



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

EFFIZIENTER IEC PERMANENT- MAGNET-MOTOR (3KW)

Schlussbericht

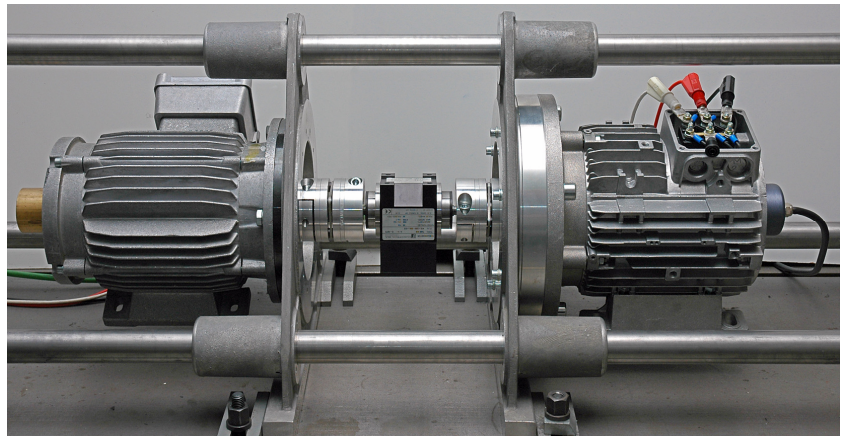
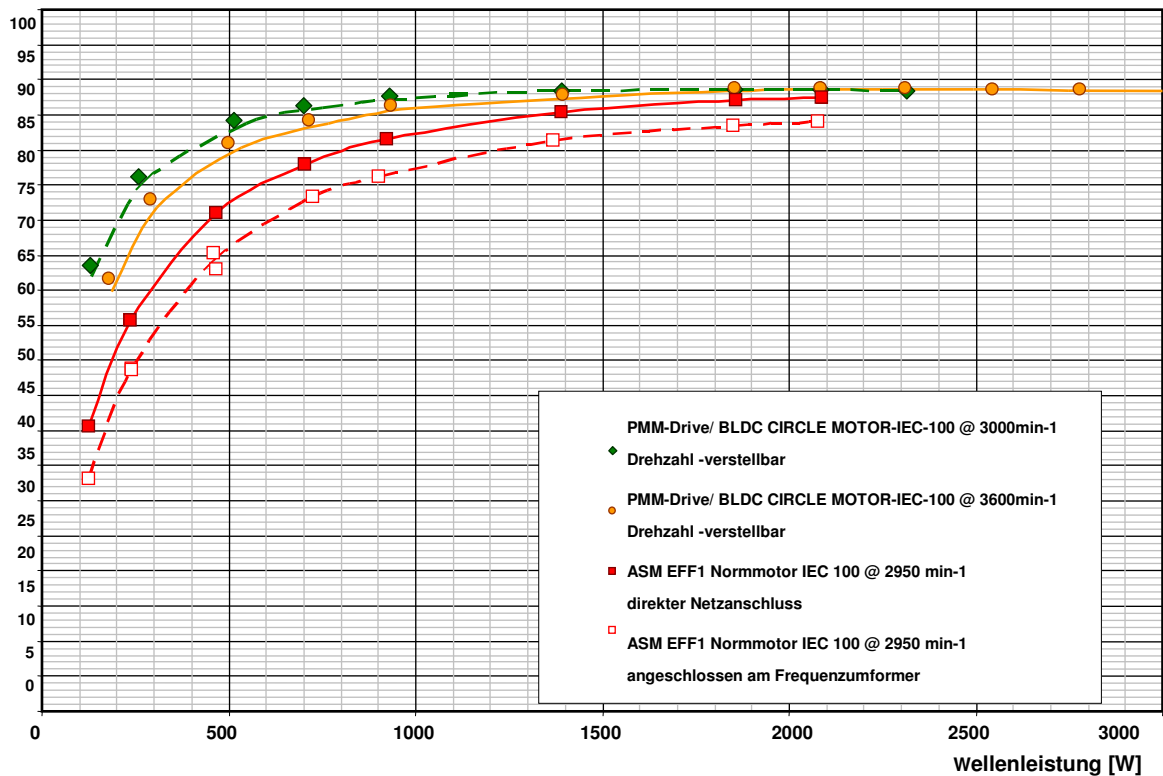
Ausgearbeitet durch

Markus Lindegger, Circle Motor AG
Tannackerstrasse 25, CH-3073 Gümligen,
info@circlemotor.ch, www.circlemotor.ch

Hans Peter Biner, Blaise Evequoz, haute école valaisanne
route du rawyl 47, CH-1950 Sion,
hpeter.biner@hevs.ch, blaise.evequoz@hevs.ch, www.hevs.ch

Dominique Salathé, Hochschule Luzern, IIEE
Technikumsstrasse 21, CH-6048 Horw,
dominique.salathe@hslu.ch, www.hslu.ch

Wirkungsgrad [%]



Impressum

Datum: 8. April 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -Anwendungen

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, thilo.krause@bfe.admin.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152353 / 100915

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Resumé, Abstract.....	4
1. Ausgangslage.....	5
2. Ziel der Arbeit.....	5
3. Methode.....	5
3.1 Hochschule Luzern.....	6
3.2 Hochschule Wallis.....	7
3.2.1 Wahl des Konzepts.....	7
3.2.2 Auslegung und Bau.....	9
3.2.3 Regelstrategie.....	9
3.2.4 Simulation des Systems.....	10
3.3 Circle Motor AG.....	12
4. Ergebnisse.....	14
4.1 Evaluierung und Vergleich der quantitativen Resultate.....	15
4.2 Synchronmaschine: Parameter und Ersatzschaltung.....	17
4.3 Leerlaufdaten der Maschine BLDC CM-IEC-3kW.....	17
4.4 Kenndaten der Maschine BLDC CM-IEC-3kW unter Belastung.....	19
4.5 Optimierung des Abwärtsstellers beim PMM-Drive Konverter.....	21
4.6 Wirkungsgrad des PMM-Drive Konverters.....	22
4.7 Norm IEC 61000-3-2 (Klasse A).....	25
5. Diskussion.....	26
5.1 Wirkungsgrad der Maschine mit angeschlossenem Konverter.....	26
5.2 Verbesserung des Maschinenstroms bezüglich Effizienz.....	27
5.3 Gewicht und Rohstoffverbrauch.....	29
5.4 Kosten.....	30
6. Schlussfolgerung.....	31
Symbolverzeichnis.....	32
Referenzen.....	32
Anhang.....	

Zusammenfassung

Effiziente Permanent-Magnet-Motoren erreichen im Bereich bis zu 100kW einen höheren Wirkungsgrad als Asynchronmotoren (Normmotoren). Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme zum Energiesparen ist der Austausch von ineffizienten Normmotoren. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen 3kW Permanent-Magnet-Motor in ein IEC Normgehäuse einzubauen und auf hohe Effizienz zu maximieren. Ebenfalls ist eine effiziente Steuerung für Drehzahlverstellung zu entwickeln und herzustellen. Die Effizienz des Motors und der Steuerung ist auf einem Prüfstand nachzuweisen. Diese Aufgaben teilten sich Circle Motor AG, die Hochschulen Wallis und Luzern.

Unter dem Aspekt einer hohen Effizienz und geringen Herstellkosten fiel die Wahl auf das brushless DC Verfahren. Dadurch ergibt sich eine optimale Auslegung beim Motor und der Antriebssteuerung mit dreiphasigem Gleichrichter, Abwärtssteller mit variabler Zwischenkreisspannung und dreiphasigem Wechselrichter mit Blockkommutierung.

Der maximale gemessene Wirkungsgrad der Steuerung beträgt 96.5 % und des Motors 92%.

Mit dem Vorteil des drehzahlvariablen Betriebs ist die Effizienz des gebauten 3kW Permanent-Magnet - Motors mit Steuerung immer höher als die eines gemessenen Asynchronmotors der Klasse EFF1, auch bei direktem Netzanschluss. Der Permanent-Magnet-Motor ist zudem rund 10 kg leichter. Die Kostenrechnung zeigt auf, dass der Permanent-Magnet-Motor mit dem Asynchronmotor in Konkurrenz treten kann, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. Hier liegt auch das grösste Energiesparpotential bei drehzahlverstellbaren Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren.

Resumé

Les moteurs à aimants permanents atteignent un rendement plus élevé que les moteurs asynchrones (moteurs standards), pour des puissances jusqu'à 100kW. Une solution simple et rapide pour réduire la consommation d'énergie est le remplacement des moteurs asynchrones à faible rendement. Le but de ce travail consiste à concevoir et construire un moteur à aimants permanents de 3kW dans un boîtier normalisé IEC, et d'en optimiser les performances. Un convertisseur pour vitesse variable à rendement élevé doit également être développé et réalisé. Les performances du moteur et du convertisseur doivent être démontrées sur banc d'essai. Les tâches à réaliser ont été partagées entre Circle Motor AG et les hautes écoles spécialisées du Valais et de Lucerne.

Pour respecter les contraintes de performances et de réduction des coûts de fabrication, le choix s'est porté sur un moteur de type brushless DC. La configuration optimale retenue pour l'entraînement du moteur est un convertisseur triphasé à redresseur passif, abaisseur de tension à bus DC variable et onduleur à commutation par bloc.

Le rendement maximal mesuré s'élève à 96.5% pour le convertisseur et à 92% pour le moteur.

Tout en bénéficiant de la vitesse variable, le rendement global du moteur à aimants permanents et du convertisseur demeure supérieur à celui d'un moteur asynchrone Eff1, même si ce dernier est directement branché au réseau. **En outre, le moteur à aimants permanents est plus léger de 10 kg. Le calcul des coûts démontre que le moteur à aimants permanents peut concurrencer le moteur asynchrone**, lorsque la vitesse variable est désirée. C'est pour les pompes, les compresseurs et les ventilateurs à vitesse variable que réside le plus grand potentiel d'économie d'énergie.

Abstract

Efficient permanent-magnet motors achieve in the area up to 100kW a higher efficiency than induction machines (standard motors). A simple and fast energy saving option is the exchange of inefficient standard motors.

The objective of this work is to install a 3kW permanent-magnet motor in a standard IEC housing and the optimization of the design for high efficiency. Another objective is the development and the realization of an efficient variable speed control. The efficiency of the motor and the inverter with the control system must be demonstrated by tests. These tasks have been split between Circle Motor AG and the universities of applied sciences Wallis and Lucerne.

Considering high-efficiency and low manufacturing cost, a brushless DC solution was adopted. This resulted in an optimum design of the motor and the control system realized with a three-phase rectifier, a buck converter with variable DC voltage, and a three-phase inverter feeding full positive and negative current to two of the legs simultaneously.

The maximum measured efficiency is about 96.5% for the inverter and 92% for the motor.

With the advantage of the variable speed operation, the efficiency of the realized 3kW permanent magnet motor together with the control system is always higher than the efficiency of a measured class EFF1 induction motor, even with a direct connection to the grid.

The permanent-magnet motor is also about 10 kg lighter. The cost calculation shows that the permanent-magnet motor can be competitive with the induction motor when speed control is desired. This is also the domain with the largest potential for energy savings from variable speed pumps, compressors, fans.

1. Ausgangslage

Der überwiegende Anteil der IEC Normmotoren ist nach dem Asynchronprinzip ausgeführt. Der bedeutendste Anteil der am Markt betriebenen IEC Normmotoren betreffen den Leistungsbereich 1kW bis 22kW. Die Wirkungsgrad-Klassifizierung teilt 2 und 4 polige Normmotoren in die drei Klassen EFF1 bis EFF3 ein, wobei EFF1 die Klasse mit dem höchsten Wirkungsgrad darstellt. Die grösste am Markt eingesetzte Gruppe ist EFF2. Der EFF1 Typ erkauft seine höhere Effizienz durch Mehraufwand beim Kupfer, Aluminium und höher legiertem Elektroblech. Die stark gestiegenen Rohstoffkosten und die damit zusammenhängenden Verkaufspreise hemmen die Ausbreitung der EFF1 Asynchronmotoren.

Die BFE Studie „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“, [1] zeigte auf, dass der Wirkungsgrad bei den Permanent-Magnet-Motoren bis in den Leistungsbereich von 100kW, höher liegt, als bei vergleichbaren Asynchronmotoren.

Diese Studie zeigte auch, dass effiziente Permanent-Magnet-Motoren mit den gleichen Kosten, wie EFF2 Normmotoren, hergestellt werden könnten, wenn die Herstellungsbedingungen etwa gleich wären. Diese Aussage der Kostengleichheit begründet sich in den rasant gestiegenen Rohstoffpreisen, vor allem beim Kupfer und Aluminium. Da das Magnetmaterial nur etwa 1 – 2 % der Masse des Rotors und Stators beträgt, ist es preislich tragbar, zudem lassen sich effiziente Permanent-Magnet-Motoren leichter bauen, als vergleichbare Asynchronmotoren.

Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme wäre ein massgebender Austausch von EFF2 und EFF3 Normmotoren, über die genormte IEC Wellen-Flanschverbindung mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren. Heute ist die Marktdurchdringung mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren aber sehr gering.

2. Ziel der Arbeit

Als Sofortmassnahme wird deshalb ein 3 kW Permanent-Magnet-Motor mit den effizienzbezogenen Erkenntnissen, hervorgegangen aus den BFE Arbeiten: „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“ [1] und „Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1kW“ [2], realisiert mit dem Ziel seine Effizienz nachzuweisen. Die aktuelle Forschungsarbeit ist im Sinne von „Scale Up“ zu verstehen und soll einen Beitrag zur Marktfähigkeit von effizienten Permanent-Magnet-Motoren im kW-Bereich leisten, mit dem Ziel elektrische Energie einzusparen.

Der Permanent-Magnet-Motor in dieser Arbeit ist mechanisch für den Einbau in ein IEC Normgehäuse zu konstruieren, in einem *finite-Element-Programm* auf möglichst hohe Effizienz zu optimieren, aufzubauen und auf dem Prüfstand der Hochschule Wallis auszumessen. Für den Permanent-Magnet-Motor und die Steuerung zur Drehzahlverstellung ist eine möglichst seriennahe Kostenrechnung zu erstellen. Ebenfalls soll die Möglichkeit eines Aufbaus als Integralmotor geprüft werden. Bestätigen sich die erwarteten Resultate, bezüglich Effizienz und Kosten, soll die vorgeschlagene Permanent-Technik unter Einbezug der Industrie, in weiterführenden Schritten bis zu einer Leistungsgrösse von 22 kW ausgeweitet werden.

3. Methode

Die Aufgaben in aktuellen Auftrag teilten sich die Hochschulen Luzern, Wallis und Circle Motor AG.

3.1 Hochschule Luzern

Die erste Aufgabe bestand im Auslegen des effizienten 3 kW Motors im *Maxwell 3D*, sowie im zugehörigen Eingabeprogramm *RMxpert* für genutete el. Maschinen: Es zeigte sich bald, dass die IEC Baugrößen 90 und 100 für den angestrebten Motor geeignet sind. Die Tabelle 1 ist ein Zusammenzug der zahlreich durchgeführten Berechnungen. Die Berechnungen zeigen gut den Einfluss der Effizienz, wenn verschiedene Maschinenparameter und die IEC Baugröße variiert wird. Die Wahl für die zu bauende Maschine fiel auf die Baugröße IEC 100 mit dem Standardblechschnitt 100/4 und einer Eisenpaketlänge von 70mm. Ausschlaggebend war der um 1-2% höhere Wirkungsgrad gegenüber der IEC 90 Grösse. Die Maschine wurde als brushless DC Motor ausgeführt. (Siehe dazu Kapitel 3.3)

Zudem bleibt im IEC 100 Statorgehäuse bei einer Eisenpaketlänge von 70mm noch freier Platz übrig für die Aufnahme der Antriebselektronik (Möglichkeit der Realisierung eines 3kW Integral Sparmotors), was bei der Baugröße IEC 90 aus Platzgründen nicht mehr möglich ist. Da ein 2 poliger 3kW Asynchronmotor ebenfalls die Baugröße 100 aufweist, besteht der grosse Vorteil diese Asynchronmotoren durch effiziente Permanent-Magnet-Motoren mit der gleichen Baugrösse in bestehenden Anlagen einfach und schnell, ohne Änderungen an der Mechanik von bestehenden Anlagen, auszutauschen.

Auslegung des effizienten 3kW Permanent-Magnet- Motors im Maxwell. Bauweise IEC. Erarbeitet durch die Hochschule Luzern.

Veränderbare Parameter					Ergebnisse der Berechnungen					
Stator Fe-Länge [mm]	Luftspalt [mm]	Magnet-Höhe [mm]	Windungs-Typ	Anz Wdg. pro Nut.	FE-Verluste [W]	Cu-Verluste [W]	Wellenleistung [W]	Speed [U/min]	Wirkungsgrad [%]	Drehmoment [Nm]
Permanent-Magnet-Motor mit sinusförmiger Wicklungsspannung, Baugrösse IEC 90, Blechschnitt 6-8Pol, 36 Nuten										
70	1.8	3.2	ganz	24	109	164	3000	2935	91.4	9.8
70	1.7	3.0	ganz	23	115	156	3000	3074	91.5	9.3
70	1.7	2.8	ganz	24	105	168	3000	2970	91.4	9.6
70	1.6	2.6	ganz	24	103	171	3000	2961	91.4	9.7
70	1.2	2.4	ganz	22	119	152	3000	3063	91.4	9.4
70	1.0	2.2	ganz	22	119	154	3000	2968	91.4	9.7
Permanent-Magnet-Motor mit trapezförmiger Wicklungsspannung, Baugrösse IEC 90, Blechschnitt 6-8Pol, 36 Nuten										
70	0.6	2.5	ganz	18	243	73	3000	2940	90.2	9.7
70	0.8	2.5	ganz	18	236	73	3000	3060	90.4	9.4
70	1.0	2.5	ganz	19	209	120	3000	2967	89.9	9.7
70	1.2	2.5	ganz	19	204	120	3000	3087	90.0	9.3
70	1.4	2.5	ganz	20	184	129	3000	3027	90.3	9.5
70	1.6	2.5	ganz	21	167	137	3000	2970	90.5	9.6
70	1.8	2.5	ganz	22	152	147	3000	2923	90.7	9.8
70	2.0	2.5	ganz	22	148	147	3000	3035	90.8	9.4
Permanent-Magnet-Motor mit sinusförmiger Wicklungsspannung, Baugrösse IEC 100, Blechschnitt 4 Pol, 36 Nuten										
70	1.0	2.5	ganz	21	113	143	3000	2995	91.9	9.6
70	1.0	2.5	ganz	21	116	92	3000	3041	93.2	9.4
70	1.2	2.5	ganz	22	106	99	3000	3020	93.3	9.5
70	1.4	2.5	ganz	23	97	106	3000	2997	93.4	9.6
Permanent-Magnet-Motor mit trapezförmiger Wicklungsspannung, Baugrösse IEC 100, Blechschnitt 4 Pol, 36 Nuten										
70	1.0	2.5	ganz	19	154	79	3000	2972	92.5	9.6
70	1.2	2.5	ganz	20	139	85	3000	2927	92.8	9.8
70	1.4	2.5	ganz	20	136	85	3000	3063	92.9	9.4

Tabelle1 zeigt den wesentlichen Zusammenzug der berechneten Maschinendaten.

