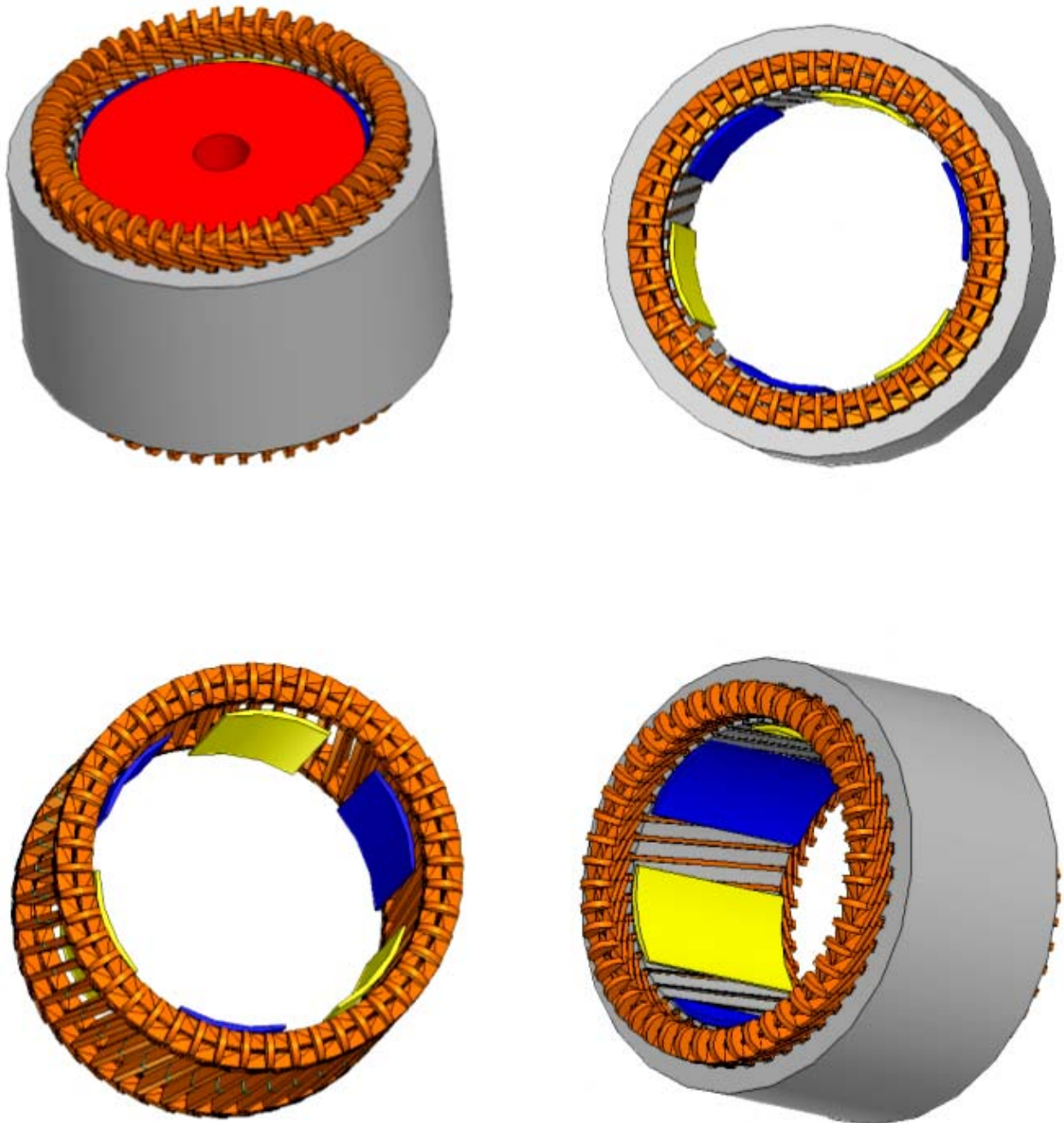


Abb. 2

GRUNDLAGEN FÜR DIE EINGABEN IM SOFTWAREPROGRAMM RMxpert

Als die Technologiestudie „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“ [1] entstand, galt noch die alte IEC Norm, welche 2 und 4 polige 50 Hz Käfigläufermotoren im Leistungsbereich 1,1 bis 90 kW in drei Wirkungsgradklassen: EFF1 für hocheffiziente, EFF2 für Wirkungsgrad verbesserte und EFF3 für Standardmotoren, einteilte. Die Bestimmung des Wirkungsgrads erfolgt nicht aus der direkten Messung von mech. Wellenleistung dividiert durch die el. Eingangsleistung. Die alte Norm bestimmt den Wirkungsgrad mit einem indirekten Verfahren, abgeleitet aus der aufgenommenen el. Eingangsleistung und den messtechnisch erfassten Verlusten. Weitere Zusatzverluste wurden pauschal mit 0.5% der Eingangsleistung einbezogen.

Aus der IEC Normreihe wurden für die Simulation folgende vier Motorengrößen ausgewählt:

- 5.5 kW (IEC Baugröße: 132)
- 15 kW (IEC Baugröße: 160)
- 55 kW (IEC Baugröße: 250)
- 90 kW (IEC Baugröße: 280)

Für die Permanent-Magnet-Motoren wurden die gleichen Statorblech eingesetzt, wie für die Normmotoren. Als Datenquelle diente der Katalog von *Kienle+Spiess* [2], ein bekannter Hersteller für Komponenten von Normmotoren. Somit sind die simulierten Permanent-Magnet-Motoren direkt vergleichbar mit äquivalenten Normmotoren bei gleicher IEC Baugröße.

Rotoren von Permanent-Magnet-Motoren sind keinem magnetischen Wechselfeld unterworfen und können deshalb aus einem massiven Stahlteil mechanisch hergestellt werden. Damit wird die Luftspaltbreite bei unseren Simulationen frei wählbar.



Bei den Permanent-Magnet-Motoren setzen sich die Verluste ganz allgemein aus den Eisen-, Kupfer-, Ventilations-, Reibungs- und den Schaltungsverlusten zusammen. Da wir nur die Maschine alleine untersuchen, werden keine Schaltungsverluste in die Berechnung miteinbezogen. Zudem werden die Ventilations- und Reibungsverluste vernachlässigt, da diese Parameter je nach Leistungsklasse der Maschine mehr oder weniger ins Gewicht fallen.

Für diese Simulation gilt stets:

$$\eta = \frac{P_{Welle}}{P_{Welle} + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

Bei der Simulation der Motoren aus den oben festgelegten Leistungsgrößen werden verschiedene Varianten ausgetestet. Dabei werden Statorbleche mit Polpaarzahlen von 2 bis 4 untersucht. Bei den Permanent-Magnet-Motoren sind die Wellendrehzahl mit 3000 U/min und die Gleichspannung am Zwischenkreis der Antriebselektronik mit 400 VDC festgelegt. Die Permanent-Magnete sind auf der Oberfläche des Rotors montiert und gehören heute mit einer Remanenz von 1.23 T nicht mehr zu den stärksten Neodym-Eisen-Bor Magneten.

AUFBAU DER SIMULATION

Wie erste Simulationsversuche zeigten, hat die Auslegung des Luftspaltes einen wichtigen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Durch Erhöhen der Luftspaltbreite wird die Flussdichte B reduziert und damit auch die resultierenden Eisenverluste. Da bei einer Simulationsreihe die Leistung an der Welle immer konstant bleibt, muss beim Erhöhen der Luftspaltbreite zwangsweise mehr Strom fließen um die gleiche Ausgangsleistung zu erzeugen. Dieser Stromanstieg verursacht zusätzliche Kupferverluste. Stellen wir nun die Eisen- und Kupferverluste in Funktion der Luftspaltbreite dar, erhalten wir einen Verlauf wie in Abb. 3. (für den Permanent-Magnet-Motor Baugrösse IEC 132 mit 4 Polen-36 Nuten)

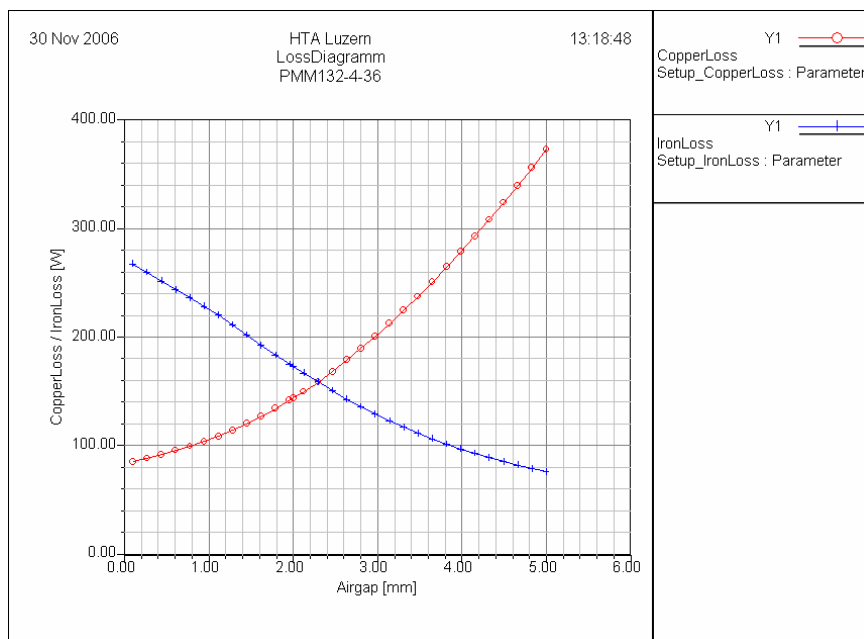


Abb. 3

Es ist unschwer zu erkennen, dass die Verluste bei einer bestimmten Luftspaltbreite (hier ca. 2.3 mm) gleich gross sind. An diesem Punkt sind die gesamten Verluste zu je 50% auf Eisen- und Kupferverluste aufgeteilt. Das Ziel der Simulation besteht darin den Wirkungsgrad zu bestimmen, wobei die Nennleistung, die Nenndrehzahl von 3000 U/min und die Gleichheit der Kupfer- und Eisenverluste vorgegeben sind. Mit einer hergeleiteten Formel und einem iterativen Verfahren gelang es die obigen Bedingungen in der Simulation zu erfüllen.

Ein weiterer Punkt ist die Form der Magnete. So kann die Pol Oberfläche abgeflacht und die Magnetlänge kleiner als eine Polteilung gewählt werden. Durch diese Massnahmen reduzieren sich die Eisenverluste und die Effizienz eines Permanent-Magnet-Motors steigt zusätzlich an. Damit stehen weitere Parameter für die Variation der Eisenverluste zur Verfügung. Für die Bestimmung des besten Wirkungsgrads haben wir das Iterationsverfahren mit der Formgebung der Magnete erweitert. Das beschriebene Iterationsverfahren kombiniert mit dem Softwareprogramm *RMxprt* berechnete den besten Wirkungsgrad bei vier vorgegebenen Leistungsgrössen, wobei auch die Polzahlen einbezogen wurden. Einen umfangreichen Einblick in die Formeln, Berechnungen, Diagramme und Daten zu jedem Permanent-Magnet-Motor finden sie in der Originalstudie.