Im Anhang findet sich eine detaillierte Aufstellung aller Parameter, von zwei in die engere Wahl gezogenen Motoren.

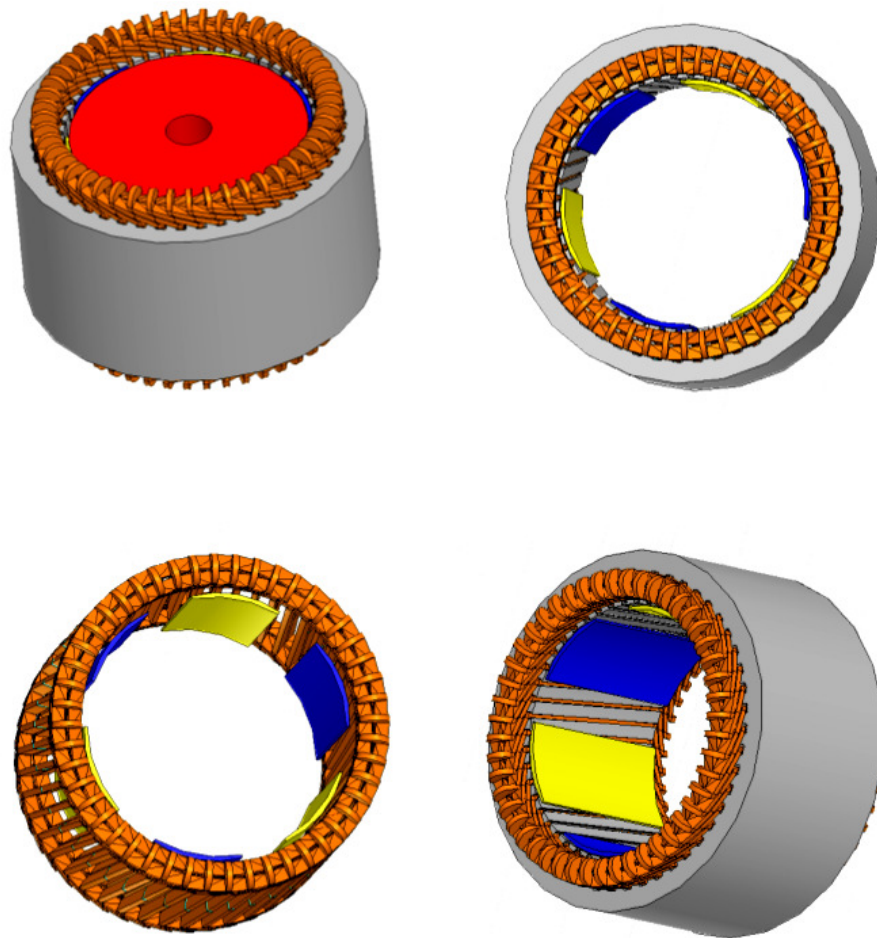


Abb 2 zeigt die Komponenten eines Permanent-Magnet-Motors gezeichnet durch *Maxwell 3D*

3.2 Hochschule Wallis

Die Aufgabe der Hochschule Wallis besteht im Konzeptentwurf, in der Auslegung und im Bau einer effizienten Antriebselektronik mit Drehzahlverstellung zum 3kW Permanent-Magnet-Motor.

3.2.1 Wahl des Konzepts

Ein Projektziel liegt im Ersatz eines 3kW Asynchron Antriebs mit Frequenzumrichter durch einen Permanentmagnet-Maschinen-Antrieb mit einer Antriebselektronik zu Drehzahlverstellung zu gleichen Kosten.

Meistens werden bei Asynchron- oder Permanent-Magnet Antrieben unter 3kW Leistung einphasige Gleichrichter mit Power Factor Corrector (PFC) und pulsweitenmodulierte Wechselrichter (PWM) auf der Maschinenseite verwendet. Mit dem PFC wird eine Zwischenkreisspannung erzeugt, die höher liegt als der Spitzenwert der Wechselspannung. Die Maschinensteuerung erfolgt durch einen PWM Wechselrichter, der unterhalb der Nenndrehzahl als Abwärtssteller arbeitet. Im einphasigen Betrieb kann der Aufbau mit 600V Transistoren erfolgen.

Im Rahmen des Projekts soll ein 3kW Permanent-Magnet-Motor realisiert werden, mit dreiphasiger Speisung. Im Vergleich zu den üblichen Schaltungstopologien wurde eine Struktur mit dreiphasigem Gleichrichter, Abwärtssteller und dreiphasigem Wechselrichter gewählt (Abb 3), und dies aus folgenden Überlegungen:

- a) Mit dem Abwärtssteller wird der Permanent-Magnet-Motor stromgesteuert: Die Regelung des Abwärtsstellerstromes bestimmt direkt das Maschinenmoment. Die Maschinenspannung ergibt sich aus der Drehzahl und der Belastung. In diesem Aufbau ist eine einfache Maschinenregelung ohne Positionsgeber möglich. **Ein einziger kostengünstiger 1200V Transistor** mit rekuperierendem Entlastungsnetzwerk erlaubt die Stromsteuerung bei hoher Schaltfrequenz (Soft Switching) und gutem Wirkungsgrad: Er erzeugt rechteckförmige Netzstromblöcke, deren Gehalt an Harmonischen im interessierenden Leistungsbereich den Normen entspricht. Im Kapitel „IEC 61000-3-2 (Klasse A)“ wird die obere Leistungsgrenze aufgezeigt, bei der diese Norm noch erfüllt wird.
- b) Der maschinenseitige Wechselrichter (Abb3, Q1 – Q6) kann mit 600V Transistoren realisiert werden.

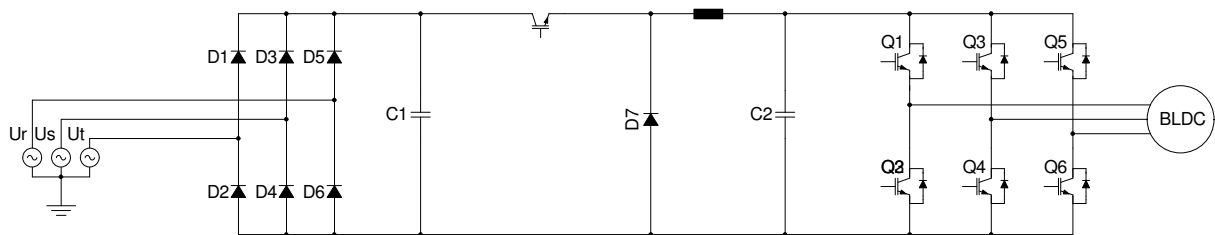


Abb 3: Gewählte Schaltungstopologie

Insbesondere werden die Schalter bei der brushless DC Maschine (trapezförmige Phasenspannungen an der Wicklung) nicht mehr pulsbreitenmoduliert: Die Stromblöcke werden im Grundswingungsverfahren umgeschaltet.

Dadurch können **kostengünstige Schalter** mit wenig Durchlassspannung und höheren Schaltverlusten (hier ohne Nachteil) verwendet werden (z.B. IGBT mit $U_{CE} = 1.1V$ statt $2.1V$).

In diesem Betriebsfall entstehen nur geringe Leitverluste und der maschinenseitige Wechselrichter erreicht einen hohen Wirkungsgrad (ca. 99%).

Durch die tiefere Spannung und die langsameren Spannungsflanken wird auch die Wicklungsisolation der Maschine weniger beansprucht.

c) Mit der Stromsteuerung der Permanent-Magnet-Maschine werden einfachere Regelstrategien möglich, ohne Messung der Rotorposition. Ein Überstrom der Maschine ist ausgeschlossen. Die Drehzahlregelung kann, wie bei einer Gleichstrommaschine als Kaskadenregelung aufgebaut werden, mit dem inneren Stromregelkreis und dem überlagerten Drehzahlregler. Diese Algorithmen können in kostengünstigen Prozessoren implementiert werden. Sehr einfach wird die Regelung mit einer brushless DC Maschine.

d) Der Aufwand an teuren Strommessgliedern wird verringert. Eine einzige Strommessung genügt. Die Spannungsmessungen erfolgen mit Differenzverstärkern. Auch dadurch wird ein kostengünstiger Aufbau ermöglicht.

Für höhere Leistungen ab 3kW würden 2 zusätzliche Schalter benötigt, um die Norm der Netzstromharmonischen zu erfüllen.

3.2.2 Auslegung und Bau

An der Hochschule Wallis wurde eine erste gedruckte Schaltung realisiert um die Eingangsstufe mit dem Abwärtssteller zu testen.

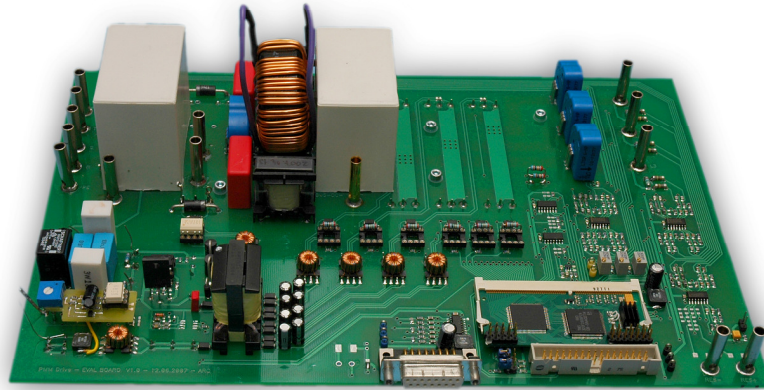


Abb 4: Aufbau des Prototyps der Antriebselektronik

Mit den viel versprechenden Resultaten dieser Messungen wurde eine zweite gedruckte Schaltung realisiert (Abb 4), die in der Folge mit **PMM-Drive** bezeichnet wird. Dieser Aufbau umfasst den dreiphasigen Diodengleichrichter für die Netzspannung, die Abwärtsstellerschaltung, den dreiphasigen Ausgangswechselrichter und den digitalen Signal Prozessor *DSP* zur Regelung des Systems. Das Foto 4 zeigt diese realisierte gedruckte Schaltung für die Weiterführung des Projekts. Es wurden im Vergleich zur gewünschten Endversion des Aufbaus mehrere zusätzliche Messglieder eingeführt (Ströme – Spannungen – Winkelgeber). Mit zusätzlichen Steckverbindungen wird ein einfacher Test der verschiedenen Regelstrategien möglich.

3.2.3 Regelstrategie

Die Regelung der gewählten Struktur (Abb 3) basiert auf kaskadierten Reglern für Geschwindigkeit und Strom (Drehmoment) und der Steuerung der Phasenumschaltung der brushless DC Maschine, die durch magnetische Hallsonden oder durch einen Winkelgeber synchronisiert werden. In der Abbildung 5 wird die gewählte Struktur der Regelung aufgezeigt, die in einem *DSP* implementiert wurde und die Antriebselektronik steuert (Abb 4).

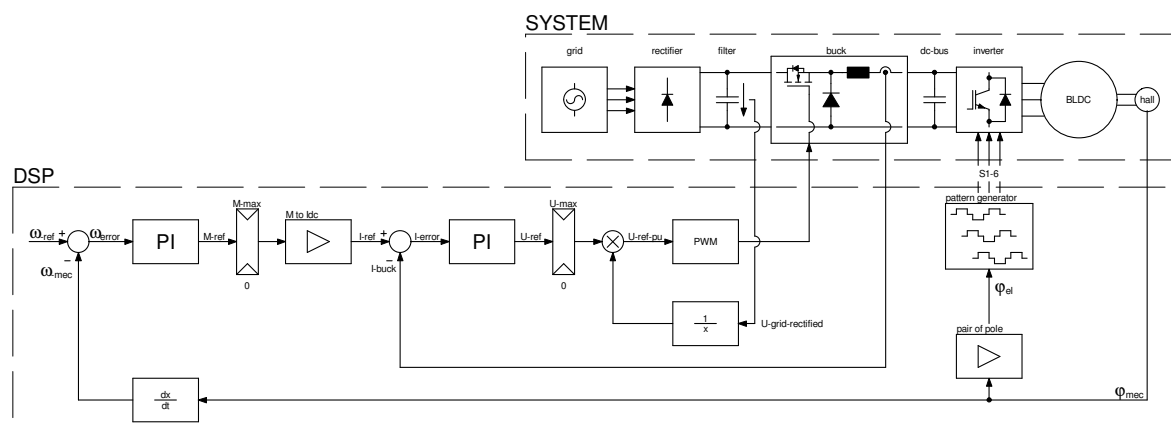


Abb 5: Blockscheema der Regelstruktur

Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt mit Hilfe einer PI-Struktur. Sie liefert den Sollwert des Drehmoments der brushless DC Maschine für die gewünschte Geschwindigkeit.

Der Stromregler (Drehmoment) steuert die Abwärtsstellerschaltung. Die Gleichspannung am Ausgang des Abwärtsstellers, die Block-weise auf die Phasen der brushless DC Maschine geführt wird, ergibt sich durch die Belastung und die gewünschte Geschwindigkeit.

Die Umschaltung der Maschinenphasen erfolgt mit der Detektion der Rotorposition mit Hilfe von Hallsonden oder einem Winkelgeber. Die Begrenzung der minimalen Drehzahl (1/10 der Nenndrehzahl) würde auch eine einfache Steuerung ohne Geber (sensorless) erlauben.

Die gewählte Regelstruktur verringert die Anzahl der notwendigen Strommessungen: Die Messung des Abwärtsstellerstroms reicht zur Regelung des Systems. Mit einer konstanten Zwischenkreisspannung und der Pulsweiten-Modulation der Maschinenspannung würden mindestens 2 Strommessungen benötigt, wie die Messung des Eingangstroms (PFC) und die Messung des Maschinenstroms.

3.2.4 Simulation des Systems

Die Modellierung und die Simulation des Systems mit Hilfe der *Software Matlab™/Plecs™* erlaubt die Überprüfung der gewählten Struktur und die Optimierung der Energiespeicher (Kondensatoren und Drosseln). Die Abbildung 6 zeigt das idealisierte System im linearen Betrieb.

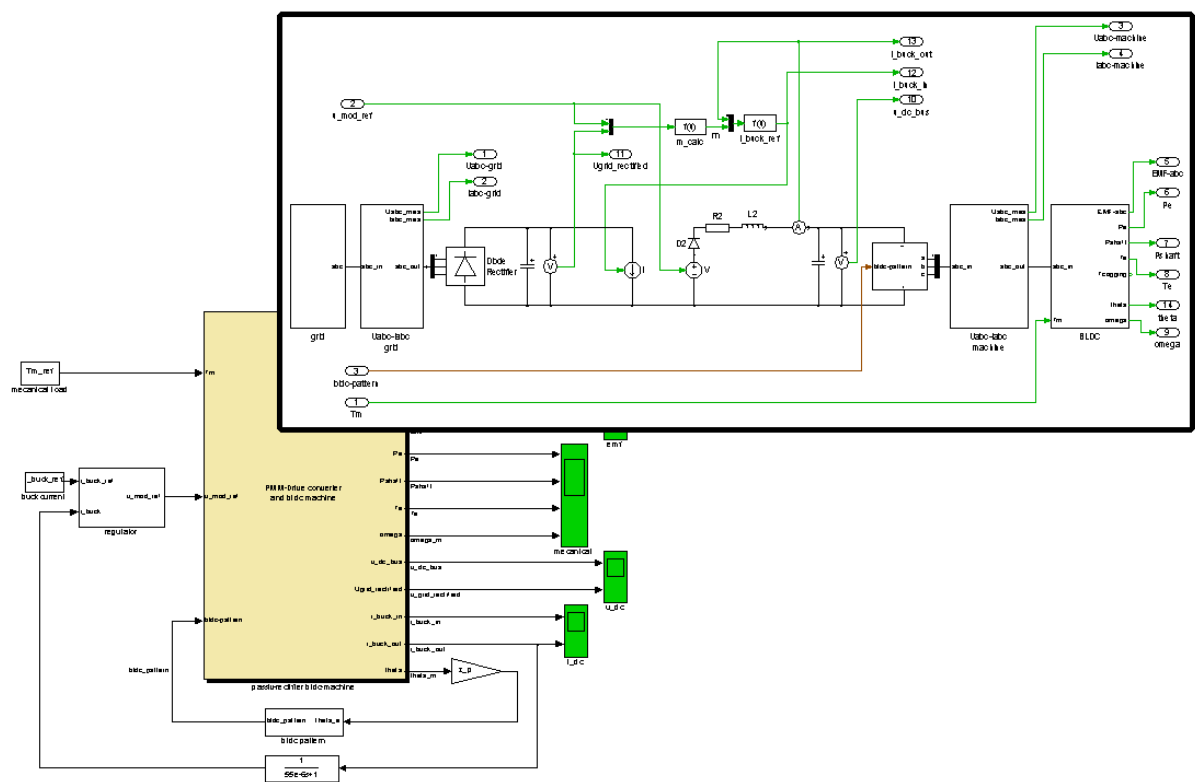


Abb 6: Simulation des linearisierten Systems im *Matlab™/Plecs™*

In den folgenden Diagrammen 7 und 8 sind die Resultate der Simulation dargestellt. Im Diagramm 7 sind die Ströme und Spannungen auf der Netzseite erkennbar, im Diagramm 8 jene auf der Maschinenseite. Die Simulationen wurden mit 3kW Wellenleistung bei 3600 Umdrehungen pro Minute durchgeführt.

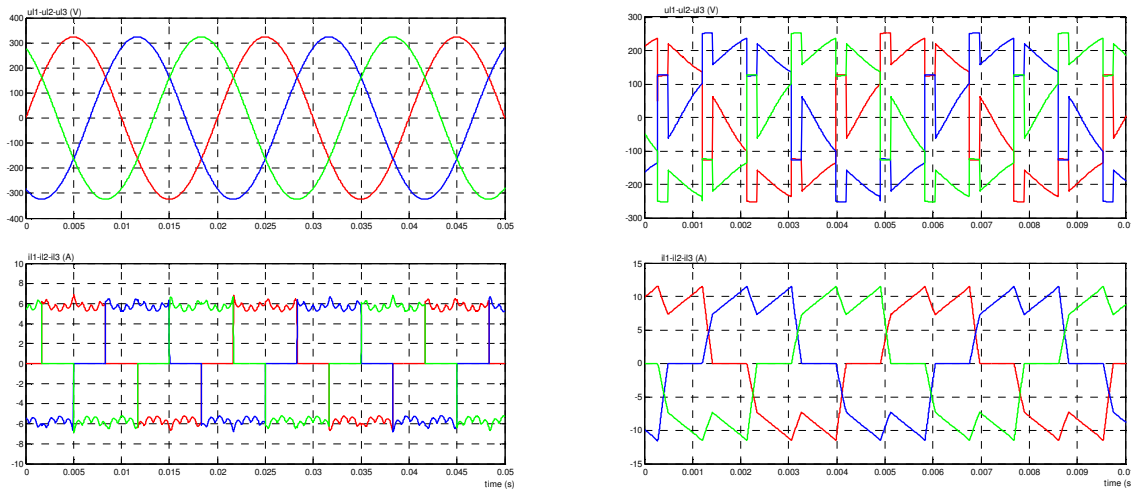


Diagramme 7/8: Simulation der Spannungen und Ströme auf der Netzseite und der Maschinenseite

Mit den Resultaten der Simulation wurden die Komponenten des PMM-Drives angepasst. Die Diagramme 9 und 10 zeigen die gemessenen Spannungen und Ströme auf der Netz- und Maschinenseite. Die brushless DC Maschine wurde dabei mit 3kW bei 3600U/min an der Welle belastet.

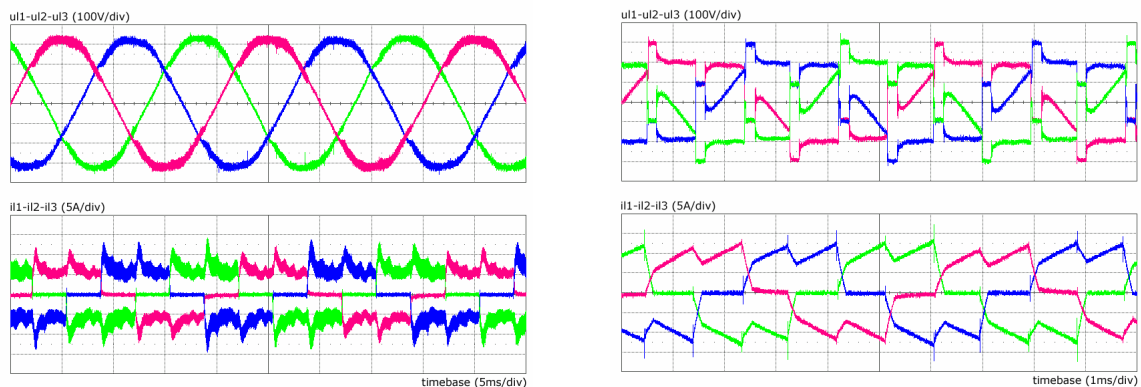


Diagramme 9/10: Darstellung der gemessenen Ströme auf der Netz- und Maschinenseite

Die hochfrequente Stromwelligkeit netzseitig wird nicht genügend gedämpft, da die Messung ohne Eingangsfilter erfolgte.

Auch zeigt der Netzstromverlauf keinen konstanten Verlauf, vielmehr erkennt man beim Einschalten der Blöcke eine Stromspitze (Diagramm 9). Diese rührt daher, dass der Stromregler noch nicht optimiert wurde, um die Norm IEC 61000-3-2 zu erfüllen. In einem späteren Kapitel werden die Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Stromform erläutert.

3.3 CIRCLE MOTOR AG

Circle Motor AG führte die Projektleitung und fertigte den Permanent-Magnet-Motor.

In die engere Wahl für den Bau fielen zwei effiziente Permanent-Magnet-Motoren der Baugrösse IEC 100 mit sinus- oder trapezförmiger Phasenspannung.

Permanent-Magnet-Motoren mit sinusförmigen Phasenspannungen (Synchronmotor) haben den Vorteil von kleineren Eisenverlusten und geringeren Geräuschen. Nachteilig sind die grösseren Verluste in der Antriebselektronik durch hohe Taktfrequenzen $> 16 \text{ kHz}$, was zu hoher Rechnerleistung und zu teureren Prozessoren führt. Zudem sind Strom- und Spannungssensoren in der Elektronik nötig, die aber vom Aufwand etwa gleich zu bewerten sind, wie die Hallsensoren und deren Montage bei Motor mit trapezförmigen Spannungen.

Permanent-Magnet-Motoren mit trapezförmigen Phasenspannungen (brushless DC Motor) haben den Vorteil von geringeren Schaltverlusten in der Antriebselektronik. Bei Vollblockbetrieb und Nennlast beträgt die Taktfrequenz bei unserem Permanent-Magnet-Motor nur 150 Hz . Hier liegt die grösste Effizienz aller mir bekannten Antriebssteuerungen vor. Zudem ist das Steuerungsverfahren recht einfach, was den Einsatz von günstigeren Prozessoren erlaubt. Nachteilig sind die höheren Eisenverluste, Mehraufwand an Magnetmaterial und etwas höheren Geräuschen als beim Synchronmotor.

Da bei etwa gleicher Effizienz der brushless DC Motor einfacher zu steuern ist und damit auch geringere Kosten in der Serie entstehen, wurde der effiziente IEC Permanent-Magnet-Motor als brushless DC Motor gebaut.

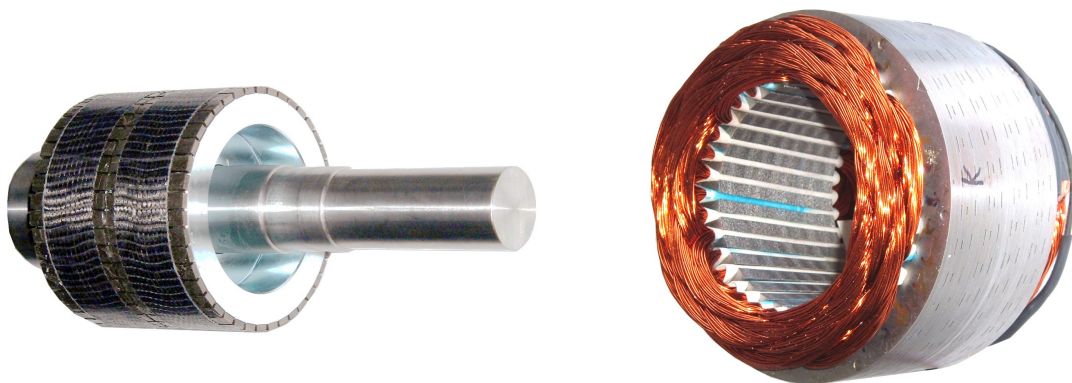


Abb 11 : Rotor mit den Permanent-Magneten, die mit Kohlefasern bandagiert sind und der Stator mit der Wicklung

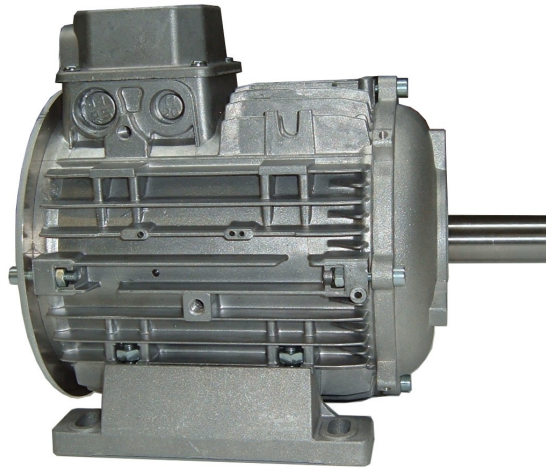


Abb 12: gefertigter 3 kW Permanent-Magnet-Motor in der Baugrösse IEC 100

Der gewickelte Stator benötigt im Statorleergehäuse nicht den vollständigen Platz. Eine durchgehende Welle von A zu B Lagerflansch, wie bei einer konventionellen Motorenbauweise üblich, würde zu einer recht schweren Welle führen. Ebenfalls haben solche langen Wellen die Neigung zum Schwingen. Aus diesem Grund entstand das Konzept direkt im Statorleergehäuse das B Lager aufzunehmen und die Welle kürzer zu gestalten. Das B Ende des Statorleergehäuses ist mit einem einfachen Deckel verschlossen. Zwischen dem Deckel und der Aufnahme des B Lagers im Statorleergehäuse (Abb13) könnte in einem zukünftigen Entwicklungsauftrag die Antriebselektronik aufgenommen werden. Damit würde ein effizienter 3 kW IEC100 Permanent-Magnet-Motor in der Ausführung als Integral-Sparmotor möglich werden (Abb14). Der Deckel beim B Ende des Statorleergehäuse müsste in einer zukünftigen Serie als Gussteil mit entsprechenden Kühlrippen, so ausgeführt sein, dass der Integral-Sparmotor genügend gekühlt wird.

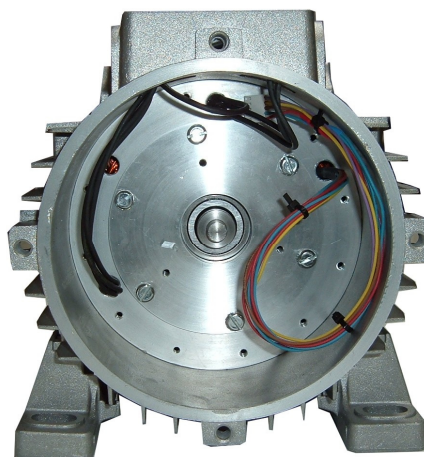


Abb 13 zeigt den noch freien Platz im Statorleergehäuse

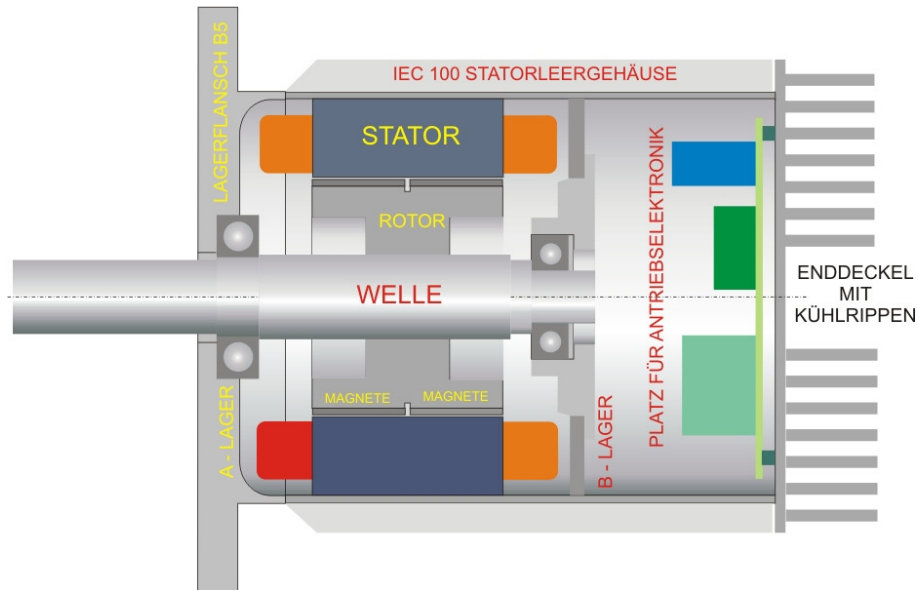


Abb 14 zeigt, wie ein 3 kW Integral-Sparmotor zu bauen wäre.

4. Ergebnisse

Die Hochschule Wallis und Circle Motor AG führten mit dem gebauten Permanent-Magnet-Motor im Sommer 2007 erste Messungen auf dem Prüfstand durch.

Der Kupferwiderstand Phase zu Phase beträgt 0.85 Ohm und die Induktivität Phase zu Phase 7.86mH.

Die Welle des Motors weist einen leichten Gang, ohne magnetisches Rastmoment auf.

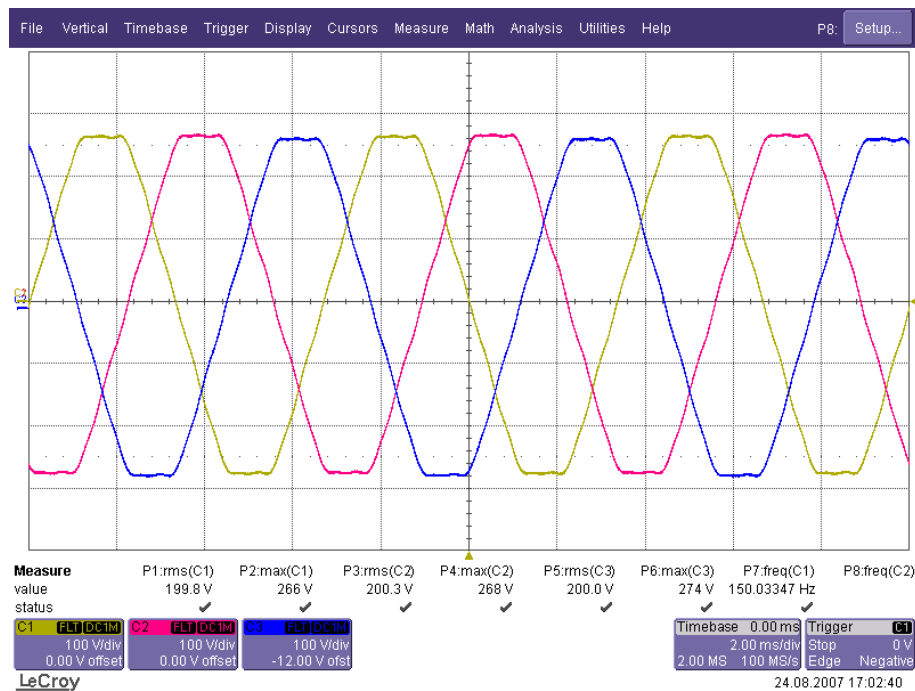


Abb 15 zeigt den Spannungsverlauf der verketteten Wicklungsspannung des Motors.

Die Trapezform ist sehr schön erkennbar. Das Steuerungsverfahren von brushless DC Motoren zeichnet sich dadurch aus, dass die Motorenwicklung, welche momentan den grössten Spannungswert aufweist, über die 6 Leistungstransistoren mit der Zwischenkreisspannung der Antriebselektronik verbunden wird. Bei einer trapezförmigen Wicklungsspannung liegt also immer der obere gerade Teil der Wicklungsspannung am Zwischenkreis. Die Motorenwicklung verhält sich aus Sicht des Zwischenkreises, wie eine reine Gleichspannung. Deshalb heisst dieses Steuerungsverfahren „brushless DC“. Die Motorencharakteristik entspricht demjenigen der bürstenbehafteten Gleichstrommaschine, jedoch ohne Bürsten, die mit Elektronik ersetzt sind. Das brushless DC Verfahren ist deshalb effizient, weil eine Gleichspannung geschaltet werden muss. Bei Vollblockbetrieb erfolgt nur ein Schaltzyklus alle 60° . Bei unserem Permanent-Magnet-Motor beträgt die Schaltfrequenz nur 150Hz bei 3000 U/min.

Der effiziente Permanent-Magnet-Motor ist nach den *Maxwell* Berechnungen gebaut worden. Einige Effizienz bezogene Vorteile flossen bei Bau des Motor ein. Die *Maxwell* Berechnungen basieren auf einer Blechqualität von M400-50A. Da beim Hersteller M330-50A Statorblech lagerhaltig war, wurde dieses verlustarme Blech eingekauft. *Maxwell* schreibt 20 Windungen pro Nut vor, gewickelt mit 3 parallelen Leitern mit einem Durchmesser von je 0.64mm. Die Nuten konnten mit 20 Windungen gefüllt werden, mit 4 parallelen Leitern mit einem Kupfer Durchmesser von je 0.71mm.

Überrascht hat das Ergebnis des Spannungswerts der Wicklung. *Maxwell* rechnete mit einer verketteten Anschlussspannung von 400V, gemessen wurde ein Amplitudenwert der induzierten Spannung von 270V. Die zu tiefe Wicklungsspannung öffnet uns aber die Möglichkeit den Wirkungsgrad des Motors auch bei 3600 U/min zu bestimmen. Es ist eine weltweite Normung der Effizienzklassen für Elektromotoren in Vorbereitung, sodass die höhere Drehzahl von 3600U/min vorteilhaft sein kann, wenn sich eine höhere Effizienz bei den Messungen zeigt. Die Antriebssteuerung ist bezüglich der Motorenspannung flexibel, solange die 400V Grenze nicht überschritten wird.