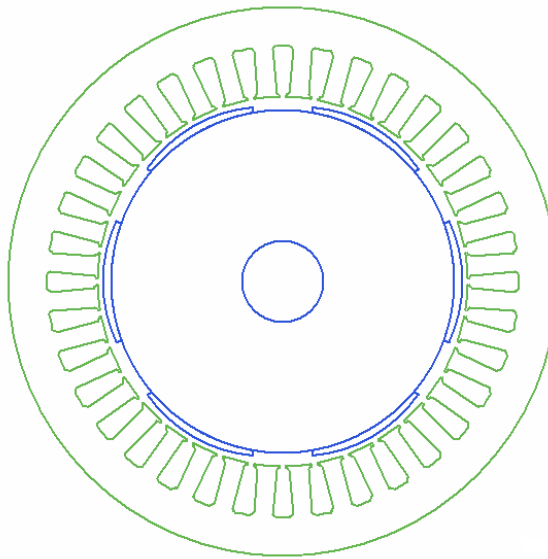


Abb. 4

Abb 4 zeigt den Schnitt durch den Permanent-Magnet-Motor gemäss der Eingabe im *RMxpert* mit dem Statorblech, dem Rotor mit Oberflächen montieren Magneten, deren Pol abgeflacht und die Länge kleiner als eine Polteilung ist.

Der Originalstudie ist ein umfangreicher Anhang zur „**Magnetwerkstoff-Technologie**“ beige-fügt. Aus diesem Grund sei hier noch ein Blick auf die wesentlichsten Punkte aus diesem „**Anhang**:“ aufgeführt.

Es versteht sich von selbst, dass sich bessere Magneteigenschaften auf die Maschine und auf deren Wirkungsgrad positiv auswirken. Man spricht hier vom Energieprodukt des Magneten. Je grösser das $(B \cdot H)_{\max}$ Produkt, desto kompakter kann der Magnet mit denselben Eigenschaften produziert werden. Daraus entsteht eine wesentliche Verkleinerung der Magnetsysteme, wie es die Permanent-Magnet-Motoren aufweisen. Anders betrachtet, sind auch wesentlich höhere magnetische Energien, bei gleicher Baugrösse, gegenüber herkömmlichen Magnetwerkstoffen, möglich. Um bei 1 mm Entfernung von der Polfläche ein Feld von 100 mT zu erzeugen, muss ein Bariumferrit-Magnet ca. 25x grösser sein als ein Samarium-Cobalt-Magnet (SmCo). Das Energieprodukt von NdFeB (Neodym-Eisen-Bor) ist sogar noch einmal um 40% höher als bei dem genannten SmCo-Magneten. Dadurch können Permanentmagnet-Motoren kleiner gebaut werden als ein äquivalenter Asynchronmotor.

Dies zeigt schon in Ansätzen, welchen Vorteil diese Seltenerd-Magnete in Bezug auf den Motorenbau haben. Diese Magnete sind auch sehr widerstandsfähig in Bezug auf Gegenfelder. In der Magnettheorie bezeichnet man dies als magnetische Stabilität. Ein anderer Vorteil ist die thermische Stabilität, was besonders wichtig ist im Motorenbau. Als Nachteil kann man erwähnen, dass besonders die NdFeB-Magnete, welche auch zu den Seltenerd-Magneten zählen, eine nicht besonders befriedigende chemische Stabilität aufweisen. Das heisst, sie oxidieren und korrodieren eher schnell und erfahren dadurch Verluste. Heutige Fortschritte in der Technik haben jedoch gezeigt, dass dieses Problem schon weitgehend gelöst ist. Eine Massnahme sind Beschichtungen der Magnete.

In unseren Simulationen haben wir uns für den Magnetwerkstoff NdFeB35 auf dem Rotor entschieden.

ERGEBNISSE

In Tabelle 5 sind die Wirkungsgrade, sowie das entsprechende Drehmomente der Motoren ersichtlich. Aus den simulierten Wirkungsgraden wurden noch die pauschalen Abzüge mit ein berechnet, um schlussendlich zu den unten aufgeführten Wirkungsgraden zu gelangen. Permanent-Magnet-Motoren weisen sehr hohe Wirkungsgrade auf. Im Vergleich zum Asynchronmotor, in der gleichen Leistungsklasse, sind diese im Schnitt um 2% höher. Bei zunehmender Leistung nimmt die Wirkungsgraddifferenz zum äquivalenten Asynchronmotor ab. Der Schnittpunkt ist noch nicht erreicht, aber die Tendenz zeigt hier, dass im höheren Leistungsbereich der Permanent-Magnet-Motor nicht mehr im Vorteil ist. Im Leistungsbereich unter 100 kW ist der Permanent-Magnet-Motor aber energieeffizienter.

Die Asynchron- und Permanent-Magnet-Motoren in folgenden Tabellen haben etwa die gleichen Drehmomentwerte. Somit kann ein genauerer Vergleich zwischen den beiden Motorentypen gemacht werden.

	Permanent-Magnet-Motor			
	IEC132	IEC160	IEC250	IEC280
Wirkungsgrad	91%	94%	96.5%	97%
Drehmoment	18Nm	50Nm	180Nm	290Nm
	Normmotor (Asynchronmotor)			
	IEC132	IEC160	IEC250	IEC280
Wirkungsgrad	88.6%	91.3%	94.2%	95.1%
Drehmoment	18Nm	49Nm	177Nm	289Nm

Tabelle 5

VERGLEICH DER WIRKUNGSRADE

Abb. 6 zeigt die **Effizienz der berechneten Permanent-Magnet-Motoren als blaue Punkte** auf (3kW gemessen). Zum Vergleich sind die Wirkungsgrad Grenzen nach der neuen IEC Norm 60034-30 eingezeichnet. Die neue Norm gliedert die Effizienz in IE Stufen ein. Mit steigendem Zahlenwert erhöht sich die Effizienz. IE1 ist standard efficiency und entspricht der alten EFF2 Klasse. High efficiency IE2 entspricht EFF1 und übergeordnet ist mit IE3 die neue Premiumklasse.

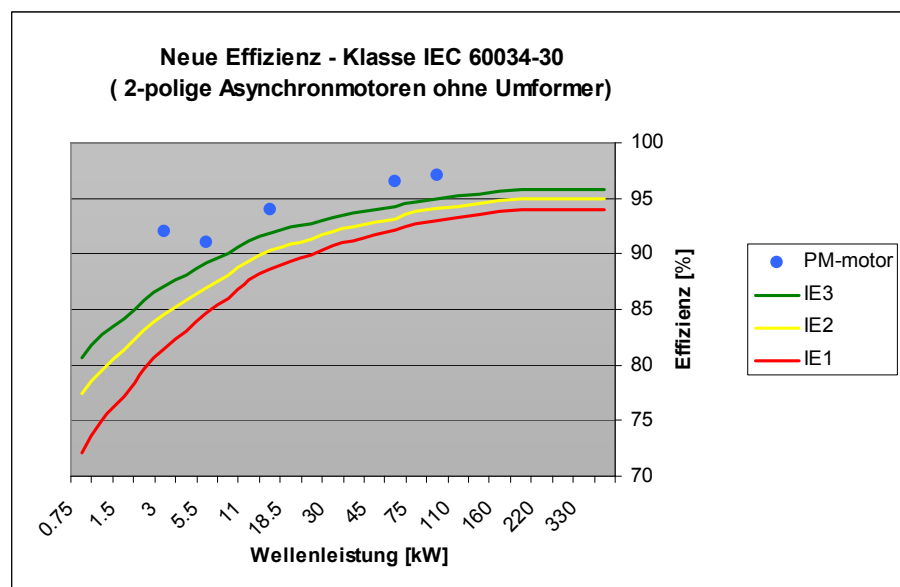


Abb. 6

In Grafik 6 sind die Grenz-Kurven zur neuen IEC Norm für 2 polige Asynchronmotoren eingezeichnet. Die synchrone Drehzahl liegt dann bei 3000 U/min. Die Grafik zeigt, dass die berechneten Permanent-Magnet-Motoren in die Effizienzklasse IE3, Premium efficiency fallen. Somit kann den Permanent-Magnet-Motoren eine gute Zukunft als Energiesparmotoren vorher gesagt werden.

Im folgenden Text und in den Diagrammen sind die Effizienzklassen nach der neuen Norm IEC 60034-30 mit den Bezeichnungen IE1 bis IE3 angegeben.

4.2 PRAXIS BEZOGENER TEIL

An der Hochschule Wallis wurde die Effizienz von verschiedenen Motoren auf einem Prüfstand bestimmt. Die gemessenen Motoren lagen im Leistungsbereich von 3kW.

Die Ziele der Messungen sind:

- Vergleich der Leerlaufverluste bei Netzbetrieb oder mit Wechselrichter.
- Wirkungsgrad bei Nenndrehzahl und verschiedenen Belastungen.
- Direkter Netzbetrieb ohne Antriebselektronik von Permanent-Magnet-Motoren. Dieser Punkt ist in dieser Zusammenfassung nicht aufgeführt. Begründet im grossen Markt für drehzahlverstellbare Motoren für Strömungsmaschinen wurde der direkte Netzbetrieb nach dieser Studie nicht mehr weiter verfolgt.

VERWENDETE MASCHINEN

Die Hochschule Wallis verfügt für dieses Projekt über 3 verschiedene Asynchronmaschinen, eine Permanent-Magnet-Synchronmaschine mit trapezförmigen Spannungen (bürstenlose DC Maschine) und zwei Permanent-Magnet-Synchronmaschinen mit sinusförmigen Spannungen. Tabelle 7 zeigt die Angaben der Typenschilder. Dabei bezeichnet die erste Buchstabenfolge den Maschinentyp:

Asynchronmaschine ASM, Permanent-Magnet-Synchronmaschine mit trapezförmigen Spannungen BLDC, Permanent-Magnet-Synchronmaschinen mit sinusförmigen Spannungen PMSM. Die Asynchronmaschinen unterscheiden sich in ihrer Schaltung. Auf den folgenden Seiten bezeichnet ein Y eine Sternschaltung und ein D eine Dreieckschaltung).

Die Maschine « HB 100L » arbeitet bei 400V in Dreieckschaltung.

- Die Maschine « ETR DN100 » wurde nach dem Prinzip von Dahlander gewickelt und arbeitet bei 400V in der Doppelsternschaltung.
- Die Maschine « ABB M3AA » ist für den Wechselrichterbetrieb in Sternschaltung Y bei 400V vorgesehen.

Um die folgenden Messungen zu vereinheitlichen, wurden die Asynchronmaschinen bei einer Nenndrehzahl von 3000U/min ausgemessen. Die Messungen unter Last erfolgten bei 400V. Für die Messungen der Eisenverluste wurde die Zwischenkreisspannung des Wechselrichters abgesenkt um eine Ausgangsspannung von 320V zu erhalten. Damit wurde ein Vergleich mit den Synchronmaschinen möglich.

Um die Asynchronmaschinen mit der Maschine **BLDC « EMB DM-SNP »** vergleichen zu können, wurden ihre Speisungen der induzierten Spannung der Permanent-Magnet-Maschine angepasst, diese beträgt 250V für die Messungen unter Last.