4.1 Evaluierung und Vergleich der quantitativen Resultate, ausgeführt von der Hochschule Wallis

Um die Leistungsdaten der Maschine und des Konverters zu bestimmen wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Das gesamte System wurde ebenfalls ausgemessen, im Hinblick auf eine Anwendung als Integralmotor. Das Kapitel „Messungen: Prinzip und Genauigkeit“ im Anhang enthält detaillierte Informationen zum Messaufbau und der zu testenden Maschine, sowie die Kenndaten der verwendeten Messgeräte.

Die von der Firma Circle Motor AG gebaute Maschine, in der Folge als **BLDC CM-IEC-3kW** bezeichnet, wurde ausgemessen und mit 2 Maschinen verglichen, deren Daten aus einer früheren Studie bekannt sind [1]. Bei der einen Maschine, **BLDC DM-SNP**, handelt es sich ebenfalls um eine Permanent-Magnet-Maschine mit trapezförmigen induzierten Spannungen und 3 Polpaaren. Die andere Maschine, **ASM ABB M3AA**, ist eine 3kW Asynchronmaschine mit einem Polpaar und der Klasse EFF1.

Für die Messungen mit Belastung wurde die Maschine **BLDC DM-SNP** als Generator verwendet, angetrieben durch die Maschine **BLDC CM-IEC-3kW**.

Wie erwähnt, erreichte die induzierte Spannung der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** nicht die berechneten Werte. Um die Leistung von 3kW bei 3000U/min zu realisieren, müsste also ein höherer Strom als vorgesehen verwendet werden. Deshalb wurde die Maschine im spezifizierten Drehzahlbereich bis zu einer Leistung von 2.5kW getestet. **Die Drehzahl konnte jedoch auf 3600U/min erhöht und dadurch auch die Leistung von 3kW erreicht werden.** Die Tabelle 16 zeigt die Kenndaten der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** mit den Resultaten der Messungen in den Betriebspunkten 2.5kW/3000U/min und 3kW/3600U/min. Die Messresultate werden mit den Typenschild-Daten der Referenzmaschinen verglichen.

Symbol	Einheit	Beschreibung	BLDC CM-IEC-3kW	BLDC DM-SNP	ASM ABB M3AA
Lieferant	-	Hersteller oder Lieferant	Circle Motor AG	Elektromaschinenbau GmbH	ABB Suisse SA
Typ	-	Gemäss Lieferant	Permanent Magnet Motor	DM-SNP 63-6-1-77	M3AA 100 LB 2 3GAA101312-BSE
P _n	W	Leistung an der Welle	2500 / 3000	3008	3000
U _n	V	Verkettete Spannung	230 Y / 275 Y	250 Y	220-240 D / 380-420 Y
I _n	A	Leistungsstrom	8 Y / 8.2 Y	6.2 Y	10.6 D / 6.1 Y
f _e	Hz	Elektrische Frequenz	150 / 180	150	50
n _n	min ⁻¹	Mechanische Drehzahl	3000 / 3600	3000	2920
cos φ	-	Leistungsfaktor	-	-	0.86 D / 0.86 Y
m	kg	Gewicht der Maschine	13.6		24
Prot. IP	-	Schutzklasse	IP55, wenn mit IEC Lagerflansch B geschlossen	-	55
Is. Cl.	-	Isolationsklasse	F	-	F
Serv.	-	Betriebsart	-	-	
eff	-	Effizienzklasse	Wesentlich oberhalb der EFF1 Kennlinie	Wesentlich oberhalb der EFF1 Kennlinie	eff1
Norm	-	Normen	IEC60034-1	-	IEC60034-1
Ser. No.	-	Serienummer	1	-	60510P0 971 /5
Date		Fabrikationsdatum	Sept 2007	-	-

Tabelle 16: Kenndaten der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** und Daten der Referenzmaschinen

4.2 Synchronmaschine: Parameter und Ersatzschaltung

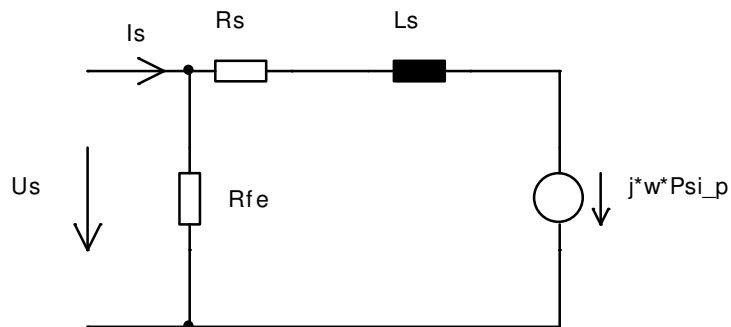


Abb 17: Ersatzschaltung der Permanentmagnet-Synchronmaschine

Die Tabelle 18 beinhaltet die verketteten elektrischen Kennwerte der vorhandenen Maschinen, die mit Hilfe verschiedener Methoden gemessen wurden (DC, Leerlauf, blockierter Rotor).

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC CM-IEC-3Kw	BLDC DM-SNP
R_s	Ω	$I = I_n$	Statorwiderstand	0.846	1.05
L_s	H	$I = I_n/5 / f_e = 200\text{Hz}$	Ständerinduktivität	7.86E-3	-
Ψ_p	Vs	$I = 0 / f_e = 0 \rightarrow f_n$	Permanentmagnetfluss	0.211	0.274

Tabelle 18: Parameter der brushless DC Maschine

4.3 Leerlaufdaten der Maschine BLDC CM-IEC-3kW

Mit einem Leistungsmessgerät wurden bei verschiedenen Drehzahlen die Leistungsaufnahme und die Maschinenströme bestimmt, um die verschiedenen Komponenten der Leerlaufverluste der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** zu bestimmen.

Mit der Kenntnis des Statorwiderstands können die Kupferverluste bestimmt werden. Diese Verluste sind gering und betragen weniger als 1% der gesamten Verluste. Diese Verluste werden von den gesamten Verlusten abgezogen. Dieses Resultat entspricht praktisch der Kurve der Verluste gebildet aus der Summe der mechanischen Verluste und den Reibungsverlusten (Diagramm 19). Eine Interpolation mit einer Polynomfunktion 2. Ordnung erlaubt die Auftrennung der Verluste in Magnetisierungs- und Reibungsverluste ($P_{mec} \sim \Omega$, $P_{fer} \sim \Omega^2$).

Das Diagramm 19 erläutert die zur Bestimmung der verschiedenen Maschinenverluste verwendete Methode. Die gelbe Kurve wurde mit den Koeffizienten der Interpolation berechnet. Sie überlagert gut die blauen Punkte, die durch die Messung bestimmt wurden.

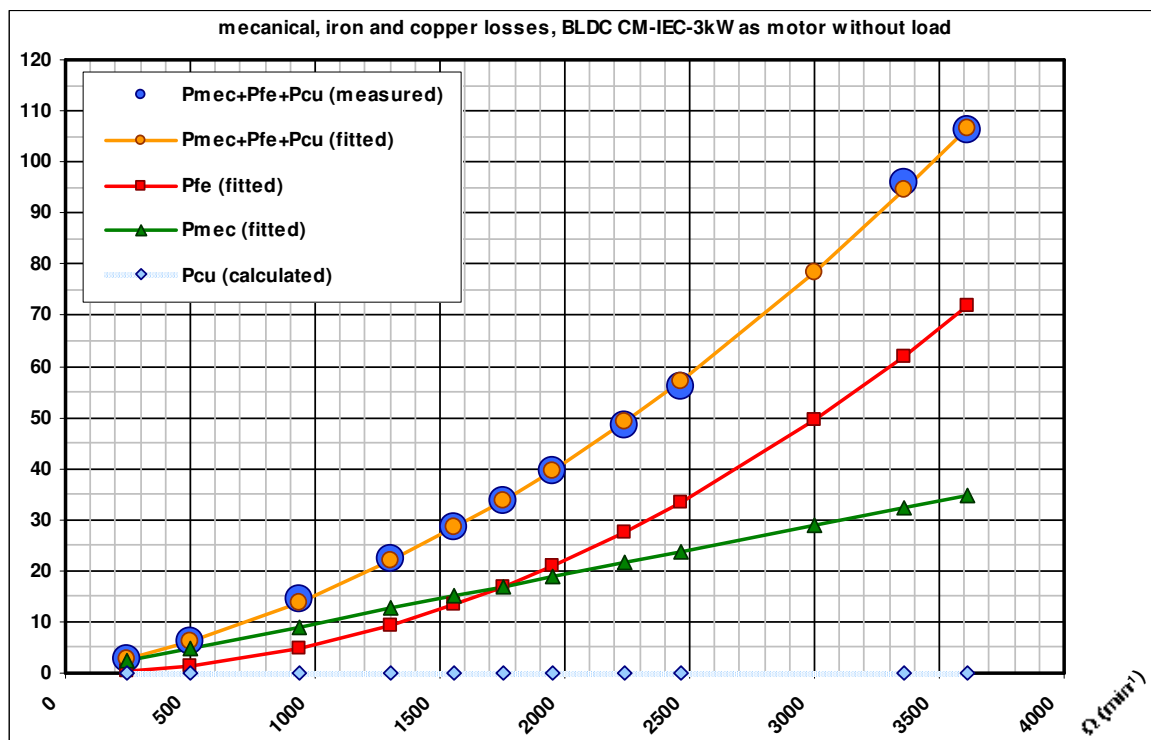


Diagramm 19: Aufteilung der mechanischen, Eisen- und Kupferverluste durch Messungen bei variabler Drehzahl im Leerlauf.

Um das Trägheitsmoment der Maschine zu bestimmen, wurde ein weiterer Versuch bei Leerlauf durchgeführt. Dazu wurde die Maschine mit einem konstanten Drehmoment beaufschlagt und die Beschleunigung gemessen. Das Verhältnis von Drehmoment zu Beschleunigung erlaubt die Bestimmung des Trägheitsmomentes, unter der Annahme, dass die Reibungsverluste gering bleiben. Diese Messung liefert einen Richtwert, weil das tatsächliche elektromagnetische Moment nicht gemessen werden kann und durch den der Maschine zugeführten Strom berechnet wird.

Die bei verschiedenen Spannungen gemessenen Leerlaufverluste und das Trägheitsmoment werden in Tabelle 20 dargestellt.

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC CM-IEC-3kW (3000 / 3600 min ⁻¹)	BLDC DM-SNP	ASM ABB M3AA
P_{cu}	W	$n = n_n / U = U_n$	Kupferverluste Im Leerlauf	<0.1 / 0.1	3	12
P_{mec}	W	$n = n_n$	Mechanische Verluste Im Leerlauf	29 / 35	40	114
P_{fe}	W	$n = n_n / U = U_n$	Eisenverluste Im Leerlauf	50 / 72	69	140
P_{tot}	W	$n = n_n / U = U_n$	Gesamte Leerlaufverluste	79 / 107	112	266
J	kgm ²	-	Trägheitsmoment	3.31e-3	3e-3	5e-3

Tabelle 20: Leerlaufverluste und Trägheitsmoment

Die Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** weist die **geringsten Leerlaufverluste** auf, gefolgt von der Maschine **BLDC DM-SNP**.

Es ist nicht überraschend dass die Asynchronmaschine **ASM ABB M3AA** die höchsten Leerlaufverluste aufweist. Es muss beachtet werden, dass nicht nur die Eisenverluste (ca. 2x höher) die Leerlaufverluste erhöhen, sondern auch die mechanischen Verluste ca. 3-4 mal höher gewichtet. Obwohl auch die Kupferverluste sehr viel grösser sind (ca. 100x) haben sie doch nur wenig Einfluss auf die gesamten Leerlaufverluste.

4.4 Kenndaten der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** unter Belastung

Das Diagramm 21 zeigt den gemessenen Wirkungsgrad der Maschine **BLDC CM-IEC-3kW**. Um eine Bewertung vornehmen zu können, wurden diese Messungen mit den Resultaten der Referenzmaschinen verglichen [1], die durch Konverter oder Umrichter angesteuert wurden. Die Testbedingungen der Maschinen waren die folgenden.

Die Maschine **BLDC CM-IEC-3kW** wird durch den **PMM-Drive** mit Block-Kommutierung und variabler Zwischenkreisspannung gesteuert. Die Maschine wird dadurch nicht durch hochfrequente Anteile des Stromes belastet: Die Schaltfrequenz beträgt in diesem Fall 150Hz bei 3000U/min.

Die **BLDC DM-SNP** Maschine wird durch einen pusbreitenmodulierten PWM Konverter gesteuert, der die trapezförmige Maschinenspannung erzeugt. Der Strom weist eine Welligkeit bei 10kHz auf. Dieses Antriebssystem entspricht der Realisierung mit aktuell erhältlichen Umrichtern. Bei dieser Modulationsart bewirkt die HF-Komponente im Maschinenstrom eine Verringerung des Wirkungsgrades, vor allem im Teillastbereich [1], wo das Tastverhältnis 50% beträgt und die Stromwelligkeit maximal wird. Die Schaltfrequenz wurde im besten Betriebspunkt bezüglich dem Wirkungsgrad der Maschine und des PMM-Drives gewählt [1].

Die **ASM ABB M3AA** Maschine wird durch einen handelsüblichen PWM Umrichter gesteuert, der den sinusförmigen 50Hz Maschinenstrom erzeugt. Dieser Strom wird von einer 12kHz Komponente überlagert. Für die Verkleinerung des Wirkungsgrads im Teillastbereich und die Schaltfrequenzen gelten dieselben Bemerkungen, wie bei der **BLDC DM-SNP** Maschine.

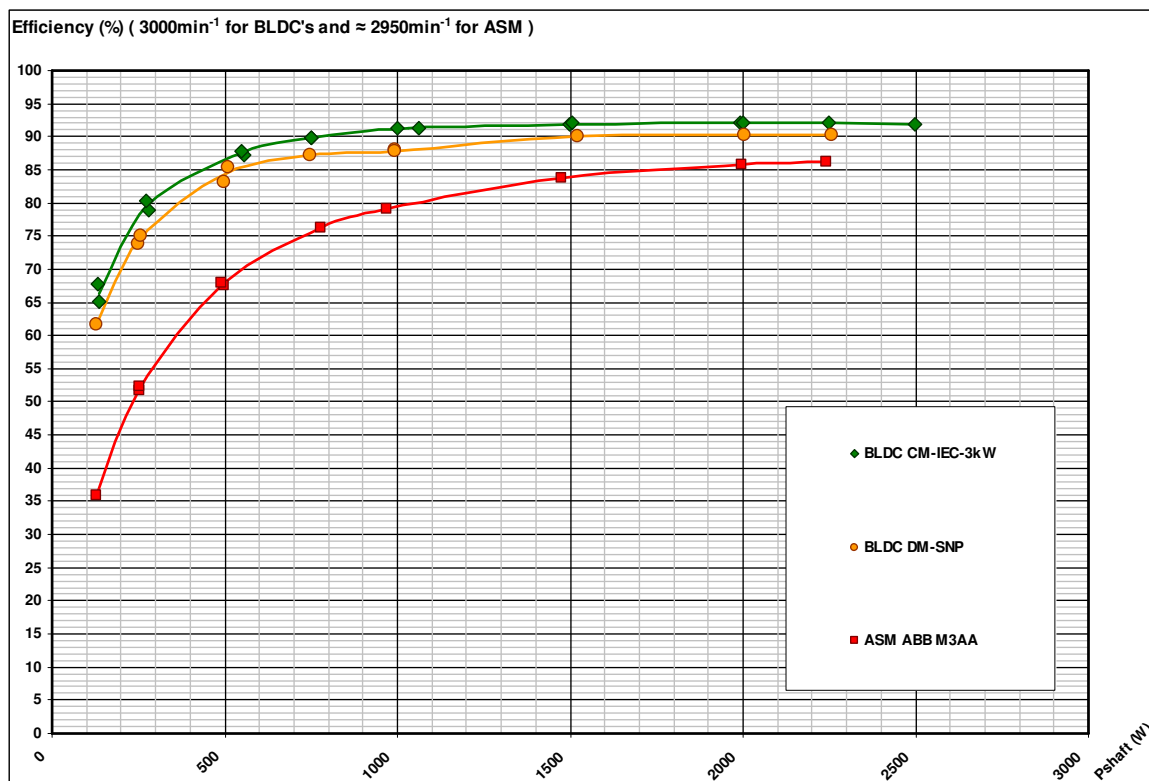


Diagramm 21: Wirkungsgrad der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine, ohne Umformer, verglichen mit zwei Referenzmaschinen

Die zu tiefe induzierte Spannung der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine hätte einen zu hohen Strom erfordert um die 3kW Wellenleistung zu erreichen. Dadurch wurde sie nur bis 2.5kW spezifiziert und gemessen. **Für Leistungen grösser 1.25kW beträgt der Wirkungsgrad praktisch 92%.** Oberhalb der Nennleistung von 2.5kW kann eine Verringerung des Wirkungsgrades infolge der Kupferverluste angenommen werden. **Im Teillastbereich bleibt der Wirkungsgrad höher als 90%,** bis zu einem Drittel der Leistung (830W).

Bei Nennleistung ist der Wirkungsgrad der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine ungefähr 2% höher im Vergleich zur **BLDC DM-SNP** Maschine. Dies folgt einerseits von den tieferen Leerlaufverlusten und vom geringeren Statorwiderstand, andererseits ist die verwendete Modulation ohne Hochfrequenz Komponenten ebenfalls vorteilhaft: Es wurde gezeigt, dass sich bei Nennleistung ohne Hochfrequenz Komponenten des Stromes der Wirkungsgrad um 1% erhöht [1]. Man kann annehmen, dass die Wirkungsgraddifferenz der **BLDC DM-SNP** Maschine um 1% verringert werden könnte, wenn sie durch einen Konverter mit gleichem Modulationsverfahren angesteuert würde.

Im Vergleich zu einer Asynchronmaschine der Klasse EFF1 (**ASM ABB M3AA**) weist die **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine einen um über 4% höheren Wirkungsgrad auf (Wirkungsgrad der Asynchronmaschine bei Nennleistung 87.6%). Die Differenz wird im Teillastbereich noch grösser.

Die **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine kann nur 2.5kW bei 3000U/min liefern. Es ist jedoch interessant, diese Maschine bei 3kW / 3600U/min zu testen. Diese Drehzahl wird in der zukünftigen internationalen Norm enthalten sein. Das Diagramm 22 vergleicht das Verhalten der Maschine bei diesen beiden Drehzahlen.

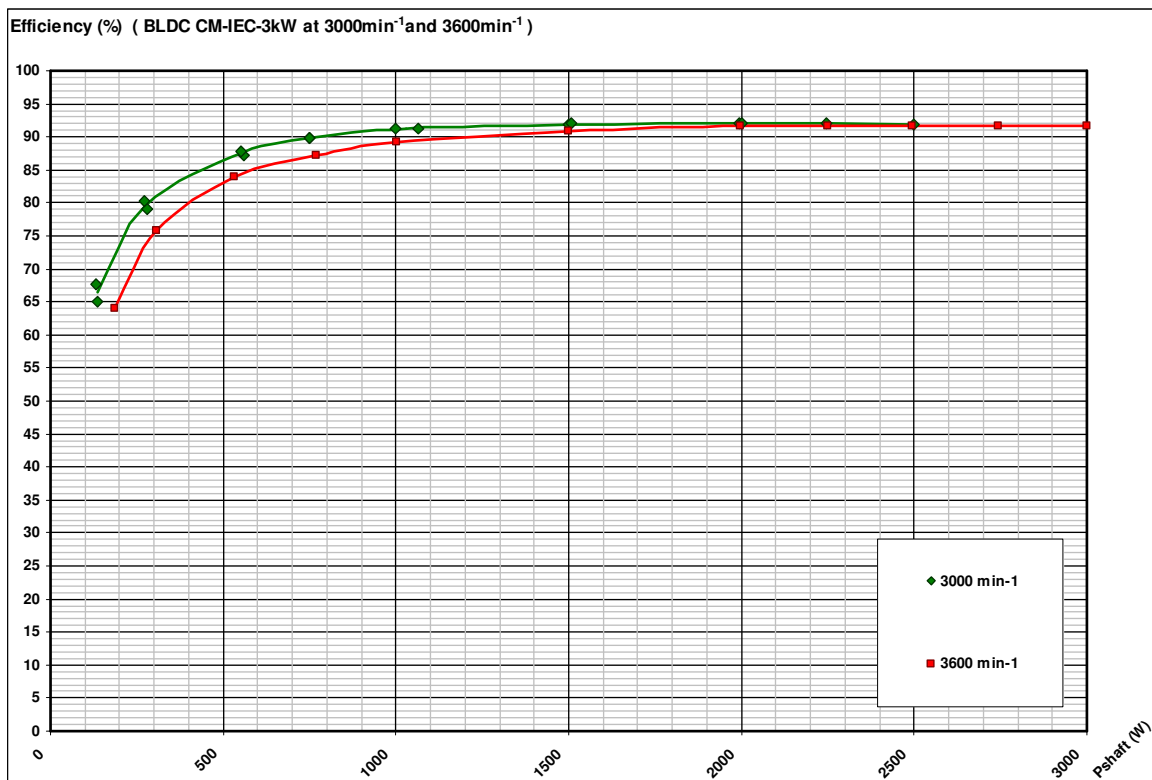


Diagramm 22: Wirkungsgrad der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine bei 3000U/min und bei 3600U/min, ohne Umformer

Bei 3600U/min sind die Verluste im Teillastbereich bemerkenswert, welche durch zunehmende Eisenverluste und Luftreibung in Spalt zwischen Rotor und Stator entstehen.

Oberhalb von 2/3 der Nennleistung (2kW) bestehen keine erkennbaren Unterschiede. Der Wirkungsgrad bei 3kW / 3600U/min beträgt 91.6% verglichen mit 92% bei 2.5kW / 3000U/min.

4.5 Optimierung des Abwärtsstellers beim PMM-Drive Konverter

Die verschiedenen Stufen des **PMM-Drive** wurden sukzessive optimiert, vor allem auch in Hinblick auf die Leistungshalbleiter. Zu Beginn des Projektes wurden die an der Hochschule verfügbaren Halbleiter verwendet. Sie wurden durch besser angepasste Leistungshalbleiter ersetzt, deren Kenndaten in den Tests unter dem Gesichtspunkt von Leistung und Kosten optimiert wurden.

Für den *IGBT* in der Abwärtsstellerschaltung wurde eine Schaltung mit rekuperierendem Entlastungsnetzwerk eingesetzt. Durch die Erhöhung der Schaltfrequenz ohne merkliche Erhöhung der Schaltverluste kann die Baugrösse der Abwärtsstellerdrossel verkleinert werden. Dadurch können die Abmessungen des Eingangsfilters ebenfalls verkleinert werden.

Ein weiterer Vorteil des Entlastungsnetzwerks liegt in der Verhinderung von dynamischen Überspannungen an den Klemmen des *IGBT*. Das Diagramm 23 erlaubt den Vergleich der Überspannung am *IGBT* beim Öffnen des Schalters. Die beiden Aufnahmen wurden mit einem mittleren Strom von 8.75A und einer mittleren Spannung von 200V und damit bei einer Ausgangsleistung von 1750W durchgeführt. Diese Verringerung der Überspannungen erlaubt den Wechsel von einer 1200V Technologie zu einer 900V Technologie. Die Leitverluste bei 900V Transistoren sind geringer und verkleinern damit die Verluste der Abwärtsstellerschaltung.

Das Diagramm 24 erlaubt ebenfalls den Einfluss des Entlastungsnetzwerks zu bestimmen. Die blaue Kurve zeigt die Momentanleistung mit der zugehörigen berechneten Energie (505µJ ohne Entlastungsnetzwerk gegenüber 84µJ mit Entlastung). Dadurch werden die Schaltverluste um einen Faktor 6 verringert.

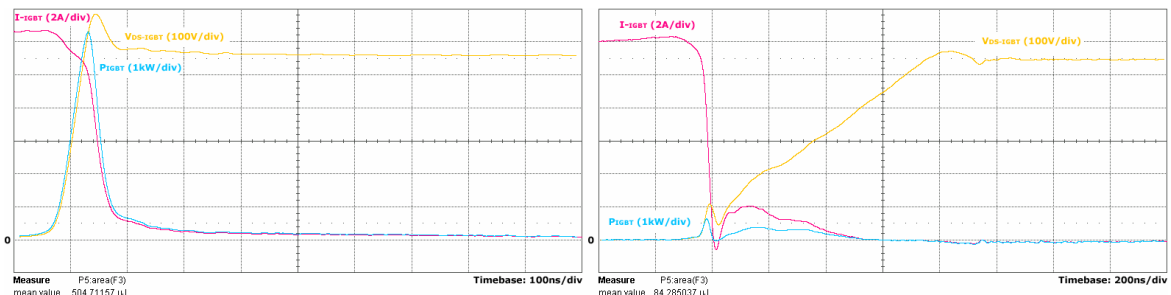


Diagramme 23 / 24: ohne Entlastung ⇔ mit Entlastung

Die Schaltfrequenz wurde schliesslich auf 36kHz festgelegt. Die Wirkungsgradkurven des Abwärtsstellers, des gesamten PMM-Drives und des Integralmotoraufbaus wurden alle bei dieser Schaltfrequenz gemessen.

Das Diagramm 25 zeigt die Resultate der Messungen mit dem Abwärtssteller. Der gemessene Wirkungsgrad umfasst den dreiphasigen Diodengleichrichter, den Abwärtssteller, die Leistungsaufnahme des *DSP*, der Messschaltungen und restlichen Elektronik. Der Abwärtssteller wurde mit ohmscher Last bei konstantem Strom von 8.75A gemessen. Dieser Strom wurde gemäss den Wirkungsgradmessungen der Maschine und des Ausgangswechselrichters festgelegt. Die obere Einteilung der Abszisse zeigt die Ausgangsspannung des Abwärtsstellers (DC Zwischenkreis). **Der Wirkungsgrad des Abwärtsstellers erreicht 97.5%** bei einer Nennleistung von 3kW an der Welle ($\approx 3.3\text{kW}$ an den Ausgangswechselrichter gelieferte Leistung).

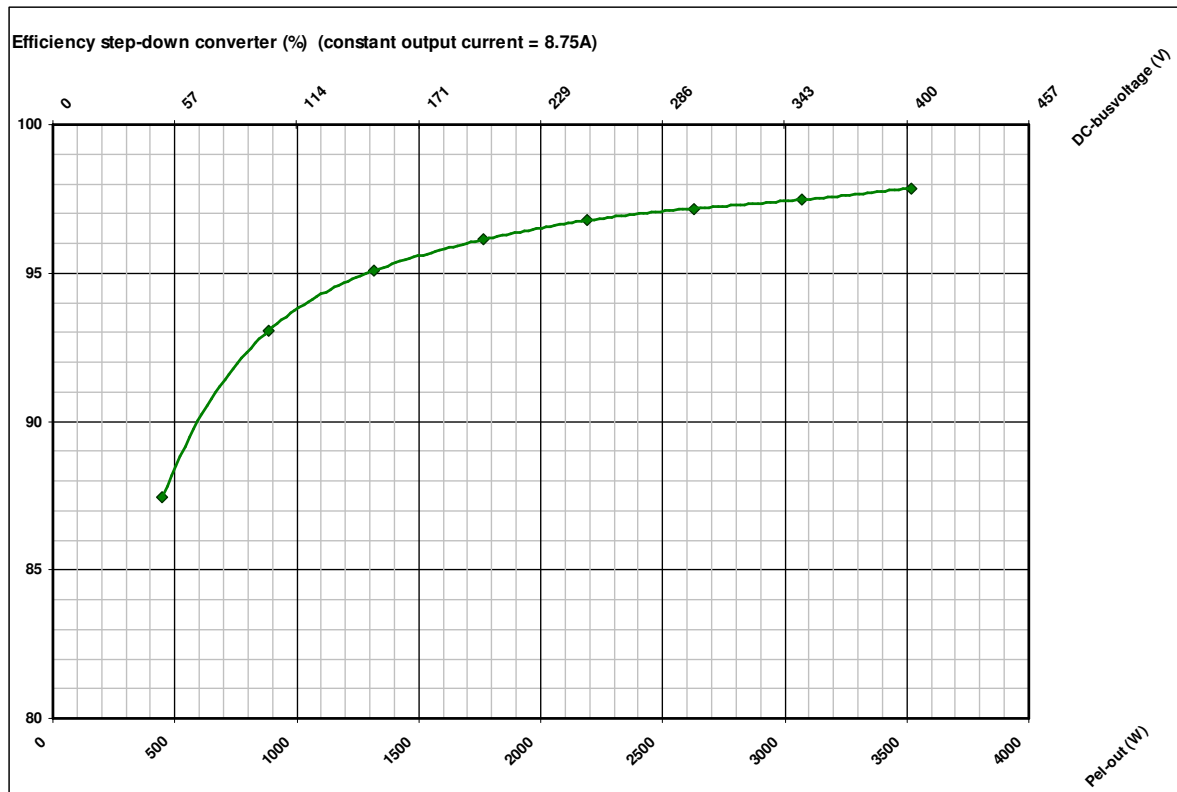


Diagramm 25: Wirkungsgrad des Abwärtsstellers nach der Optimierung

4.6 Wirkungsgrad des PMM-Drive Konverters

Vor der vollständigen Charakterisierung des Systems wurde der dreiphasige Ausgangswandler mit verschiedenen *IGBTs* getestet. Die Block-Kommutierung der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine erlaubt die Reduktion der Schaltverluste auf ein sehr kleines Niveau. Nur die Leitverluste sind von Bedeutung. Die Optimierung wurde also auf die Wahl und die Tests von *IGBTs* mit tiefer Flussspannung konzentriert. Das Potential der Wirkungsgraderhöhung bleibt jedoch bescheiden: Mit der Wahl eines *IGBTs* mit geringer Flussspannung V_{CE-sat} (1V@10A gegenüber 1.75V@10A) erhöht sich der Wirkungsgrad bei Nennleistung um ca. 0.5%.

Das Diagramm 26 zeigt den Wirkungsgrad des vollständigen **PMM-Drives** (dreiphasiger Diodengleichrichter, Abwärtssteller, Versorgung des *DSP*, der Messschaltungen und der restlichen Elektronik, Ausgangswandler). Der Wirkungsgrad wurde mit der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine bei 3600U/min durchgeführt, bei der Drehzahl mit der geforderten 3kW Wellenleistung.

Die Resultate wurden mit einem handelsüblichen Umrichter, dem **Commander SE23400220**, mit Belastung durch eine Asynchronmaschine bei 3000U/min verglichen [1]. Dieser Umrichter weist eine Konversionsstufe weniger auf.

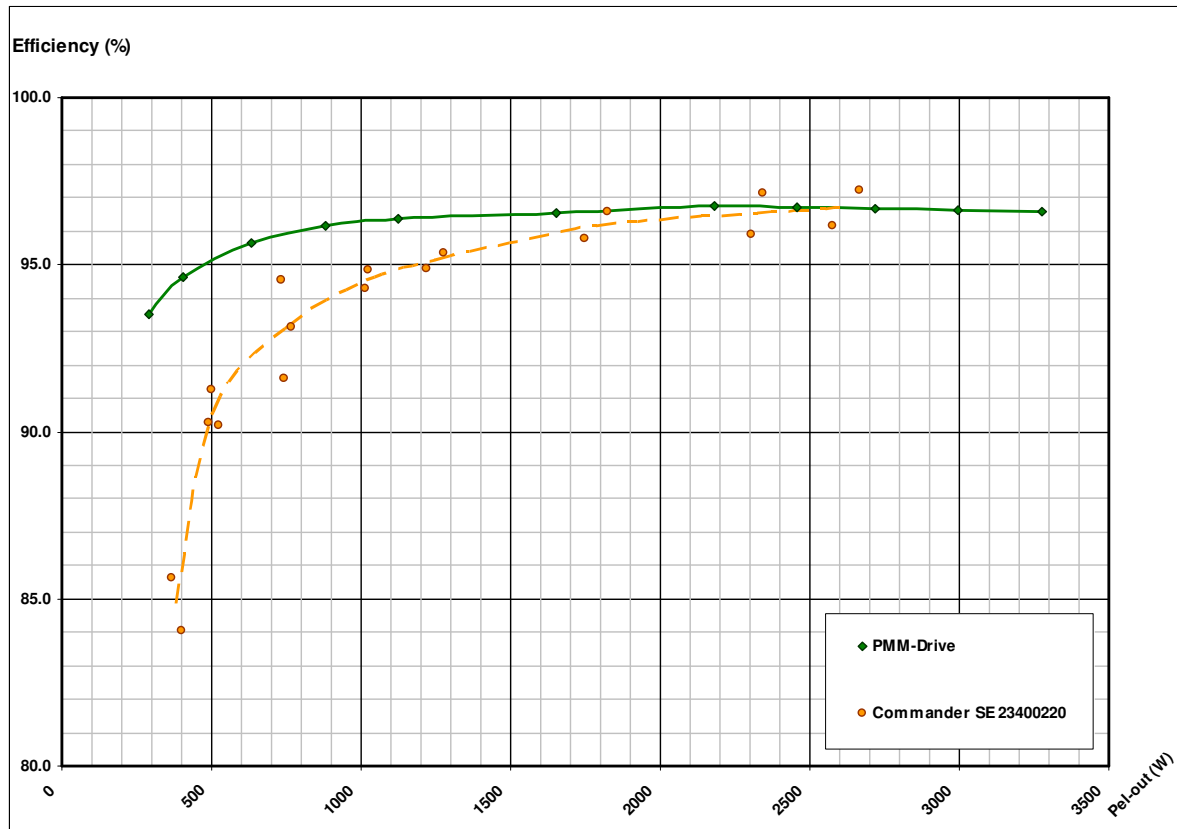


Diagramm 26: Wirkungsgrad des PMM-Drive-Konverters verglichen mit einem handelsüblichen Umrichter

Der Gesamtwirkungsgrad des PMM-Drive erreicht die Marke von 96.5% bei der Hälfte der Nennleistung an der Welle der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine ($\approx 1650\text{W}$ Speisung bei 1500W an der Welle) und bleibt bei diesem Wert bis zur geforderten Leistung ($\approx 3280\text{W}$ bei 3kW an der Welle) konstant.

Der Wirkungsgrad des Ausgangswechselrichters wurde nicht separat gemessen, er kann jedoch auf 99% geschätzt werden (die Verluste der Schalter des Ausgangswechselrichters beschränken sich auf die Leitverluste, die auf ca. 20W ($2 \times 1\text{V} \times 10\text{A}$) geschätzt werden. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Konverters bei 3kW um ca. 1% verringert).

Dieser Wirkungsgrad kann einfach in Beziehung gebracht werden zum Wirkungsgrad des Abwärtsstellers (Diagramm 23, $97.5\% \times 99\% = 96.5\%$).

Wenn der Wirkungsgrad des PMM-Drives auch nicht grösser wird als der Wirkungsgrad eines handelsüblichen Umrichters muss doch vermerkt werden, dass **die gewählte Topologie eine Konversionsstufe mehr enthält** (dreiphasiger Diodengleichrichter, Abwärtssteller, Ausgangswechselrichter im Vergleich zu dreiphasigem Diodengleichrichter und dreiphasigen PWM Wechselrichter).