TYPENSCHILDER DER MOTOREN / DATEN

Symbol	Einheit	Beschreibung	ASM HB 100L	ASM ETR DN100	ASM ABB M3AA	BLDC DM-SNP	PMSM Lange	PMSM HGA
Lieferant	-	Hersteller oder Lieferant	Harry Bürgi GmbH	ETR SA	ABB Suisse SA	Elektromaschinenbau GmbH	HEV's	Gebrüder Meier ag
Typ	-	Gemäss Lieferant	HB 100L	ETR DN100 B2/4	M3AA 100 LB 2 3GAA101312-BSE	DM-SNP 63-6-1-77	Lange	HGA WGPM 280 S38
P _n	W	Leistung an der Welle	3000	3300 YY / 2500 Y	3000	3008	2000	3250
U _n	V	Verkettete Spannung	380-415 D / 660 Y	400 YY / 400 Y	220-240 D / 380-420 Y	250 Y	230 Y	400 Y
I _n	A	Leistungsstrom	6.3 D / 3.7 Y	8.1 YY / 5.9 D	10.6 D / 6.1 Y	6.2 Y	5 Y	5 Y
f _e	Hz	Elektrische Frequenz	50	50	50	150	100	19
n _n	min ⁻¹	Mechanische Drehzahl	2880	2850 YY / 1430 D	2920	3000	1500	60
cos φ	-	Leistungsfaktor	0.87	-	0.86 D / 0.86 Y	-	-	0.95
m	kg	Gewicht der Maschine	32	21.9	25.2	12.7		600
Prot. IP	-	Schutzklasse	55	55	55	-	-	54
Is. Cl.	-	Isolationsklasse	F	F	F	F -	-	F
Serv.	-	Betriebsart		S1		-	-	
eff	-	Effizienzklasse	Eff2	Eff3	Eff1	-	-	-
Norm	-	Normen	VDE0530 / IEC341	-	IEC60034-1	-	-	IEC431
Ser. No.	-	Seriennummer	617304	A0447756	60510P0 971 /5	-	-	A39451 / 308 270
Date		Fabrikationsdatum	2005.06	-	-	-	-	2004.09

Abb. 7: Typenschilder der getesteten Motoren

ASYNCHRONMASCHINE: PARAMETER UND ERSATZSCHALTUNG

Anstelle der üblichen T- Ersatzschaltung wird die Schaltung nach Abb. 8, welche die Bestimmung aller Parameter durch Messungen erlaubt.

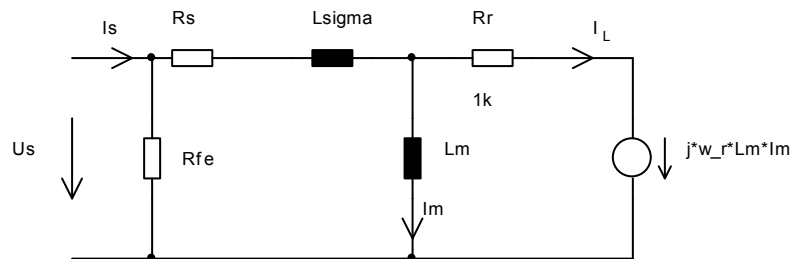


Abb. 8 Ersatzschaltung der Asynchronmaschine

Gemessene Parameter der Asynchronmaschinen

Tabelle 9 zeigt die gemessenen Kennwerte der vorhandenen Maschinen.

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	ASM HB 100L	ASM ETR DN100	ASM ABB M3AA
R_s	Ω	$I = I_n$	Statorwiderstand	1.45	2.31	1.27
L_σ	H	$I = I_n$ $f_e = 50 \text{ Hz}$	Streuinduktivität statorseitig	17.4E-3	13.5E-3	12.3E-3
L_m	H	$U = U_n / f_e = 50 \text{ Hz}$ $n \approx 2950 \text{ min}^{-1} / I_L \approx 0 \text{ A}$	Magnetisierungsinduktivität	290E-3	164E-3	220E-3
R_r	Ω	$I = I_n$ $f_e = 50 \text{ Hz}$	Rotorwiderstand	1.4	1.99	1.22

Abb. 9: Parameter der Asynchronmaschine

Die bei verschiedenen Spannungen gemessenen Leerlaufverluste sind in Tabelle 10 dargestellt:

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	ASM HB 100L	ASM ETR DN100	ASM ABB M3AA
P_{cu}	W	$n \approx 2950 \text{ min}^{-1}$ $f_e = 50 \text{ Hz} / U = 400 \text{ V}$	Kupferverluste Im Leerlauf	36	29	12
$P_{mec.}$	W	$n \approx 2950 \text{ min}^{-1}$	Mechanische Verluste Im Leerlauf	133	130	114
P_{fer}	W	$n \approx 2950 \text{ min}^{-1}$ $f_e = 50 \text{ Hz} / U = 400 \text{ V}$	Eisenverluste Im Leerlauf	126	330	140
P_{tot}	W	$n \approx 2950 \text{ min}^{-1}$ $f_e = 50 \text{ Hz} / U = 400 \text{ V}$	Gesamte Leerlaufverluste	295	489	266
J	kgm^2	-	Trägheitsmoment	-	-	0.005

Abb. 10: Leerlaufverluste der Asynchronmaschine

SYNCHRONMASCHINE: PARAMETER UND ERSATZSCHALTUNG

Die Abb. 11 zeigt die Ersatzschaltung der Permanent-Magnet-Synchronmaschine, die für Maschinen mit sinusförmigen oder trapezförmigen Spannungen gilt.

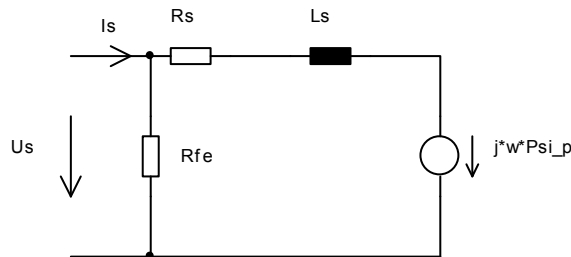


Abb. 11: Ersatzschaltung der Synchronmaschine

Gemessene Parameter der Synchronmaschinen

Tabelle 12 zeigt die gemessenen Kennwerte der vorhandenen Maschinen

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC DM-SNP	PMSM Lange	PMSM HGA
R_s	Ω	$I = I_n$	Statorwiderstand	1.05	0.594	2.29
L_d	H	$I = I_n / f_e = f_n$	Ständerinduktivität in Polradachse	-	15.8E-3	46E-3
L_q	H	$I = I_n / f_e = f_n$	Ständerinduktivität senkrecht zur Polradachse	-	20.1E-3	57.3E-3
Ψ_p	Vs		Permanentmagnetfluss	0.1582	0.231	1.875

Abb. 12: Parameter der Synchronmaschine

Die bei verschiedenen Spannungen gemessenen Leerlaufverluste sind in Tabelle 13 dargestellt:

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC DM-SNP	PMSM Lange	PMSM HGA
P_{cu}	W	$n = n_n / f_e = f_n / U = U_n$	Kupferverluste Im Leerlauf	3	-	-
$P_{mec.}$	W	$n = n_n$	Mechanische Verluste Im Leerlauf	40	88	-
P_{fer}	W	$n = n_n / f_e = f_n / U = U_n$	Eisenverluste Im Leerlauf	69	89	-
P_{tot}	W	$n = n_n / f_e = f_n / U = U_n$	Gesamte Leerlaufverluste	112	177	102
J	kgm^2	-	Trägheitsmoment	0.003	0.029	1.6

Abb. 13: Leerlaufverluste der Synchronmaschine

DREHZAHLREGELUNG EINER SYNCHRONMASCHINE

Die einfachste Methode zur Drehzahlverstellung ist die Frequenz-Spannungsmethode f/U . Diese Methode wird nicht empfohlen, weil ohne Kenntnis der Rotorposition die zuverlässige Funktion der Maschine schwierig zu realisieren ist. Die Messung mit einem Rotor Positionsgeber erlaubt einen zuverlässigen Betrieb des Antriebssystems.

Sinusmodulation

Die Abb. 14 zeigt das Prinzip einer solchen Modulation ohne Drehmomentregelung. Eventuell kann ein Geschwindigkeitsregler überlagert werden. Ein zusätzliches LC-Tiefpassfilter entfernt die HF-Anteile aus dem Maschinenstrom.

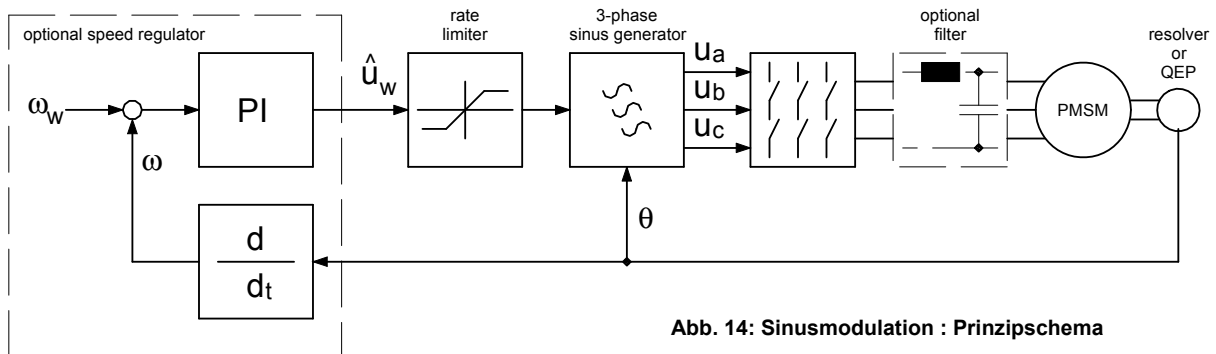


Abb. 14: Sinusmodulation : Prinzipschema

Die beiden Maschinen « **PMSM Lange** » und « **PMSM HGA** » wurden mit dieser Modulationsart im Leerlauf getestet. Nur die « **PMSM Lange** »-Maschine kann in diesem einfachen Betriebsfall problemlos betrieben werden, die « **PMSM HGA** »-Maschine hingegen zeigt kein optimales Verhalten. Mit den 60 U/min ist die **PMSM HGA** »-Maschine den Spezialmaschinen [3] zuzuordnen und wird in dieser Zusammenfassung nicht mehr weiter aufgeführt.

Blockmodulation

Die Abb. 15 zeigt das Prinzip einer solchen Modulation ohne Drehmomentregelung. Eventuell kann ein Geschwindigkeitsregler überlagert werden.