Es ist jedoch von Interesse, dass bei Teillast der Wirkungsgrad des PMM-Drives höher ist. Mit der Struktur der Block-Kommutierung sind nur die Leitverluste von Bedeutung und die Schaltverluste sind praktisch vernachlässigbar, speziell auch durch das Entlastungsnetzwerk der Abwärtsstellerstufe. Dies gilt nicht beim handelsüblichen Umrichter: Im Teillastbereich werden die Schaltverluste bedeutend und verringern den Wirkungsgrad.

In der Tabelle 27 wird die Leistungsaufnahme des PMM-Drive im Stand-by bei aktivem Ausgangswechselrichter im Stillstand mit der Leistungsaufnahme eines handelsüblichen Umrichters verglichen.

Beschreibung	PMM-Drive (f_s Abwärtswandler = 36kHz)	Commander SE23400220 (f_s = 12kHz)
Leistungsaufnahme im « Stand-By » Betrieb	9.35W	15.3W
Leistungsaufnahme bei aktiver Ausgangsstufe und stillstehender Maschine, $\Omega = 0 \text{ U/min}^{-1}$	10.2W	123W

Tabelle 27: Stand-by Verluste des PMM-Drives verglichen mit einem handelsüblichen Umrichter

Im Stand-by Betrieb nimmt der PMM-Drive 9.35W auf. Diese Leistung könnte verringert werden mit Hilfe der folgenden Massnahmen:

- Entfernung der nicht benötigten Strommessungen und weiterer Komponenten des Testaufbaus, Ersatz des Winkelgebers durch Hallsonden.
- Verwendung des Betriebsmodus « sleep/halt » beim *DSP*. Gegenwärtig bleibt dieser in Funktion mit 100MHz Clockfrequenz.
- Anpassung der Fly-back Speisung an die reale Leistungsaufnahme des *DSP* und der Messorgane.

Der verwendete Umrichter entstammt nicht der letzten Generation. Es ist vorstellbar dass bei neueren Umrichtern dieser Betriebsmodus « sleep/halt » implementiert wurde und weniger Leistung verbraucht wird.

Mit dem funktionellen Ausgangswechselrichter und stillstehender Maschine steigt die Leistungsaufnahme des PMM-Drives nur merklich an. Im Stillstand wird der Ausgangswechselrichter nicht umgeschaltet weil die Ausgangsspannung des Abwärtsstellers auf 0V geregelt wird. Dadurch spielt der Schaltzustand des Ausgangswechselrichters eine untergeordnete Rolle.

Bei einem handelsüblichen Umrichter jedoch sind die Verluste bei Stillstand der Maschine nicht vernachlässigbar und praktisch 10x höher als jene des PMM-Drives. Da sich der Spannungszwischenkreis nach dem dreiphasigen Gleichrichter infolge der verketteten Netzspannung auf $560V_{DC}$ befindet, wird jeder Umrichterzweig mit 50% Tastverhältnis getaktet, um verschwindend kleine Maschinenspannungen zu erzeugen. Dadurch entstehen hohe Schaltverluste.

4.7 Norm IEC 61000-3-2 (Klasse A)

Die Norm IEC 61000-3-2 legt die Störungen fest, die ein elektronischer Verbraucher auf den Leitungen des speisenden Stromnetzes verursachen darf.

Der Strom, der vom Netz zum PMM-Drive-Konverter fließt, zeigt keinen konstanten Verlauf (siehe Diagramm 9), vielmehr erkennt man beim Einschalten der Blöcke eine Stromspitze. In Folge dieser Stromspitze wird die IEC Norm 61000-3-2 (Klasse A), zurzeit noch nicht erfüllt. Mit einfachem Aufwand am Stromregler wird die Einhaltung der Norm in Zukunft erreicht.

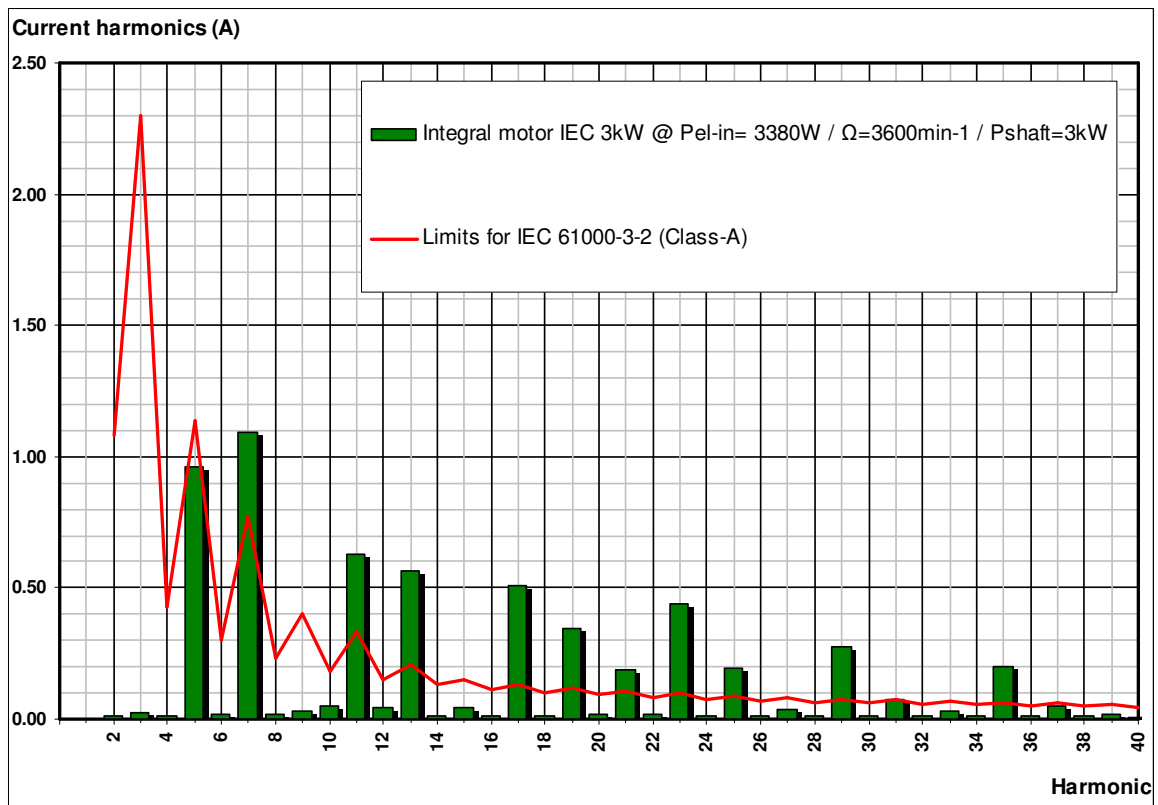


Diagramm 28 zeigt die Harmonischen des Stromes bei der Ausgangsleistung von 3kW.

Die Harmonischen 7-9-11-13-17-19-21-23-25-29-35 überschreiten die Norm. Sie entstehen durch die Modulation des Stromes mit der 300Hz Welligkeit der gleichgerichteten Spannung.

5. Diskussion

5.1 Wirkungsgrad der Maschine mit angeschlossenem Konverter

Von Interesse ist natürlich der gesamte Wirkungsgrad der Maschine mit dem Konverter. **Der Einsatz des Konverters erlaubt variable Drehzahlen zu fahren. El. Antriebe mit Drehzahlverstellung sparen beim Antrieb von Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren erheblich el. Energie ein. Der Anteil dieser Strömungsmaschinen am schweizerischen Stromverbrauch beträgt 30%.**

Das Diagramm 29 zeigt die erhaltenen Resultate für den PMM-Drive mit der BLDC CM-IEC-3kW Maschine, dies bei 3000U/min und bei 3600U/min.

Diese Resultate werden verglichen mit einem System einer Asynchronmaschine der Klasse EFF1, die einerseits direkt mit dem Netz verbunden wird (konstante Drehzahl ≈ 2950 U/min) und andererseits durch einen Umrichter gesteuert wird.

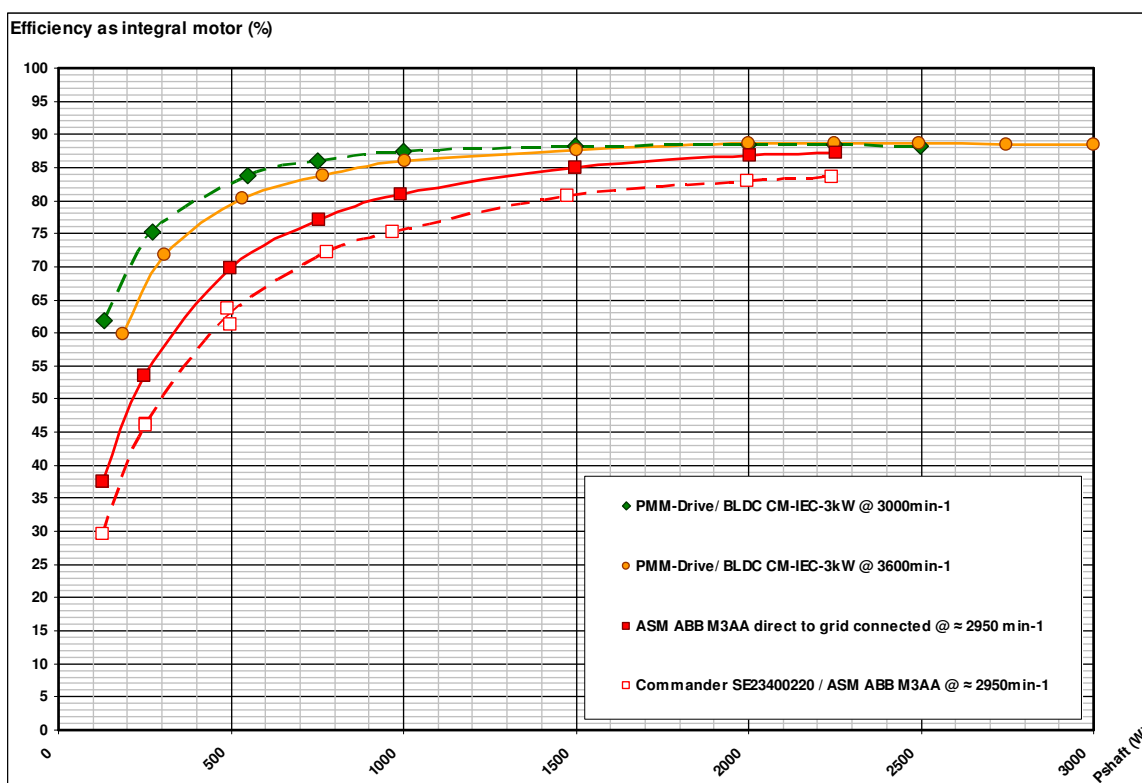


Diagramm 29: Wirkungsgrad als Integral Motor Lösung

Die Lösung mit **PMM-Drive** und **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine erreicht **einen Wirkungsgrad von 88%** oberhalb der halben Nennleistung (1250W) bei einer Nenndrehzahl von 3000U/min und oberhalb von 2/3 der Nennleistung (2000W) bei einer Nenndrehzahl von 3600U/min. Im Teillastbereich ist der Wirkungsgrad bei einer Nenndrehzahl von 3000U/min höher, da die mechanischen und die Eisenverluste geringer ausfallen.

Die drehzahlvariable Lösung PMM-Drive/BLDC CM-IEC-3kW erreicht und überschreitet leicht den Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine der Klasse EFF1 mit direktem Netzanschluss (mehr als 88% für PMM-Drive/BLDC gegenüber 87.6% der Asynchronmaschine gemäss Herstellerangaben, da die Messungen der Asynchronmaschine zu Vergleichszwecken nur bis zu 2250W durchgeführt wurden). **Im Teillastbereich wird dieser Unterschied noch grösser. Mit dem Vorteil des drehzahlvariablen Betriebs ist die Lösung mit PMM-Drive/BLDC CM-IEC-3kW immer besser als die gemessene Asynchronmaschine der Klasse EFF1, auch bei direktem Netzanschluss.**

Die drehzahlvariable Lösung **PMM-Drive/BLDC CM-IEC-3kW** unterscheidet sich noch deutlicher von einer **handelsüblichen Lösung mit Umrichter**, dargestellt durch die Kurve Commander SE23400220/ASM ABB M3AA: **Mehr als 3% bei Nennleistung** (extrapolierter Wert $87.6\% \times 96.5\% = 84.5\%$), **mehr als 6% bei $P_n/2$, mehr als 10% bei $P_n/3$.**

5.2 Verbesserung des Maschinenstromes bezüglich Effizienz

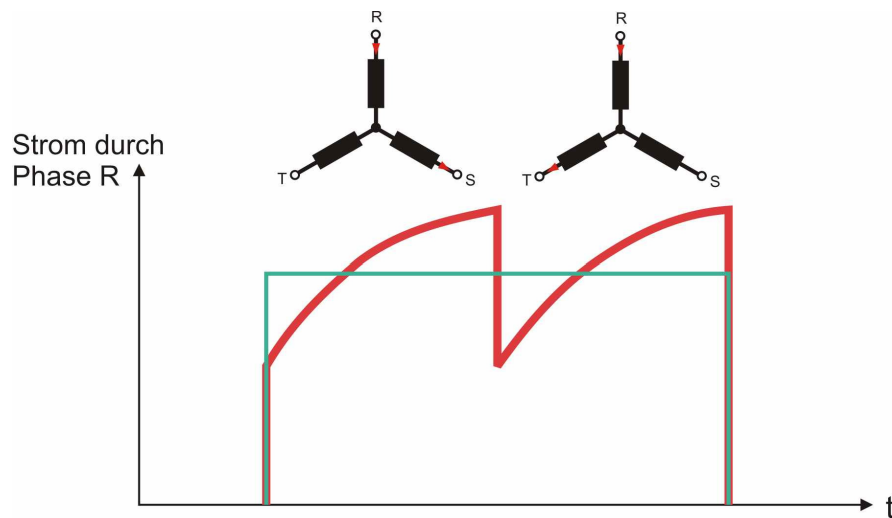


Abbildung 30: zeigt den Verlauf des gemessenen Stroms in einer Phase des Motors

Beim gewählten 6 pulsigen brushless Steuerverfahren fließt der Strom jeweils nur in zwei Phasen, die dritte Phase bleibt unbestromt. Der gemessene Verlauf des Phasenstroms bricht in der Mitte des Blocks (Abb 30) ein und steigt gemäss einer e-Funktion wieder an. Dieser Stromeinbruch erzeugt die Umschaltung (Kommutierung), in unserem Beispiel von Phase S nach Phase T. Der induktive Widerstand der Phase T verzögert den Stromanstieg. Die Regelung des Abwärtsstellers kann, durch einen Spannungshub, den roten Verlauf nicht einem vollständig rechteckigen Verlauf des Stromes angleichen (grüne Linie). Dies begründet sich im induktiven Widerstand der Nutstreuung, die nicht beliebig verkleinert werden kann. Der rechteckige Stromverlauf wäre aber deshalb vorteilhaft, weil weniger Stromwärme in der Wicklung erzeugt wird.

Nach dem Studium der Fachliteratur fanden wir sehr interessante Anregungen, die zudem auch Vorteile bezüglich der Effizienz zeigen. Vorgeschlagen wird an Stelle der 6 pulsigen Steuerverfahren auf 12 Pulse zu erhöhen. [3].

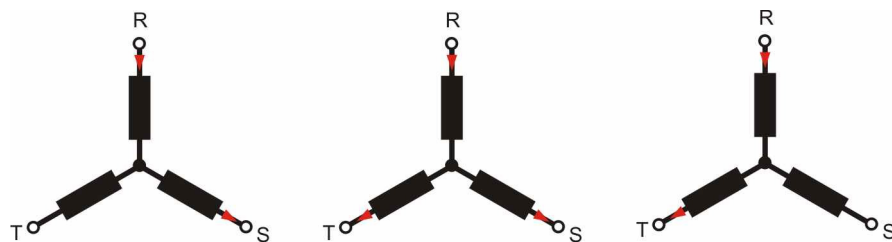


Abb 31: zeigt ein Ausschnitt aus einem 12 pulsigen Steuerverfahren

Im mittleren Bild (Abb 31) ist ein weiterer Puls dazwischen gefügt. Die Phasen S und T sind an Minuspotential der Steuerung geschaltet um bereits in der Phase T einen Strom aufzubauen. Damit bricht der Strom nicht mehr ein (Abb 30). Die Effizienz erhöht sich durch weniger Stromwärme in der Wicklung und die Geräusche der Kommutierung sind reduziert.

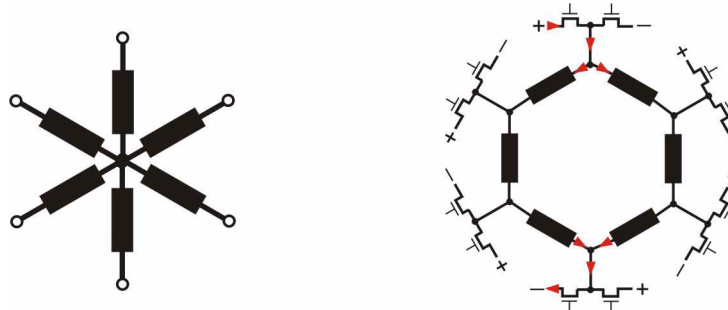


Abb 32: zeigt die Möglichkeit von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen

Ein weiterer Ansatz besteht in der Realisierung von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen. Die grössere Anzahl der Kommutierungen bei kleinerem Strom zeigt weniger Schwankungen im Drehmoment, verringern die Geräusche und erhöhen den Wirkungsgrad. Erste Berechnungen im *FEMAG*, einem Programm für die Auslegung von el. Maschinen entwickelt an der *ETHZ*, zeigen die angesprochenen Vorteile, wenn von einem 3 Phasen-Motor zu 6 Phasen gewechselt wird.

Die Wicklung (Abb 32 links) zeigt Vorteile in der Fertigung, wenn eine 3 Phasen Wicklung nur noch wenige Leiter pro Nut aufweisen würde. Bei wechseln zur 6 Phasen Wicklung sinkt der Strom pro Phase und die Leiterzahl pro Nut steigt an. Die Herstellung der Wicklung, die Montage der Anschlüsse ans Klemmenbrett werden somit einfacher. Diese Vorteile zeichnen sich besonders dann aus, wenn noch leistungsstärkere IEC Permanent-Magnet-Motoren für den Einsatz in der Industrie entwickelt werden. Oder wenn von einer Speisung von 3x400V auf eine Batteriespannung von 24 / 36 / 48 Volt gewechselt wird. Diese effizienten, leistungsstarken Permanent-Magnet-Motoren, gebaut für Niederspannung, mit einer 6 oder sogar 12 Phasen Wicklung wären **für den Einsatz in Elektrofahrzeugen bestens geeignet!**

Abbildung 32 rechts zeigt eine Sechseckschaltung der Wicklung. Jedes Eck ist über zwei Leistungshalbleiter an den Ausgang des Abwärtsstellers (Abb 3) geschaltet. Mit diesem Vorschlag entstehen in einfacher Weise berührungsfreie elektronische Bürsten für einen Permanent-Magnet-erregten Gleichstrommotor. Mit dem IEC 100/4 Blechschnitt, wie beim gebauten Motor verwendet, liesse sich sogar eine Zwölfeckschaltung einer Wicklung bauen, was das Stromproblem in Abbildung 30 elegant lösen würde.

Die Überlegungen der Seiten 27 und 28, betreffen das Anstellungsverfahren des maschinenseitigen Wechselrichters (Abb 3, Q1 – Q6, und erweitert mit Q7-Q12 Abb 32) auf die beste Effizienz und könnten sinnvoller Weise in einem möglichen weiteren Auftrag verfolgt werden.

5.3 Gewicht und Rohstoffverbrauch

Effiziente Permanent-Magnet-Motoren sind leichter als Asynchronmotoren mit gleicher Wellenleistung und gleicher Drehzahl. In Tabelle 33 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.

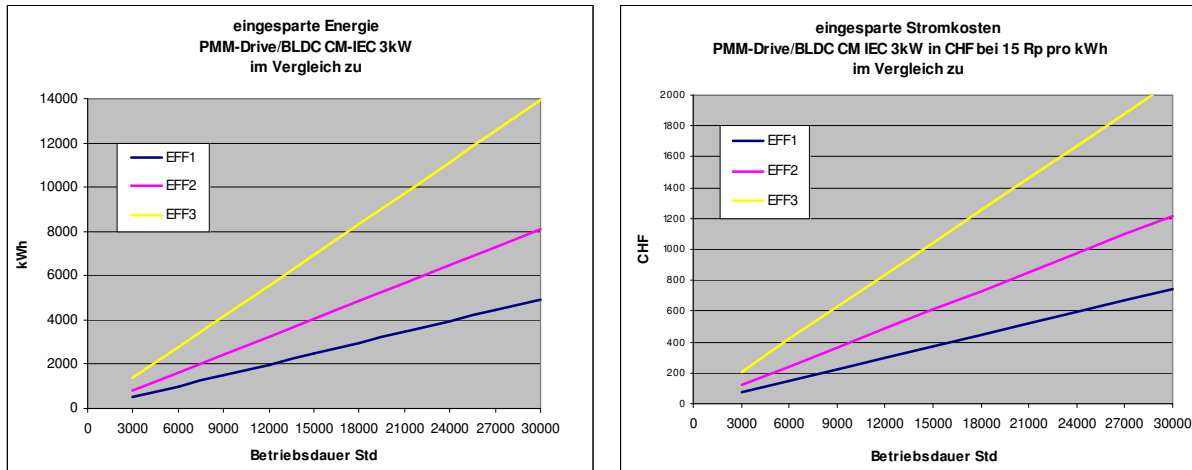
Gewichtstabelle des 3kW Permanent-Magnet-Motors (ohne Elektronik)	
nach Komponenten	Gewicht in kg
Statoreisen	4.3
Kupfer der Wicklung	1.7
NdFeB Magnete	0.295
Rotor (Fe) ohne Magnete	1.9
Welle ohne Lager	1.17
Kugellager A	0.21
Kugellager B	0.11
Statorleergehäuse inkl. Klemmenkasten, Flansch mitte, Enddeckel, 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 33 zeigt einen Vergleich der Gewichte

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

5.4 Kosten



Die Diagramme 34/35 basieren auf dem Vergleich des **PMM-Drive/BLDC CM-IEC 3kW** mit Asynchronmotoren der Effizienzkategorie 1-3 angeschlossen an einen Umformer und zeigen die eingesparte Energie und die eingesparten Stromkosten.

Eine Kalkulation zeigt, dass der Motor zusammen mit der Steuerung PMM-Drive, gefertigt in hohen Stückzahlen, mit Asynchronmotoren (Normmotoren) der Klasse EFF2 angeschlossen an Umformern, in Konkurrenz treten kann. Es kann sogar eine Fertigung in der Schweiz angestrebt werden, wenn der Verkauf, ab Werk direkt zum Endkunden erfolgt! Die durchgeführte Kalkulation beinhaltet Daten unserer Lieferanten und wird deshalb nicht veröffentlicht.

Eine sinnvolle Betrachtung ist der Austausch vom EFF2 & 3 Asynchronmotoren hin zur Lösung PMM-Drive/ BLDC CM-IEC-3kW. Für den Wechsel eines EFF1 Asynchronmotors mit Umformer zur Variante PMM-Drive/BLDC CM-IEC 3kW ist die Differenz des Wirkungsgrads zu gering.

Die Diagramme 34/35 zeigen die finanzielle- und energetische Einsparung und beziehen sich auf eine Drehzahl von 3000 U/min und der gemittelten Energieeinsparung des Lastprofils aus 20%,40%,60%,80%,100% der Nennlast. Die energetische Betrachtung mit dem beschriebenen Lastprofil rechtfertigt eine Schätzung zur eingesparten Energie, auch wenn Asynchronmotoren bei einer synchronen Drehzahl in Wirklichkeit nicht an einen Umformer angeschlossen sind. Andere Lastprofile sind sehr unterschiedlich und orientieren sich an der betrachteten Anlage. In unseren Arbeiten wurde noch nie ein **Prozess mit vorgegebenem Last- und Drehzahlspiel** mit Permanent-Magnet-Motoren an einer Gesamtanlage durchgeführt und die Effizienz bestimmt. In der Schlussfolgerung wird dies vorgeschlagen.

Das Potential der Einsparung von el. Energie in der Schweiz, mit effizienten drehzahlregulierten Permanent-Magnet-Motoren, wurde in der Studie „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“ [1] bereits bestimmt. Geht man davon aus, dass am Markt die Anzahl IEC Normmotoren pro IEC Baugröße (1-90kW) x die verbrauchte el. Energie konstant bleibt, so berechnet sich die **eingesparte el. Energie auf 60 Mio kWh pro Jahr**, wenn **alle 3kW IEC Normmotoren** der Klasse EFF2 mit der Variante **PMM-Drive/BLDC CM-IEC 3kW** in der Schweiz ersetzt würden.

6. Schlussfolgerungen

Der **maximale gemessene Wirkungsgrad der Steuerung beträgt 96.5 % und des Motors 92%.**

Mit dem **Vorteil des drehzahlvariablen Betriebs** ist die **Effizienz** des gebauten **3kW IEC Permanent Magnet - Motors mit Steuerung immer höher, als die eines gemessenen Asynchronmotors der Klasse EFF1**, auch bei direktem Netzanschluss. Der **Permanent-Magnet-Motor** ist zudem rund **10 kg leichter**. Die **Kostenrechnung** zeigt auf, dass der **Permanent-Magnet-Motor mit dem Asynchronmotor in Konkurrenz treten kann**, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. Hier liegt auch das grösste Energiesparpotential bei drehzahlverstellbaren Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren vor.

Wie gezeigt, könnte die Effizienz noch erhöht werden, wenn:

- Die Pulszahl beim Steuerungsverfahren von 6 auf 12 erhöht wird (Abb 31) [3].
- Die Phasenzahl des Motors 6 beträgt (Abb 32).
- Die Standby Verluste der Elektronik verringert werden (Seite 24).
- Noch Optimierungen beim Stator, durch neue Ideen bei der Wicklungsart erfolgen, sowie 350 V induzierte Spannung bei 3000 U/min erreicht werden.

*In einer weiterführenden Arbeit, schlagen wir das **Ziel eines maximalen Wirkungsgrads von 90%**, mit einem PMM-Drive Konverter zusammen mit einem BLDC CM-IEC-3kW Motor vor.*

Besonders das brushless Steuerungsverfahren mit den 6 Pulsen ist noch rudimentär und wurde in unseren Arbeiten noch nie vertieft, auf bessere Effizienz untersucht. Zudem fanden wir in Recherchen modernere Verfahren [3], die sich positiv auf die Effizienz und Geräusche auswirken könnten. Es ist deshalb sinnvoll in einer zukünftigen Arbeit den **Schwerpunkt beim brushless DC Steuerungsverfahren** zu setzen, sowie die oben genannten Optimierungen durchzuführen.

*In einem zusätzlichen Schritt wird vorgeschlagen, diese Arbeit in der Industrie vorzustellen und zu diskutieren. Sinnvoll wäre es einen BLDC CM-IEC-3kW Motor mit einem PMM-Drive Konverter in einer Anlage eines Industriepartners einzubauen (Bereich Pumpe oder Ventilator) und ein **Pilotprojekt** durchzuführen. Lastprofile wurden in unseren Arbeiten noch nie mit Permanent-Magnet-Motoren gefahren. Die **Effizienz und die Energieeinsparung**, bei dem vom **Prozess vorgegebenem Last- und Drehzahlspiel**, könnte für eine Gesamtanlage, sowie für die einzelnen Komponenten bestimmt und mit der herkömmlichen Lösung verglichen werden. (Alle Angaben zur Effizienz von Permanent-Magnet-Motoren in den bisherigen Arbeiten bezogen sich auf synchrone Drehzahlen, bei Nenn- und Teillast).*

Mittelfristig soll die vorgeschlagene Permanent-Motor-Technik und die zugehörige Antriebssteuerung unter Einbezug der Industrie, in weiterführenden Schritten bis zu einer Leistungsgrösse von 22 kW, wie das im Antrag zu diesem Auftrag bereits vorgeschlagen wurde, erweitert werden.

Noch festzuhalten bleibt, dass uns die Ausführung dieses Auftrags viel Freude bereitete und wir sind schon ein wenig stolz, dass unser **BLDC CM-IEC-3kW Motor mit dem PMM-Drive Konverter**, in seiner Effizienz höher liegt, als der Asynchronmotor Klasse EFF1 eines namhaften Herstellers.

Symbolverzeichnis

Im Symbolverzeichnis sind die wichtigen Begriffe in diesem Bericht aufgeführt.

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

Frequenzumformer und **Umformer** sind gleich bedeutend und bezeichnen das Steuergerät für variable Drehzahlen beim Asynchronmotor.

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

Brushless DC Steuerung bezeichnet das Ansteuerungsverfahren 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.

PMM-Drive bezeichnet die effiziente Steuerung mit Drehzahlverstellung entwickelt an der Hochschule Wallis.

BLDC CM-IEC 3kW bezeichnet den effizienten brushless DC Motor gebaut von Circle Motor AG. Zur Bestimmung des Gesamtwirkungsgrads, mit der Möglichkeit der Drehzahlverstellung, ist der **BLDC CM-IEC 3kW** Motor mit dem **PMM-Drive** Konverter elektrisch verbunden.

BLDC DM-SNP ist ein brushless DC Motor hergestellt von der Elektromaschinenbau GmbH.

ASM ABB M3AA ist ein Asynchronmotor 3kW 2 polig Effizienzklasse EFF1 von ABB Suisse SA.

Commander SE23400220 ist der Umformer zugehörig zum **ASM ABB M3AA**.

Referenzen

- [1] **Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren.** Studie des Bundesamts für Energie. Durchgeführt von Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch
- [2] **Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1kW.** Auftrag des Bundesamts für Energie. Durchgeführt von Circle Motor AG. www.electricity-research.ch
- [3] **Electronically commutated motors for fan applications.** András Lelkes, emb-Werke GmbH & Co. KG, D-74671 Muldingen.

Alle Bilder, Tabellen, Diagramme und Fotos in diesem Bericht sind durch die Projektmitglieder entstanden.

Anhang

Messungen: Prinzip und Genauigkeit

In diesem Kapitel soll erläutert werden, wie die Wirkungsgradmessungen durchgeführt wurden. Der erste Abschnitt beschreibt den mechanischen und elektrischen Aufbau der Maschinen und der zweite listet die Messgenauigkeit der verwendeten Geräte auf.

Mechanisch-elektrischer Aufbau der Maschinen

Die **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine wurde mit den laborüblichen Montagedreiecken aufgebaut und im Leerlauf und mit der Lastmaschine getestet.

Für die Lastmessungen wurde die **BLDC CM-IEC-3kW** mit der **BLDC DM-SNP** gekoppelt, die als Generator mit Lastwiderständen belastet wurde. Zwischen den Wellen wurde ein Drehmomentmessgerät (Torquemaster TM 208B) mit Hilfe von Aluminiumkupplungen eingefügt, die jeweils einen Freiheitsgrad erlauben. Damit kompensieren sich die Fehler der Ausrichtung. Die (Abb 36) zeigt den Testaufbau und die Kopplung der **BLDC CM-IEC-3kW**-Maschine mit der **BLDC DM-SNP**-Maschine.

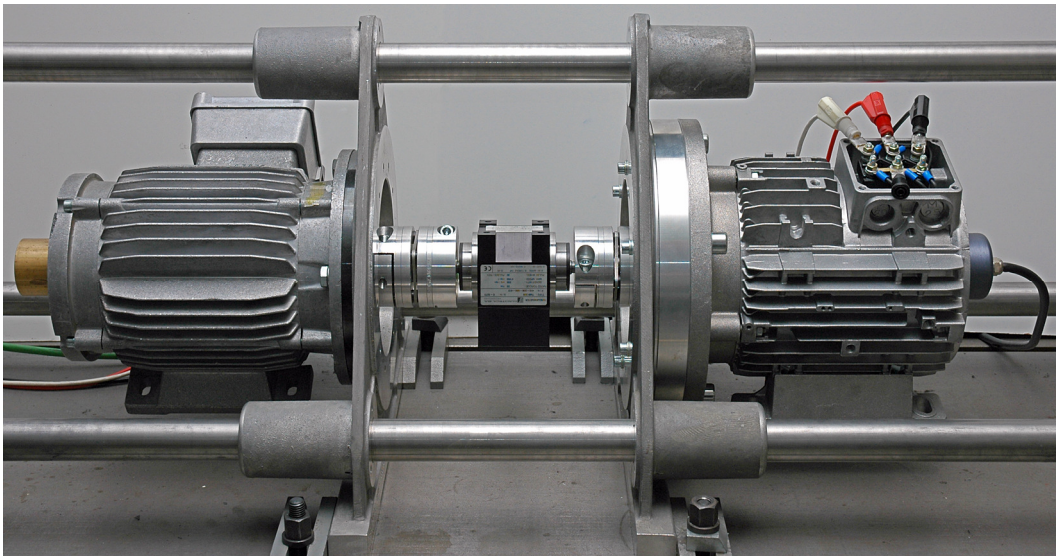


Abb 36: Mechanischer Aufbau der Maschinen, links **BLDC DM-SNP (IEC90)**,
rechts **BLDC CM-IEC-3kW (IEC100)**

Der Wirkungsgrad wurde mit Hilfe eines 4Kanal Leistungsmessgeräts bestimmt. Es wurde die Aronschaltung verwendet, um gleichzeitig die dreiphasigen Ein- und Ausgangsleistungen des Konverters zu bestimmen. Das Leistungsmessgerät verfügt über zusätzliche digitale und analoge Eingänge. Die Frequenz und Spannungsausgänge der Drehmomentmessung wurden ebenfalls gleichzeitig gemessen um den Wirkungsgrad des **PMM-Drive** Konverters, der **BLDC CM-IEC-3kW** Maschine und des Gesamtwirkungsgrad zu bestimmen.

Das Blockschaema 37 des Messsystems am Beispiel der Wirkungsgradmessung

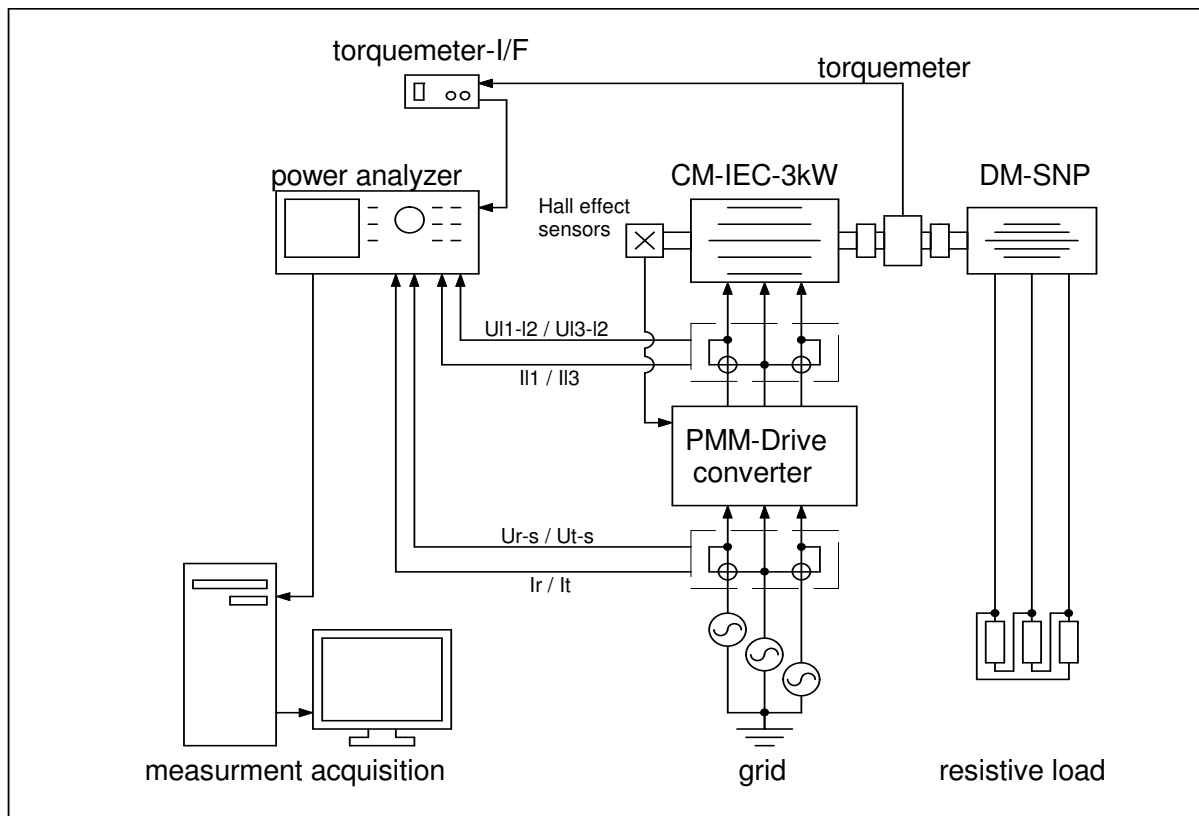


Abb 37: Blockschaema des gesamten Messaufbaus

Die Abtastrate des Leistungsmessgeräts beträgt 3MSamples/s für die Spannungen und Ströme und 200 Samples/s für die zusätzlichen analogen Eingänge. Die Drehzahl- und Drehmomentsignale werden durch ein Digitalfilter angepasst. Die Erneuerung der Anzeige liegt bei 5ms, wobei die letzten 200 Abtastungen noch durch ein « moving average » gemittelt werden.