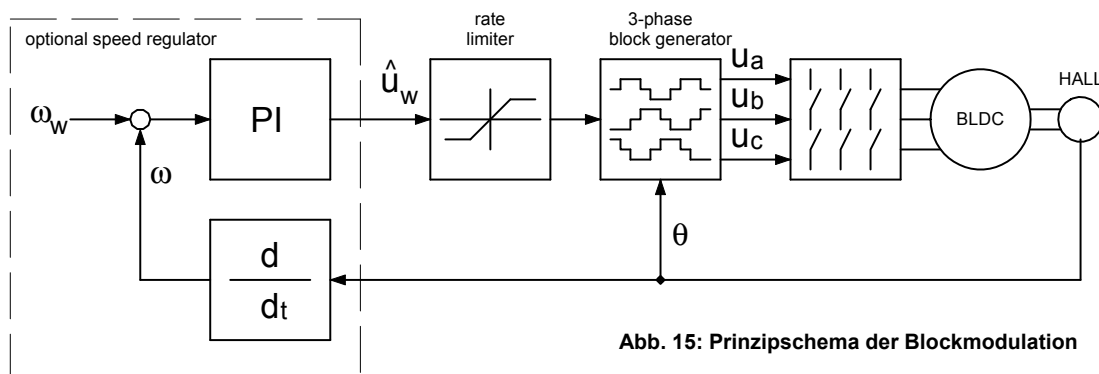


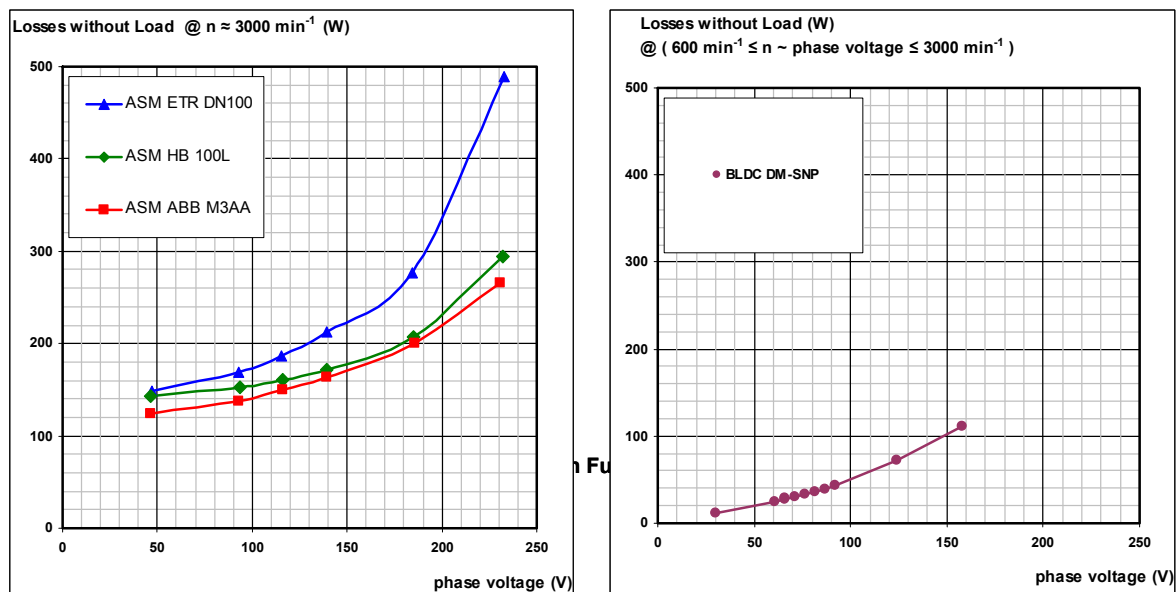
Abb. 15: Prinzipschema der Blockmodulation

Die « **BLDC DM-SNP** »-Maschine wurde mit dieser Modulationsart getestet. Oberhalb einer Minimdrehzahl (100U/min) funktioniert das System einwandfrei.

4.2.1 LEERLAUFMESSUNGEN

VERLUSTE IN FUNKTION DER SPANNUNG

Mit den drei Asynchronmaschinen wurden Versuche mit praktisch konstanter Geschwindigkeit und variabler Spannung im Leerlauf durchgeführt. Eine ähnliche Messung wurde ebenfalls mit der Maschine **BLDC « DM-SNP »** durchgeführt, nur sind bei einer Synchronmaschine Spannung und Drehzahl nicht unabhängig. Um die Resultate vergleichen zu können, wurde für die Asynchronmaschinen die Spannung mit Hilfe eines Variacs vorgegeben, während die Synchronmaschinen mit Hilfe eines Wechselrichters mit sinusförmigen Spannungen untersucht wurden. Die hochfrequenten Anteile der Wechselrichterspannungen wurden gefiltert.



Der linke Teil der Abb. 16 zeigt die gesamten Leerlaufverluste der Asynchronmaschinen in Funktion der speisenden Spannung. Die Ausführungsqualität der Maschine (vor allem die Bleche) beeinflusst die Verluste oberhalb von 185V. Mit diesen Messungen konnten die Kupferverluste, die mechanischen Verluste und die Eisenverluste bestimmt werden.

Der rechte Teil der Abb. 16 zeigt die gesamten Leerlaufverluste der Synchronmaschine in Funktion der Spannung und damit auch der Geschwindigkeit. Bei Nenndrehzahl sind die gesamten Leerlaufverluste gering, 112W gegenüber 166W, 295W und 489W bei den Asynchronmaschinen. Auf Grund dieser Messungen wurden die Verluste aufgeteilt in Kupferverluste, bestimmt durch die Strommessungen, mechanische Verluste proportional zur Geschwindigkeit und Eisenverluste mit dem Quadrat des Spannungswertes ansteigend.

Die mechanischen Verluste der Maschine **BLDC « DM-SNP »** werden auf 40W geschätzt, also ungefähr auf einen Drittel des Wertes der Asynchronmaschinen.

Die Kupferverluste der **BLDC « DM-SNP »** sind mit 3W sehr gering.

Die Eisenverluste der **BLDC « DM-SNP »** werden auf 69W geschätzt, also auf etwas mehr als die Hälfte der beiden effizienteren der ASM-Maschinen.

4.2.2 LASTMESSUNGEN

Die Lastmessungen wurden bis zu einer Wellenleistung von 2.25kW durchgeführt. Die Versuche mit 3kW konnten nicht korrekt durchgeführt werden, weil die von der Firma EMB gelieferte Permanent-Magnet Maschine « **BLDC DM-SNP** » nicht die geforderte und berechnete induzierte Spannung aufwies, und der Strom damit bei 3kW den zulässigen Wert übersteigen würde.

MESSPRINZIP

Für alle Maschinen gilt dasselbe Messprinzip. Jede Asynchronmaschine wird jeweils mit der Permanent-Magnet-Maschine « **BLDC DM-SNP** » verbunden. Zwischen den beiden Maschinen befindet sich ein Torsionsmessgerät, zur Bestimmung der Wellenleistung. Die Asynchronmaschine wird entweder direkt mit dem 400V-Netz verbunden oder durch einen f/U Wechselrichter gesteuert, dessen Zwischenkreisspannung vom gleichgerichteten Netz geliefert wird (560Vdc). Ein Wechselrichter regelt das Drehmoment der Synchronmaschine.

Um vergleichbare Messungen zu erhalten, wird die Zwischenkreisspannung des Synchronmaschinen-Wechselrichters auf 520Vdc gelegt. Diese Spannung ergibt sich aus der Hochrechnung der zu niedrigen induzierten Spannung von 270V der « **BLDC DM-SNP** »-Maschine. Der vorhandene Wechselrichter weist keine Totzeit-Kompensation auf und kann höchstens mit einem Modulationsgrad von 90% benutzt werden: Deshalb muss die Zwischenkreisspannung höher gelegt werden als die theoretisch-nötigen 380Vdc.

Die Drehzahl der Asynchronmaschinen wird nicht geregelt, nur das 50Hz Drehfeld wird bei der Wechselrichterspeisung festgelegt. Dies erlaubt den Vergleich mit dem Netzbetrieb, und damit ändert sich die Drehzahl unter Last. Die Drehzahl der Synchronmaschine hingegen wird immer auf 3000 U/min festgelegt, was dem Netzbetrieb entspricht.

Die Messung der elektrischen Größen wird mit Spannungs- und Stromsonden in der Aaron-Schaltung durchgeführt, die mit einem breitbandigen hochabtastenden Oszilloskop verbunden werden.

MECHANISCH-ELEKTRISCHE KOPPLUNG DER MASCHINEN

Die Maschinen wurden auf den laborüblichen Montagedreiecken aufgebaut und im Leerlauf, mit blockiertem Rotor und mit einer Lastmaschine getestet.

Für die Lastmessungen wurde jede Asynchronmaschine mit der **BLDC**-Maschine gekoppelt. Zwischen den Wellen wurde ein Drehmoment-Messgerät mit Hilfe von Aluminiumkupplungen eingefügt, die jeweils einen Freiheitsgrad erlauben. Damit kompensieren sich die Fehler der Ausrichtung. Die Abb. 17 zeigt die Testbank und die Kopplung einer ASM mit «**BLDC DM-SNP**» Maschine.



Abb. 17: Mechanische Kopplung der Maschinen ASM ↔ BLDC

4.2.3 EFFIZIENZ

WIRKUNGSGRAD IM NETZBETRIEB

Die Asynchronmaschinen werden direkt mit dem Netz verbunden. Da die Permanent-Magnet-Synchronmaschine « **BLDC DM-SNP** » nicht direkt am Netz betrieben werden kann, kommt in diesem Fall ein Sinuswechselrichter mit 20kHz Schaltfrequenz und Ausgangsfilter zum Einsatz. Die Abb. 154 zeigt den Wirkungsgrad der einzelnen Maschinen.

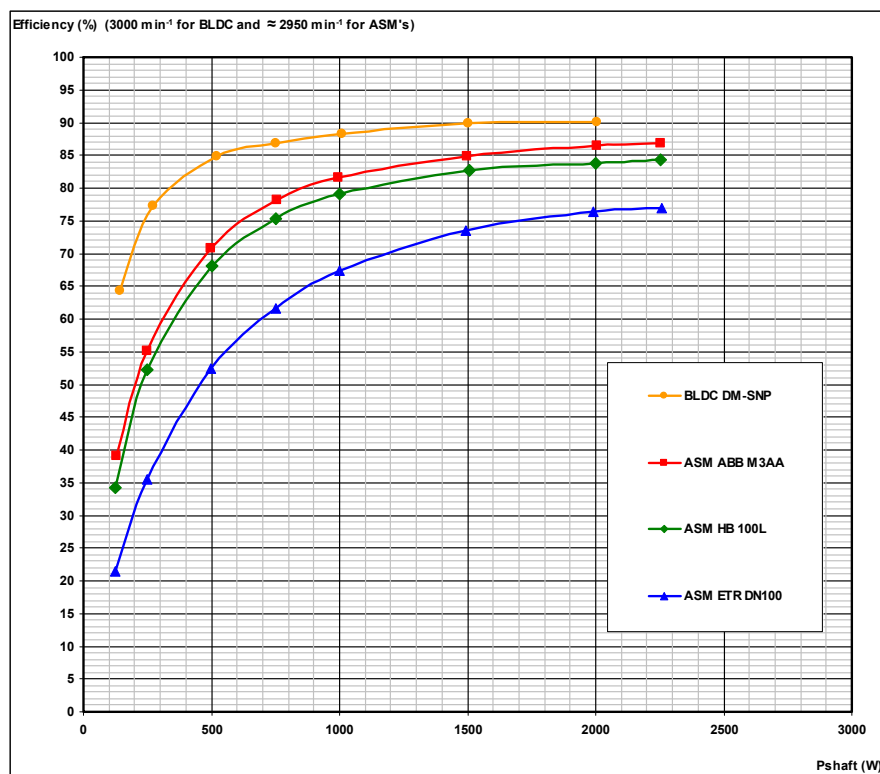


Abb. 18 zeigt den Vergleich der Wirkungsgrade ohne Wechselrichter zwischen dem BLDC- und den ASM-Motoren

Aus dieser Figur ist der höhere Wirkungsgrad der Permanent-Magnet-Maschine « **BLDC DM-SNP** » klar ersichtlich. Dies wird durch die Art der Regelung noch verstärkt, vor allem im Teillastbereich. Die Kupferverluste sind bei einer Asynchronmaschine ca. 5-mal grösser als bei einer Synchronmaschine.

Eine **positive Überraschung** war der geringe Unterschied des Wirkungsgrades zwischen der hocheffizienten Maschine « **ASM ABBM3AA** » und der günstigen Maschine « **ASM HB100L** ».

Der grosse Statorwiderstand und die verwendete Blechqualität der ASM « **ASM ETR DN100** » (Dahlanderschaltung) verhindern einen hohen Wirkungsgrad.

EINFLUSS DER SCHALTFREQUENZ AUF DEN WIRKUNGSGRAD

Die Option der Drehzahlverstellung verlangt beim Asynchronmotor und beim Permanentmagnet-Motor einen Wechselrichter. Der Wechselrichter steuert den Motorenstrom mit einer höheren Schaltfrequenz als die Netzspannung. Die höhere Schaltfrequenz des Wechselrichters verringert den Wirkungsgrad.

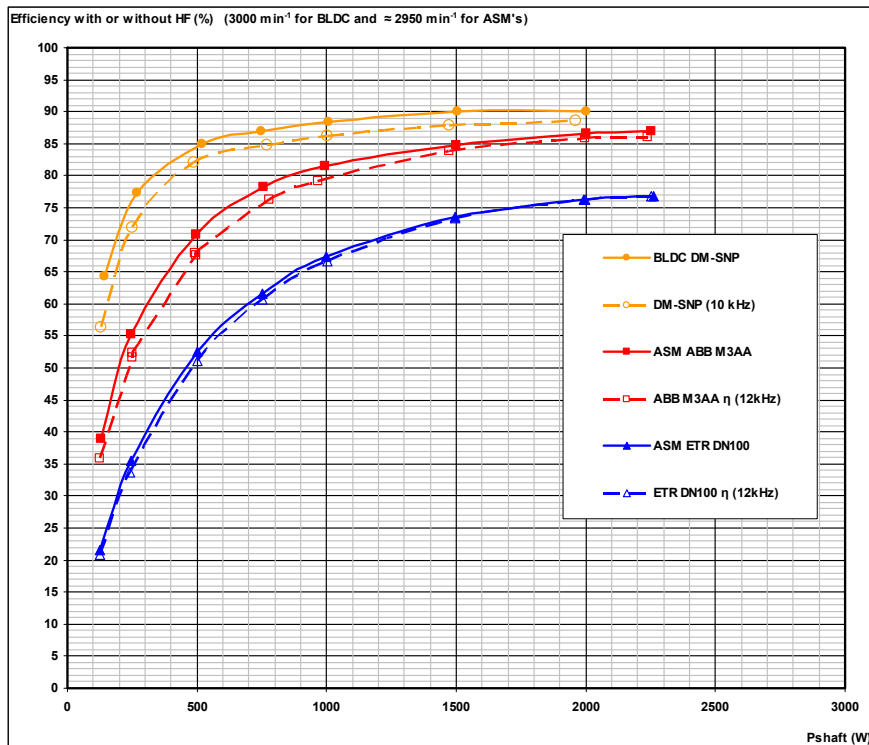


Abb. 19: Die durchgehenden Linien zeigen die Wirkungsgrade der Motoren ohne Wechselrichter
Die unterbrochenen Linien zeigen die Wirkungsgrade der Motoren mit Wechselrichter

Die durch die Schaltfrequenz hervorgerufenen Verluste beeinflussen den Wirkungsgrad vor allem bei Teillast wo das Tastverhältnis der Schalter bei 50% liegt und die Stromwelligkeit maximal wird. Bei Nennlast werden diese Verluste vernachlässigbar weil das Tastverhältnis gegen 100% anwächst und die Stromwelligkeit minimal wird.

EINFLUSS DER MODULATIONSART SINUS ⇔ BLOCK

Die induzierte Spannung beim brushless DC Motor ist trapezförmig und die Modulationsart des Wechselrichters ist blockförmig. Die induzierte Spannung beim Permanent-Magnet-Synchronmotor sowie die Modulationsart des Wechselrichters sind sinusförmig.

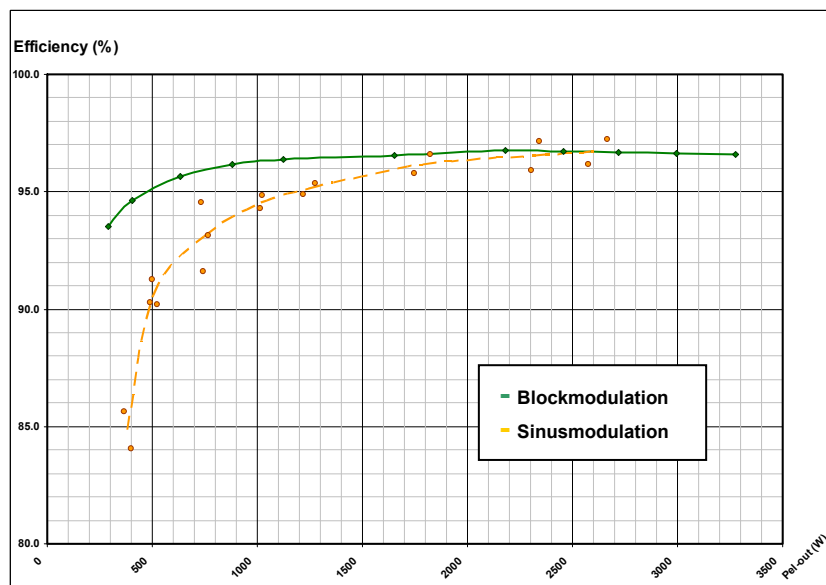


Abb. 20: Vergleich der Wirkungsgrade der Wechselrichter bei Sinus- oder Blockmodulation
(gemessen zwischen Netz- und Motoranschluss)

Aus der Abb. 20 ist ersichtlich, dass mit der Blockmodulation ein höherer Wirkungsgrad resultiert. **Der höhere Wirkungsgrad des Wechselrichters und das einfachere Steuerungsverfahren hat uns bewogen die brushless DC Technologie, beim effizienten Permanent-Magnet-Motor sowie beim Wechselrichter weiter zu verfolgen.**

Hingegen muss angeführt werden, dass der Lärmpegel bei Blockmodulation unangenehmer und viel grösser ist als bei Sinusmodulation.

ERGEBNISSE

Mit 3 handelsüblichen 3kW-3000U/min Asynchronmaschinen, einer kostengünstigen asiatischen Maschine (HB 100L), einer italienischen Maschine mit Dahlander Wicklung (ETR DN100) und einer hocheffizienten ABB-Maschine (ABB M3AA), wurden die Verluste im Leerlauf und der Wirkungsgrad mit Belastung bestimmt, im Netzbetrieb und mit Wechselrichter-Speisung.

Diese Werte wurden verglichen mit den Resultaten der gleichen Tests mit einer Permanent-Magnet-Maschine, die als Synchronmaschine bestellt und als brushless DC Maschine geliefert wurde, also mit trapezförmiger induzierter Spannung (BLDC DM SNP).

Bei den **Leerlaufmessungen** ergibt sich eine **klare Überlegenheit der Permanet-Magnet-Maschine** sowohl bei den mechanischen Verlusten (ca. ein Drittel der ASM-Werte), als auch bei den Kupferverlusten (kein Blindstrom) und den Eisenverlusten (ca. die Hälfte der ASM Werte). Ebenfalls ergaben die Messungen der Maschinen im Leerlauf mit ungefiltertem Wechselrichterbetrieb weniger Verluste bei der Permanent-Magnet-Maschine. Bei den untersuchten Maschinen sollte die Schaltfrequenz zwischen 5kHz und 20kHz liegen.

Die **Lastmessungen** wurden bis zu einer Wellenleistung von 2.25kW durchgeführt, da die Permanent-Magnet-Maschine nicht die spezifizierte induzierte Spannung erreichte. Im Netzbetrieb übersteigt der **Wirkungsgrad der Permanent-Magnet-Maschine** bei 500W Leistung die 85% Marke und erreicht einen **Maximalwert von 90%**, im Vergleich zum Wirkungsgrad der Asynchronmaschinen, der bei der gleichen Leistung zwischen 52% und 72% liegt, mit den Maximalwerten zwischen 77% und 87%.

Beim verwendeten Wechselrichter für die Asynchronmaschinen wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 96% gemessen. Allgemein kann bemerkt werden, dass durch die **Einfügung eines Wechselrichters für Asynchronmotoren der Wirkungsgrad des Antriebssystems im oberen Leistungsbereich um ca 5% abnimmt.**

Bei der **Permanet-Magnet-Maschine** ist der **Wirkungsgrad** am höchsten, wenn die Modulationsart des **Wechselrichters** der induzierten Spannung angepasst wird. Bei der getesteten brushless-DC-Maschine ergab sich bei der **Blockmodulation ein um 1%-2% höherer Wirkungsgrad als bei der Sinusmodulation.**

5. MARKTBEZOGENE AUSSAGEN ZU DEN EFFIZIENTEN PERMANENT MAGNET MOTOREN

EINLEITUNG

Die grösste Gruppe der Asynchronmotoren am Markt, im Bereich 1 – 100kW sind als IEC Normmotoren ausgeführt. Bekannte Hersteller wie *Siemens*, *ABB*, *SEW* liefern diese Motoren in grosser Stückzahl in den Markt. Technisch sind diese Normmotoren weitgehend als Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufern ausgeführt.



Abb. 21: Ein Normmotor in seine Einzelteile zerlegt.

Für eine problemlose mech. Verbindung mit der Abtriebsmechanik sind die Flansche und die Wellen genormt. Ein Gehäuse mit Fussausführung dient zur Montage des Normmotors auf eine Grundplatte. Die Baugrössen der Normmotoren werden durch Zahlen angegeben. Die Zahl gibt dabei die Achshöhe zwischen der Grundplatte bis zur Wellenmitte an. Bei einem IEC 80 Motor ist die Achshöhe somit 80mm. Die Gehäuse der kleineren Normmotoren sind in Aluminium, die der grösseren Motoren in Stahlguss ausgeführt.

Die vorliegende Studie vergleicht Asynchron- mit Permanent-Magnet-Motoren unter dem Argument der Effizienz. Prinzipiell unterscheidet sich der Permanent-Magnet-Motor im Aufbau nur durch den Rotor, der mit Permanent-Magneten bestückt ist. Der magnetbestückte Läufer beeinflusst den Wirkungsgrad der el. Maschine günstig. Auch Permanent-Magnet-Motoren lassen sich gut in IEC Normgehäuse einbauen.

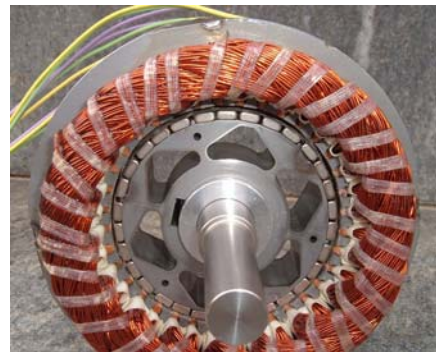


Abb. 22: Rotor / Stator eines Permanent-Magnet-Motors

WO ENTSTEHEN DIE VERLUSTE?

Die Einzelverluste im Motor entstehen:

- Im der Wicklung des Stators, verursacht durch den Stromfluss durch die el. Leiter.
- Im Rotor der Asynchronmaschine durch den Stromfluss in den Stäben des Käfigs.
- Verluste durch ummagnetisieren des Eisens.
- Mechanische Reibungsverluste in den Lagern und Reibungsverluste der Luft im Spalt zwischen Rotor und Stator und am Lüfter.
- Zusatzverluste durch el. Oberwellen, Stromverdrängung etc.

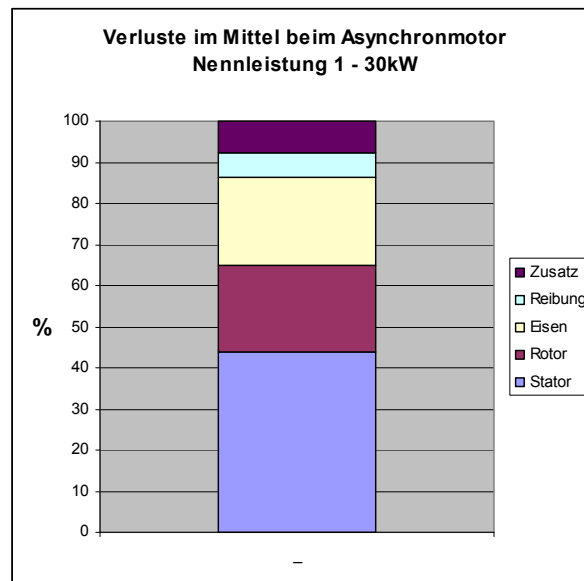


Abb. 23: zeigt die prozentualen Verluste von Asynchronmotoren, gemittelt im Bereich 1 – 30 KW.

Bedeutend für die Steigerung des Wirkungsgrads bei der Asynchronmaschine sind:

- Mehr Aktivmaterial, also das vergrößern des Querschnitts der Leiter bei der Wicklung und beim Aluminium im Rotor, sowie mehr Eisen beim Rotor und Stator.
- Durch den Materialwechsel bei den el. Leitern am Rotor von Aluminium zu Kupfer. Damit lässt sich der el. Widerstand um rund 40% reduzieren.
- Mit einer besseren Blechqualität sinken die Eisenverluste. Höhere Qualität bedeutet auch grössere Verkaufspreise. Die sinnvolle Reduktion der Eisenverluste durch bessere Bleche liegt etwa bei 20%.

Mehr Aktivmaterial führt zwangsläufig zu grösseren Abmessungen des Motors und mit dem Kupfer erkaufte man sich schwere Rotoren. Deshalb sind IE2 Normmotoren schwerer als IE1 Motoren. Abhängig von der Stufung der IEC Normreihe wird für einen IE2 Normmotor sogar der Wechsel zur nächst höheren IEC Baugrösse nötig.

***Mit dem Wechsel des Kurzschlussläufers
zu einem Permanent-Magnet-Rotor lassen
sich elegant Verluste umgehen !!!***



Abb. 24:

Die Magnete des Rotors bauen das Magnetfeld im Motor ohne Zuführung von el. Energie auf. Der Rotor trägt keine el. Leiter mehr. Die Verluste durch Stromwärme sind am Rotor eliminiert. Der Rotor dreht synchron mit dem Statorfeld. Das Eisen des Rotors sieht kein magn. Wechselfeld mehr. Verluste durch ummagnetisieren des Eisens im Rotor entfallen. Durch diese Massnahmen sinken die Verluste im Motor exponential, da alle Verlustquellen auch mit dem Statorstrom verkettet sind. Jede Reduktion der Verluste im Motor führt zu einem Absinken des el. Aufnahmestroms und somit unmittelbar auch zu einer Verringerung der Stromwärmeverluste in den Windungen des Stators. In diesen Massnahmen begründet sich, dass die **Permanent-Magnet-Maschine**, bei vergleichbaren Leistungsdaten, **effizienter arbeitet und kompakter gebaut** ist als die Asynchronmaschine. Unter dem Aspekt der Kompaktheit lassen sich zwei Aussagen ableiten:

- Einsparung von Rohstoffen und Gewicht.
- Kleinere Anlaufenergie durch reduziertes Massenträgheitsmoment des Rotors

5.1 EINSPARUNG VON ROHSTOFFEN UND GEWICHT

Hohe Energiepreise wirken sich unmittelbar auf die Kosten der verbrauchten Elektrizität für den Betrieb von Elektromotoren aus und erhöhen ebenfalls die Kaufpreise von Normmotoren, da Aluminium und Kupfer wesentliche Bestandteile eines Normmotors sind. Diese beiden Rohstoffe benötigen bei der Herstellung hohe Mengen an Energie.

Hohe Energiepreise fördert die Akzeptanz von effizienten Permanent-Magnet-Motoren am Markt. Ungünstig verhalten sich hohe Energiepreise beim IE2 und IE3 Asynchronmotor, der seine höhere Effizienz durch Mehraufwand an Gewicht, erkaufte. Diese Aussage gilt in einem weiten Leistungsbereich.

- Der gemessene Permanent-Magnet-Motor BLDC-DM-SNP: 3kW Wellenleistung, 3600 U/min, Wirkungsgrad 90% wiegt 12.7kg (ohne Lüfter), die Baugrösse ist IEC 90.
- Der gemessene IE3 Normmotor ABB M2AA: 3kW Wellenleistung, 2910 U/min, Wirkungsgrad 87.5 % wiegt 25.2 kg, die Baugrösse ist IEC 100.

- Ein Permanent-Magnet-Motor, gemäss Katalogangaben: 290kW Wellenleistung, 750 U/min, Wirkungsgrad 96.1 % wiegt 1605 kg, die Baugrösse ist IEC 315.
- Ein Normmotor, gemäss Katalogangaben: 315kW Wellenleistung, 743 U/min, Wirkungsgrad 96.1 % wiegt 2700 kg, die Baugrösse ist IEC 400.

Der gemessene 3kW Permanent-Magnet-Motor BLDC-DM-SNP ist in der Baugrösse IEC 90 ausgeführt. Die 2 poligen 3kW Normmotoren benötigen bereits eine Baugrösse IEC 100.

Im Bereich von einigen 100 kW nähern sich die Wirkungsgrade der beiden Motorenarten einander an. Der Materialaufwand bei den Permanent-Magnet-Motoren ist signifikant kleiner als bei den Normmotoren.

Eine Berechnung auf Basis der Rohstoffpreise zum Zeitpunkt als die Studie entstand, zeigt folgendes:

Die Kosten der eingesparten Rohstoffe beim schwereren IE2 Normmotor bezahlen den Mehraufwand an Magnetmaterial beim leichteren Permanent-Magnet-Motor.

5.2 KLEINERE ANLAUFENERGIE DURCH REDUZIERTES MASSENTRÄGHEITSMOMENT DES ROTORS

Das Massenträgheitsmoment der Permanent-Magnet-Motoren ist deutlich kleiner. Im Bezug zu einem IE2 / IE3 Normmotor spart der Permanent-Magnet-Motor deutlich an Anlaufenergie.

Bei häufigem Start-Stopp Betrieb sind effiziente Permanent-Magnet-Motoren einzusetzen.

Das Massenträgheitsmoment bei einem:

- berechneten Permanent-Magnet-Motor, 3kW Wellenleistung, 3600 U/min, Baugrösse IEC 90, liegt bei 0.0019 kgm^2
- IE3 Normmotor, gemäss Katalogangaben, 3kW Wellenleistung, 2910 U/min, Baugrösse IEC 100, liegt bei 0.005 kgm^2 .

Die bevorzugten Anwendungen sind hier, häufig benutzte automatische Türen, Aufzugsantriebe. Jeder Einsatz mit häufigen Drehzahlverstellungen, wie Förderanlagen mit starkem Wechsel der Geschwindigkeiten, Automations- und Handlingsysteme mit nicht zu hohen Anforderungen an die Genauigkeit.

Hochdynamische Servomotoren für den Antrieb von Werkzeugmaschinen fallen ebenfalls unter diese Empfehlung. Aus preislichen Gründen verbietet sich aber deren Einsatz, ausserhalb von genauen Positionierungsaufgaben.

5.3 Höhere Wirkungsgrade bei kleineren Leistungen

Die Differenz der Wirkungsgrade zwischen Permanent- Magnet-Motoren und Normmotoren vergrößert sich mit abnehmender Baugröße. Die hohen Stückzahlen am Markt liegen im unteren Leistungsbereich bis 22kW. Im Teillastbereich ist die Differenz der Wirkungsgrade zu Gunsten des Permanent-Magnet-Motors noch deutlicher.

Deshalb sollen auch Kleinstkraftwerke mit Permanent-Magnet-Generatoren ausgerüstet sein.

In diese Rubrik gehört die Elektrizitätserzeugung aus Wasser, Wind und Biomasse (hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung). Mit der Elektrizitätserzeugung vor Ort entfallen zusätzlich die Verluste durch den Stromtransport vom Grosskraftwerk bis zum Endverbraucher. Dieser Stromtransport bringt Verluste bis zu 10% mit sich. (2% bei der Übertragung, 8% bei der Verteilung). [4]



Abb. 25



Abb. 26



Das Bild 25 zeigt eine Pelton-Turbine für ein Klein-Wasserkraftwerk mit einem Permanent-Magnet-Generator. Im Bild 26 ist ein Permanent-Magnet-Lineargenerator [9] abgebildet. Der Generator arbeitet in einer Stirling-Freikolbenanlage. (Kraft-Wärme-Kopplung)

5.4 GETRIEBEMOTOREN / DIREKTANTRIEBE

Elektrische Getriebemotoren werden am Markt in hoher Zahl eingesetzt, wenn niedrige Drehzahlen und hohe Drehmomente gefordert sind. Die mechanischen Getriebe sind als Stirnrad-, Kegelrad-, Planeten-, Schneckengetriebe oder als Kombinationen davon, ausgeführt. Namhafte Hersteller setzen IEC Normmotoren (Asynchronmotoren) für den Antrieb von Getrieben ein. Mit hochpoligen Permanent-Magnet-Motoren, vorzugsweise mit grossem Aussendurchmesser gebaut, lassen sich ebenfalls hohe Drehmomente realisieren. Diese getriebelosen Direktantriebe stehen somit in Konkurrenz zu den Getriebemotoren.

Begründet in der bedeutenden Präsenz am Markt ist eine effizienzbezogene Untersuchung der Getriebemotoren angebracht. Als Datenquelle dient der Katalog eines namhaften europäischen Herstellers von Getriebemotoren. Die Untersuchung erfolgt bei den Leistungsstufen 3, 5.5, 15, 45kW. Betrachtet werden die Abtriebsdrehzahlen in den Stufen 10, 100, 725 U/min.

Die Untersuchung zu den Getriebemotoren zeigt, dass sich mit dem Einsatz von effizienten Motoren bei hohen Getriebeuntersetzungen der Gesamtwirkungsgrad, sowohl mit Stirnrad-, wie auch mit den untersuchten Schneckengetrieben signifikant vergrößern lässt. Bei kleinen Getriebeuntersetzungen und Leistungen **ab einigen kW ist davon auszugehen, dass Permanent-Magnet-Direktantriebe effizienzbezogen den Getriebemotoren überlegen sind.**

In der heutigen Krise der Automobil-Industrie mit Fahrzeugen mit hohem Verbrauch an fossilen Treibstoffen, sind Elektrofahrzeuge im Trend. Der hocheffiziente Permanent-Magnet-Motor ist der bevorzugte Antrieb für Elektrofahrzeuge, da mit steigender Effizienz des Motors eine Reduktion des Gewichts der Lithium-Ionen Akkus einhergeht. Permanent-Magnet Direktantriebe mit höchsten Drehmomenten werden als Radnabenmotoren gebaut. Beim Einsatz von Radnabenmotoren in Automobilen ist auf die ungefederte Masse hinzuweisen. Bild 27 zeigt die Integration eines Permanent-Magnet-Motors in ein Rad für den Antrieb von kleinen Elektrofahrzeugen.



Abb. 27

5.5 BETRIEBSVERHALTEN

PERMANENT- MAGNET- MOTOR DIREKT AM DREHSTROMNETZ.

Dieser Punkt ist in dieser Zusammenfassung nicht aufgeführt. Begründet im grossen Markt für drehzahlverstellbare Motoren für Strömungsmaschinen wurde der direkte Netzbetrieb nach dieser Studie nicht mehr weiter verfolgt.

BETRIEB DER MOTOREN MIT DREHZAHIVERSTELLUNG

Untersuchungen [5] zeigen, dass in der Schweiz 45% der el. Energie zum Antreiben umgesetzt wird. Nur der Antrieb von Strömungsmaschinen alleine benötigt rund 30% des schweizerischen Stromverbrauchs. (Pumpen, Lüftern, Kompressoren). Die zugehörigen Antriebsmotoren arbeiten mit hohen Betriebsstundenzahlen im Jahr und viele kommen den 8760 Stunden sehr nahe. Gegenüber ineffizienten Drosselregelungen sparen el. Antriebssteuerungen, welche die Drehzahl der Strömungsmaschinen der tatsächlichen Leistung des Massstroms anpassen, bedeutend Energie. Die höheren Investitionskosten für den Wechselrichter zur Drehzahlregelung, können sich bereits nach wenigen Monaten amortisieren. Quellen für Software Tools zu den Amortisationsrechnungen finden sich unter www.topmotors.ch.

Zum Energiesparen sind deshalb die Permanent-Magnet-Motoren die bevorzugten Antriebe für Strömungsmaschinen, weil:

- Ein echter Bedarf für Drehzahlverstellung vorliegt.
- Ein grosses Potenzial zum Sparen von el. Energie durch lange Laufzeiten der Motoren gegeben ist.
- Die eingesparte Energie die Investitionen für die Drehzahlregelung schnell amortisiert.
- Bei Drehzahlverstellung auch der Normmotor einen Wechselrichter mit Kostenfolge braucht.
- Der Wirkungsgrad beim Permanent-Magnet-Motor höher liegt als beim IE1 / IE2) Normmotor. (bei Leistungen unter 100kW)

Bemerkenswert ist die Entwicklung der Permanent-Magnet-Motoren in Heizungs-Umwälz-Pumpen. Der **Wirkungsgrad** von effizienten drehzahlgeregelten Permanent-Magnet-Pumpen konnte **um das drei- bis vierfache gesteigert** werden, gegenüber einer Umwälz-pumpe mit Asynchronmotor. [6]

5.6 KOSTEN

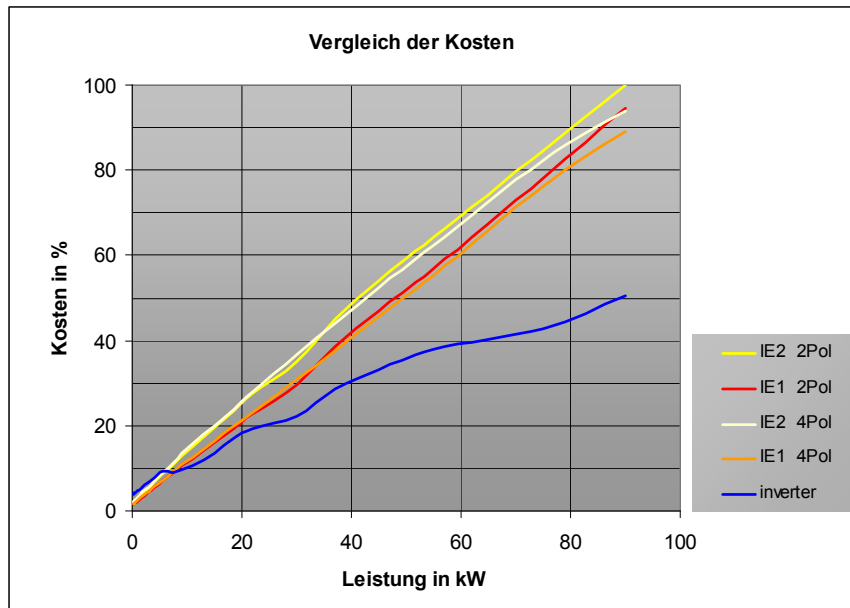


Abb. 28

Diagramm 28 zeigt die Kosten von Normmotoren und Wechselrichter mit zunehmender Leistung. Dabei nehmen die Kosten der Wechselrichter in Relation zu den Motoren mit zunehmender Leistung ab.

Der Aufwand an Bauteilen eines Wechselrichters für einen Normmotor ist vergleichbar mit dem Aufwand eines Wechselrichters für einen Permanent-Magnet-Motor. Mit dem Wechselrichter sind beide Motorenarten Drehzahl-verstellbar. Eine Kostenrechnung [8] zeigt auf, dass der effiziente Permanent-Magnet-Motor mit dem Asynchronmotor in Konkurrenz treten kann, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. **Die Kosten der eingesparten Rohstoffe beim schwereren IE2 Normmotor bezahlen den Mehraufwand an Magnetmaterial beim leichteren Permanent-Magnet-Motor.**

5.7 GRENZEN DER BAUGRÖSSE

Bis zu einigen 100kW sind herstellungsbezogen für effiziente Permanent- Magnet-Motoren keine Grenzen erkennbar.

5.8 POTENZIAL DER ENERGIE EINSPARUNG MIT EFFIZIENTEN PERMANENT- MAGNET- MOTOREN IN DER SCHWEIZ.

Die Berechnungen aufgeführt in der Studie“ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren,, [1] ermitteln einen Durchschnittswert von 5% für die Energieeinsparung, wenn in der Schweiz die Normmotoren in den bestehenden Anlagen gegen effiziente Permanent-Magnet-Motoren ausgetauscht würden.

Drehzahlregelung mit optimierten Betriebsprozessen bei Anlagen, die mit Elektromotoren angetrieben werden, führen nochmals zu einer Energieeinsparung von 20% [7]

Das Potenzial der Einsparung mit effizienten drehzahlgeregelten Permanent- Magnet Motoren mit optimierten Betriebsprozessen in der Schweiz beträgt rund 4 Mrd.kWh oder einer Generatorleistung von rund 500 MW im Dauerbetrieb.

Diese Berechnungen berücksichtigen, die bereits heute am Markt arbeitenden effizienten Antriebe in Permanent-Magnet-Technologie nicht. Diese Berechnungen des Energiesparpotentials berücksichtigen nur die Strömungsmaschinen mit einem Anteil von 30% am Stromverbrauch. Der Verbrauch aller Elektromotoren in der Schweiz beträgt aber 45% [5].

Eine Diplomarbeit der Hochschule Luzern zur Ökologie von Elektromotoren [10] zeigt, dass bei hohen Betriebsstunden pro Jahr, auf höchste Effizienz zu optimieren ist. Das bedeutet den Einsatz von optimierten Betriebsprozessen, Drehzahlverstellung und hocheffiziente Elektromotoren. Die „graue Energie“ und die damit verbundenen Treibhausgase, welche bei der Herstellung eines Wechselrichters und dem Elektromotor entstehen, sind unbedeutend gegenüber der Belastung, welche die Elektrizitätserzeugung für den Betrieb des Antriebssystems über die gesamte Lebensdauer hervorruft.

5.9 FÜR WELCHE ANWENDUNGEN SIND PERMANENT- MAGNET- MOTOREN NICHT GEEIGNET

- Wenn kurze Betriebszeiten vorliegen und bei motorischen Apparaten, deren Lebensdauer sinnvollerweise nur einige 100 Stunden beträgt. Für diese Anwendungen sind Universalmotoren (Kollektormotoren für Netzbetrieb) oder einphasige Normmotoren mit Hilfskondensatoren, kostenbezogen, besser geeignet. Typische Beispiele sind: Küchengeräte, Heimwerkergeräte, Staubsauger.etc.
- Bei direktem Netzanschluss und langen Betriebszeiten, vorzugsweise bei Nennlast, ist der IE2 und IE3 Asynchronmotor nach heutigem Stand der Technik besser geeignet.

Andere Anwendungen, die grundsätzlich gegen die Permanent-Magnet-Maschine sprechen würden, konnten wir im Laufe dieser Studie nicht finden. Gewisse Einschränkungen gibt es:

- Beim Einsatz mit explosiven Stoffen, da Neodym stark mit Wasserstoff reagiert.
- Asynchronmotoren für Anwendungen mit direkten Netzanschluss benötigen keine Elektronik. Das Antriebssystem ist somit robuster.
- Im Gegensatz zum Asynchronmotor kann der Permanent-Magnet-Motor nicht polumschaltbar ausgeführt werden.

6. WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme ist der Austausch von Normmotoren, **über die genormte Wellen-Flanschverbindung**, mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren. Die weiterführende Arbeit „**Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor 3kW**“ [8] setzte sich dieses Ziel. Die Wahl der Baugrösse fiel auf IEC 100. Dadurch kann ein 2 poliger Normmotor mit einer Wellenleistung von 3kW in einer Anlage, mechanisch kompatibel, durch einen effizienten Permanent-Magnet-Motor ausgetauscht werden. Sowohl bei Neuanlagen in der Produktion, wie auch in bestehenden Anlagen, wenn ein älterer Normmotor ersetzt wird.

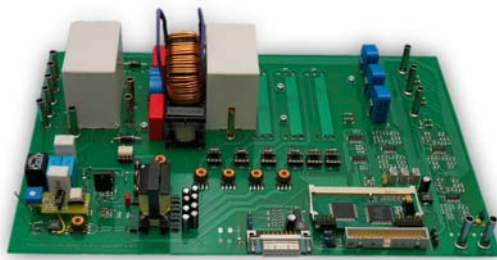


Abb 29: Wechselrichter PMM-Drive



Abb 30: Motor BLDC CM-IEC 3kW

BLDC CM-IEC 3kW bezeichnet den effizienten brushless DC Motor gebaut von Circle Motor AG. Zur Bestimmung des Gesamtwirkungsgrads ist der **BLDC CM-IEC 3kW** Motor mit dem Wechselrichter **PMM- Drive** verbunden. Der **PMM- Drive** ist so gebaut, dass die Drehzahl des **BLDC CM-IEC 3kW** Motors verstellbar ist.

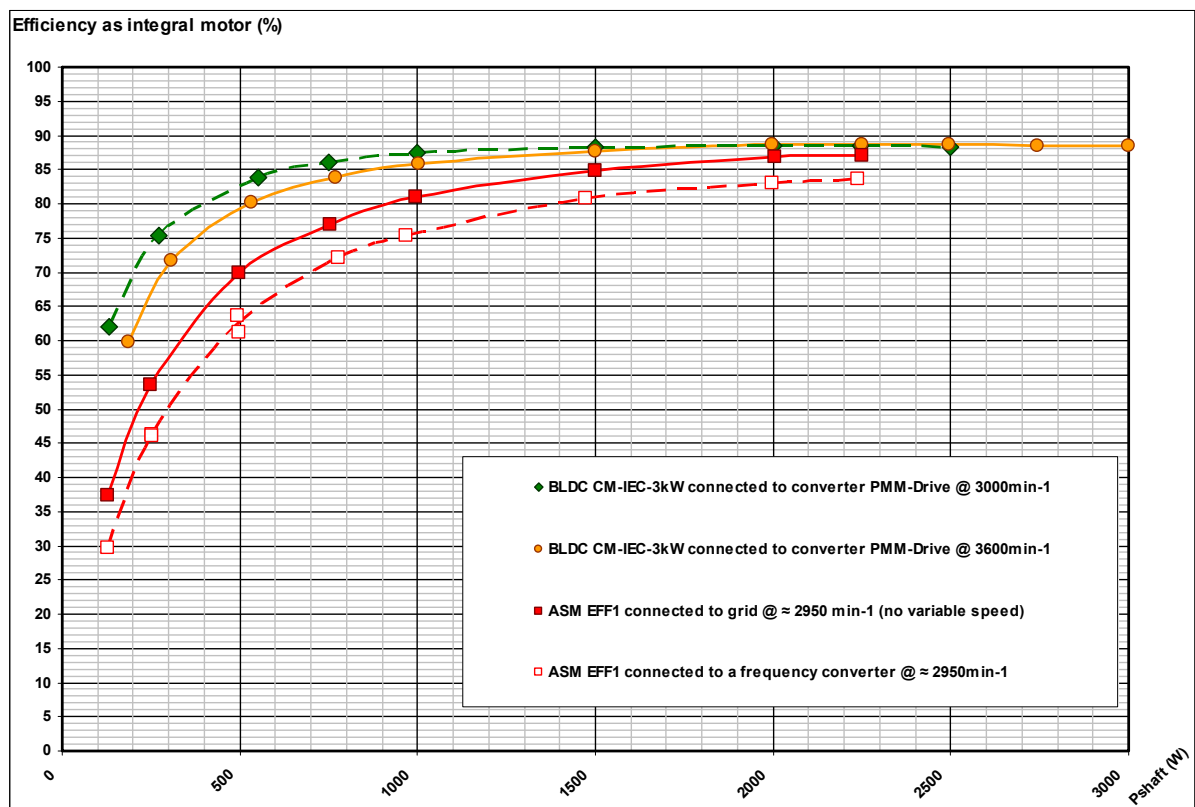


Abb. 31 zeigt die Wirkungsgrade der gemessenen Motoren mit Wechselrichter
(Ausnahme: rote durchgehende Linie ⇔ Asynchronmotor direkt mit dem Netz verbunden)

Der maximale gemessene Wirkungsgrad des Wechselrichters PMM-Drive beträgt 96.5 % und des BLDC CM-IEC 3kW Motors 92%. Mit dem Vorteil des drehzahlvariablen Betriebs ist die Effizienz des gebauten BLDC CM-IEC 3kW Motors zusammen mit dem Wechselrichter PMM-Drive immer höher, als die des gemessenen Asynchronmotors ASM ABB M3AA, auch dann, wenn der Asynchronmotor direkt mit dem Netz verbunden ist.

In Tabelle 32 sind die Gewichte pro Komponente des Permanent-Magnet-Motors **BLDC CM-IEC-3kW** aufgeführt. Zur Bestimmung einer Ökobilanz sind auch die Anteile der wichtigen verwendeten Rohstoffe angegeben.

Gewichtstabelle des 3kW Permanent-Magnet-Motors (ohne Elektronik)	
nach Komponenten	Gewicht in kg
Statoreisen	4.3
Kupfer der Wicklung	1.7
NdFeB Magnete	0.295
Rotor (Fe) ohne Magnete	1.9
Welle ohne Lager	1.17
Kugellager A	0.21
Kugellager B	0.11
Statorleergehäuse inkl. Klemmenkasten, Flansch mitte, Enddeckel, ohne A-Flansch, alle Teile aus ALU	3.1
Alu A-Flansch inkl Sinterstahl-Buchse	0.82
Gesamtgewicht PM Motor	13.605

nach Rohstoffen	Gewicht in kg
FE	7.69
Cu	1.7
ALU	3.92
NdFeB	0.295

Tabelle 32 zeigt einen Vergleich der Gewichte

Der Permanent-Magnet-Motor BLDC CM-IEC-3kW ist rund 10 kg leichter als der untersuchte Asynchronmotor ASM ABB M3AA.

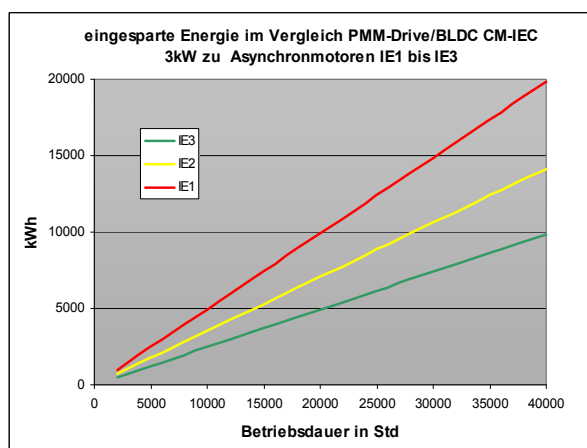


Diagramm 33

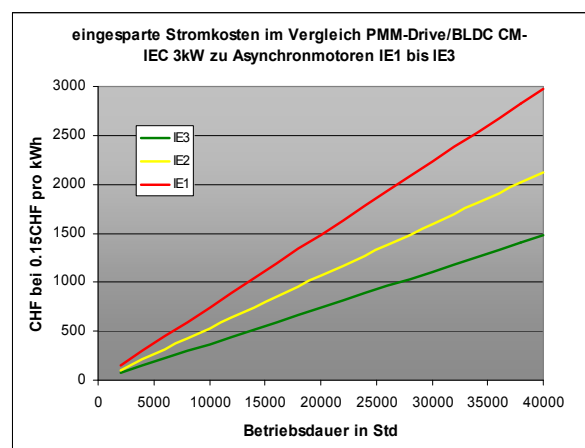


Diagramm 34

Die Diagramme 33 / 34 basieren auf dem Vergleich des PMM-Drive/BLDC CM-IEC 3kW mit Asynchronmotoren der Effizienzklasse IE1 bis IE3 angeschlossen an einen Wechselrichter und zeigen die eingesparte Energie und die eingesparten Stromkosten. (mittlerer Strompreis 0.15 CHF/kWh)

Die **Kostenrechnung** zeigt auf, dass der **effiziente IEC 3kW Permanent-Magnet-Motor mit dem Asynchronmotor in Konkurrenz treten kann**, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. Hier liegt auch das grösste Energiesparpotenzial bei drehzahlverstellbaren Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren.

SYMBOLVERZEICHNIS, DEFINITIONEN

Asynchronmotor, Induktionsmotor und **Normmotor** sind gleich bedeutend. Der Rotor ist als Kurzschlussläufer gebaut.

Permanent-Magnet-Motor ist ein Motor, dessen Rotor mit Permanent-Magneten bestückt ist.

In diesem Bericht wird die Bezeichnung **Wechselrichter** für eine elektronische Steuerung zur Drehzahlverstellung von Permanent-Magnet-Motoren und Asynchronmotoren verwendet.

Brushless DC Steuerung bezeichnet das Ansteuerverfahren eines Permanent-Magnet-Motors mit der Charakteristik eines Gleichstrommotors, jedoch sind die mechanischen Bürsten durch elektronische Komponenten ersetzt. Ein Permanent-Magnet-Motor, der sich an einer brushless DC Steuerung wie ein Gleichstrommotor verhält, wird als **brushless DC Motor** bezeichnet.

HF ist die Bezeichnung für Hochfrequenz.

f/U ist das Steuerungsverfahren von Wechselrichtern für Asynchronmaschinen.

IEC ist die Bezeichnung für International Electrotechnical Commission.

REFERENZEN

- [1] *Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren*. Technologiestudie des Bundesamts für Energie, Juni 2006, Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch
- [2] *Kienle + Spiess/Katalog* : Spitzentechnologie und Know-how für den Bau elektrischer Maschinen
- [3] *Hocheffizienter, getriebeloser Antrieb*: Auftrag des Bundesamts für Energie, 2004
Vivatic GmbH, Gebrüder Meier AG, Hochschule Wallis
- [4] *Grünbuch über Energieeffizienz*, Kommission der europäischen Gemeinschaft KOM(2005) DE 265 Seite 28
- [5] www.motorsummit.ch
- [6] *Workshop „Effiziente Elektroantriebe“* bei Swissmem 20.1.05/ Spezialantriebe mit komplexen Rahmenbedingungen
Biral AG, Wolfram Mayer Seite 2 und 5
- [7] www.topmotors.ch
- [8] *Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor 3kW*: Auftrag des Bundesamts für Energie, April 2008
Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch
- [9] *Effizienter Lineargenerator / Linearmotor für Kolbenmaschine*: Auftrag des Bundesamts für Energie, Juni 2008
Circle Motor AG, www.electricity-research.ch
- [10] *Effizienz Normmotoren / Ökobilanz und Demonstration*: Bachelordiplomarbeit Thomas Gander, Norbert Büchel,
Hochschule Luzern, Juli 2007

QUELLEN DER ABBILDUNGEN

Hochschule Luzern, Technik und Architektur
Aus Software Maxwell 3D, RMXprt
Hochschule Wallis
Circle Motor AG

Abb. 2-6
Abb. 1
Abb. 7–20, 29,31
Abb. 21–28,30, 32-34