Die Messungen wurden bei zunehmender Leistung durchgeführt. Für jeden Betriebspunkt wurden die Messwerte erst übernommen, nachdem das System die stationäre Temperatur erreicht hat.

Messgeräte

Die Genauigkeit der verwendeten Messgeräte wird in den folgenden Tabellen 38-30 dargestellt. Der maximale Fehler wird angegeben in Funktion der ungünstigsten Messbereiche, die verwendet wurden.

Drehmomentmessung	Lieferant	Typ	Gemessene Signale (Einheiten)	Gesamter maximaler Fehler
Drehmoment und Geschwindigkeit Messeinheit	Vibro-Meter SA, CH-Fribourg	TM 208B	T (Nm) / Ω (min ⁻¹)	$\leq \pm 0.56\%$ / -
Drehmoment und Geschwindigkeit Erfassungseinheit	HES-SO Wallis, CH-Sion	Torsion_Meter_IF_V2.1	U (V) / Ω (min ⁻¹)	$\leq \pm 0.01\%$ / -
Wattmeter Spannung und Frequenz Schnittstelle	ZES ZIMMER Electronic Systems, D-Oberursel	Digital/Analog Erfassungskarte Option L50-03 zur LMG500	U (V) / f (Hz)	$\leq \pm 0.25\%$ / $\leq 0.01\%$
Totaler Fehler der mechanischen Leistung			P (w)	$\leq 0.83\%$

Tabelle 38: Drehmomentmessung

Elektrische Leistung	Lieferant	Typ	Gemessene Signale (Einheiten)	Gesamter maximaler Fehler
Eingang-Wirkleistung	ZES ZIMMER Electronic Systems, D-Oberursel	LMG500	U (V) / I (A) / P(W)	$\leq 0.08\%$ / $\leq 0.33\%$ / $\leq 0.45\%$
Ausgang-Wirkleistung	ZES ZIMMER Electronic Systems, D-Oberursel	LMG500	U (V) / I (A) / P(W)	$\leq 0.19\%$ / $\leq 0.23\%$ / $\leq 0.91\%$

Tabelle 39: Leistungsmessung mit Wattmeter

Wirkungsgrad	Gemessene Signale / Einheiten	Gesamter maximaler Fehler
Wirkungsgrad PMM-Drive	η (-)	$1.36 \leq \%$
Wirkungsgrad CM-IEC-3kW	η (-)	$1.74 \leq \%$
Wirkungsgrad Integral Motor	η (-)	$1.28 \leq \%$

Tabelle 40: Maximaler resultierender Fehler bei der Wirkungsgradberechnung

Berechnungsprogramm für el. Maschinen: Maxwell <-> FEMAG

Die Auslegung der Motoren in dieser Arbeit erfolgten in *Maxwell 3D* mit dem zugehörigen Programm *RMxpert*. *RMxpert* ist eine übergeordnete Eingabe für genutzte rotierende el. Maschinen. Es erlaubt einfach und schnell die nötigen Parameter einzugeben und berechnet die Datensätze, gemäss den Seiten 37 - 45.

In dieser Arbeit trat mit *Maxwell / RMxpert* eine Schwierigkeit auf.

Maxwell / RMxpert berechnete beim **BLDC CM-IEC-3kW**, für eine Anschlussspannung von 400V, 20 Leiter pro Nut. Beim gebauten Motor mit dieser Leiterzahl erreichte die verkettete, induzierte Spannung an der Wicklung einen viel zu tiefen Wert von nur 270V (Abb 15). Die Suche nach dem Grund im Maxwell 3D scheiterte, weil uns die vielen Eingabemasken überforderten. Ein Kontakt mit der Zweigniederlassung des Herstellers in Deutschland erfolgte. Da bereits auch gute Kenntnisse mit dem Programm *FEMAG* vorhanden sind, entschlossen wir uns den Wert der induzierten Wicklungsspannung im *FEMAG* nachzurechnen. Das Ergebnis stimmt gut mit der Wirklichkeit überein, sodass wir beschlossen haben, zukünftig mit *FEMAG* zu arbeiten.

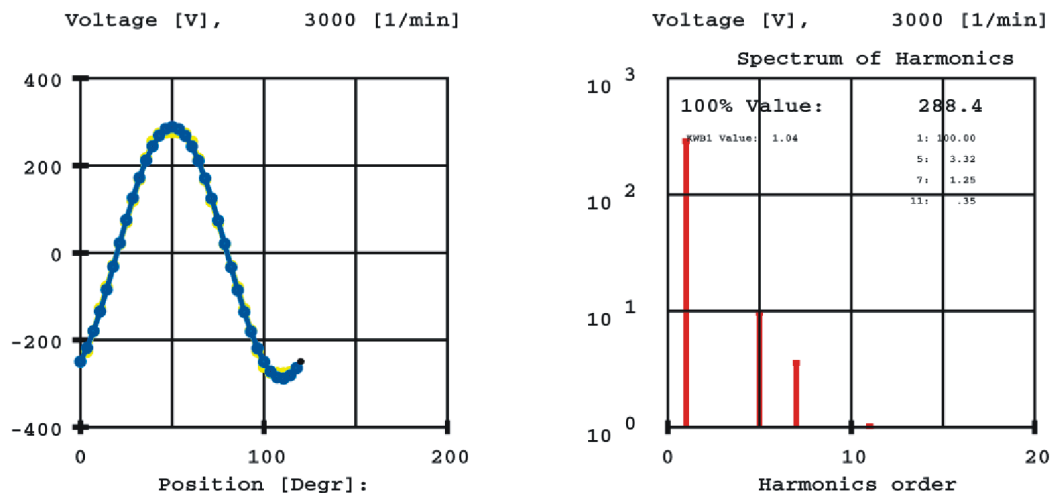


Abb 41: Berechneter Verlauf im FEMAG der induzierten, verketteten Spannung des BLDC CM-IEC-3kW Motors mit dem Anteil an harmonischen Oberwellen.

Die blaue Linie stellt die sinusförmige Grundschiwingung dar. Die noch schwach sichtbare gelbe Linie ist der gesuchte Spannungsverlauf **einer** verketteten induzierten Wicklungsspannung, wie diese in Wirklichkeit beim BLDC CM-IEC 3kW Motor bei 3000U/min und 20 Leitern pro Nut auftritt (Abb 15).

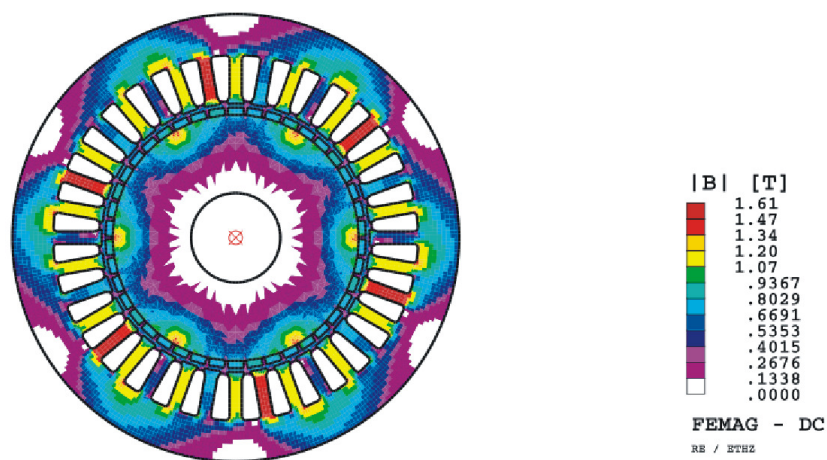


Abb 42: magn. Induktionsverteilung im Motor

Daten aus Maxwell/RMxprt

Für die beiden, in die engere Wahl gezogenen Motoren, sind die Datensätze aus Maxwell/RMxprt aufgeführt.

Daten des Permanent-Magnet-Motors mit sinusförmiger induzierter Wicklungsspannung.
Geeignet als Synchronmotor.

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	3
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	6
Wind Loss (W):	3
Rotor Position:	Inner
Type of Load:	Constant Power
Type of Circuit:	Y3
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
One-Transistor Voltage Drop (V):	0
One-Diode Voltage Drop (V):	0
Operating Temperature (C):	75
Maximum Current for CCC (A):	0
Minimum Current for CCC (A):	0

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	150
Inner Diameter of Stator (mm):	90
Type of Stator Slot:	4
Dimension of Stator Slot	
hs0 (mm):	0.29
hs1 (mm):	0.84
hs2 (mm):	13.68
bs0 (mm):	2.4
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	6.35
rs (mm):	1.2
Top Tooth Width (mm):	3.9538
Bottom Tooth Width (mm):	4.09694

Skew Width (Number of Slots)	1
Length of Stator Core (mm):	70
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Slot Insulation Thickness (mm):	0
End Length Adjustment (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1
Number of Conductors per Slot:	22
Type of Coils:	11
Average Coil Pitch:	5
Number of Wires per Conductor:	3
Wire Diameter (mm):	0.6438
Wire Wrap Thickness (mm):	0.2
Stator Slot Fill Factor (%):	65.7432
Coil Half-Turn Length (mm):	138.788

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.2
Inner Diameter (mm):	30
Length of Rotor (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Polar Arc Radius (mm):	35.3899
Mechanical Pole Embrace:	0.6666
Electrical Pole Embrace:	0.609581
Max. Thickness of Magnet (mm):	2.5
Width of Magnet (mm):	29.5312
Type of Magnet:	NdFe35
Type of Rotor:	1

PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Coercive Force (kA/m):	1030.83
Maximum Energy Density (kJ/m ³):	333.819
Relative Recoil Permeability:	1
Demagnetized Flux Density (Tesla):	7.90614e-005
Recoil Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Recoil Coercive Force (kA/m):	1030.83

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m ³):	8900
Permanent Magnet Density (kg/m ³):	7800
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Armature Copper Weight (kg):	0.955387
Permanent Magnet Weight (kg):	0.222383
Armature Core Steel Weight (kg):	4.24598
Rotor Core Steel Weight (kg):	2.36645
Total Net Weight (kg):	7.7902
Armature Core Steel Consumption (kg):	8.98108
Rotor Core Steel Consumption (kg):	2.92766

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor:	0.965926
D-Axis Reactive Inductance L_{ad} (H):	0.00352236
Q-Axis Reactive Inductance L_{aq} (H):	0.00352236
D-Axis Inductance $L_1 + L_{ad}$ (H):	0.00477118
Q-Axis Inductance $L_1 + L_{aq}$ (H):	0.00477118
Armature Leakage Inductance L_1 (H):	0.00124882
Zero-Sequence Inductance L_0 (H):	0.00124882
Armature Phase Resistance R_1 (ohm):	0.814145
D-Axis Time Constant (s):	0.00432645
Q-Axis Time Constant (s):	0.00432645
Ideal Torque Constant K_T (Nm/A):	1.12189
Ideal Back-EMF Constant K_E (Vs/rad):	1.12189
Start Torque Constant K_T (Nm/A):	0.792183
Start Back-EMF Constant K_E (Vs/rad):	0.792183

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.73281
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	0.881188
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.48214
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.810904
Magnet Flux Density (Tesla):	0.815834

Stator-Teeth By-Pass Factor:	0.00568068
Stator-Yoke By-Pass Factor:	6.46377e-006
Rotor-Yoke By-Pass Factor:	8.32819e-006
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	82.3407
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	2.63339

Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	0.789465
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	868.424
Magnet Ampere Turns (A.T):	-953.977
Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T):	6395.65
Leakage-Flux Factor:	1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.864235
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.882498
No-Load Speed (rpm):	3552.38
Cogging Torque (N.m):	8.04933e-012

FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	8.10163
Root-Mean-Square Armature Current (A):	7.20397
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	148.855
Specific Electric Loading (A/mm):	20.1792
Armature Current Density (A/mm^2):	7.37664
Frictional and Wind Loss (W):	8.96859
Iron-Core Loss (W):	104.709
Armature Copper Loss (W):	126.756
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	240.433
Output Power (W):	3000.22
Input Power (W):	3240.65
Efficiency (%):	92.5807
Rated Speed (rpm):	2993.71
Rated Torque (N.m):	9.57006
Locked-Rotor Torque (N.m):	194.225
Locked-Rotor Current (A):	245.202

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 1-layer winding can be arranged in 12 slots as below:

AAZZBBXXCCYY

Angle per slot (elec. degrees):	30
Phase-A axis (elec. degrees):	105
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

Number of Turns:	132
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.814145
End Leakage Inductance (H):	0.000282484

2D Equivalent Value:

Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla):	1.29534
Equivalent Hc (kA/m):	1030.83
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²):	0.00315652

Daten des Permanent-Magnet-Motors mit trapezförmiger induzierter Wicklungsspannung.
Gebauter BLDC CM-IEC 3kW Motor.

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	3
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	6
Wind Loss (W):	3
Rotor Position:	Inner
Type of Load:	Constant Power
Type of Circuit:	Y3
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
One-Transistor Voltage Drop (V):	0
One-Diode Voltage Drop (V):	0
Operating Temperature (C):	75
Maximum Current for CCC (A):	0
Minimum Current for CCC (A):	0

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	150
Inner Diameter of Stator (mm):	90
Type of Stator Slot:	4
Dimension of Stator Slot	
hs0 (mm):	0.29
hs1 (mm):	0.84
hs2 (mm):	13.68
bs0 (mm):	2.4
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	6.35
rs (mm):	1.2
Top Tooth Width (mm):	3.9538
Bottom Tooth Width (mm):	4.09694
Skew Width (Number of Slots)	1
Length of Stator Core (mm):	70
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Slot Insulation Thickness (mm):	0
End Length Adjustment (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1
Number of Conductors per Slot:	20

Als Rated Voltage in der Eingabe wurden 400V vorgegeben.

Mit 20 Leitern pro Nut ergibt sich beim gebauten Motor eine zu tiefe induzierte, verkettete Phasenspannung mit einem Amplitudenwert von 270V !

Siehe Abbildung 15.

Type of Coils:	11
Average Coil Pitch:	5
Number of Wires per Conductor:	3
Wire Diameter (mm):	0.6438
Wire Wrap Thickness (mm):	0.2
Stator Slot Fill Factor (%):	59.7665
Coil Half-Turn Length (mm):	138.788

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.2
Inner Diameter (mm):	30
Length of Rotor (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008

Polar Arc Radius (mm):	43.8
Mechanical Pole Embrace:	0.9
Electrical Pole Embrace:	0.893889
Max. Thickness of Magnet (mm):	2.5
Width of Magnet (mm):	39.7696
Type of Magnet:	NdFe35
Type of Rotor:	1

PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Coercive Force (kA/m):	1030.83
Maximum Energy Density (kJ/m ³):	333.819
Relative Recoil Permeability:	1
Demagnetized Flux Density (Tesla):	7.90614e-005
Recoil Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Recoil Coercive Force (kA/m):	1030.83

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m ³):	8900
Permanent Magnet Density (kg/m ³):	7800
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Armature Copper Weight (kg):	0.868534
Permanent Magnet Weight (kg):	0.328439
Armature Core Steel Weight (kg):	4.24598
Rotor Core Steel Weight (kg):	2.36645
Total Net Weight (kg):	7.8094
Armature Core Steel Consumption (kg):	8.98108
Rotor Core Steel Consumption (kg):	2.92766

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor:	0.965926
D-Axis Reactive Inductance L_{ad} (H):	0.00291104
Q-Axis Reactive Inductance L_{aq} (H):	0.00291104
D-Axis Inductance $L_1 + L_{ad}$ (H):	0.00394313
Q-Axis Inductance $L_1 + L_{aq}$ (H):	0.00394313
Armature Leakage Inductance L_1 (H):	0.00103208
Zero-Sequence Inductance L_0 (H):	0.00103208
Armature Phase Resistance R_1 (ohm):	0.740132
D-Axis Time Constant (s):	0.00393314
Q-Axis Time Constant (s):	0.00393314

Ideal Torque Constant K_T (Nm/A):	1.17578
Ideal Back-EMF Constant K_E (Vs/rad):	1.17578
Start Torque Constant K_T (Nm/A):	0.788917
Start Back-EMF Constant K_E (Vs/rad):	0.788917

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.66292
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.24005
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.678493
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.778197
Magnet Flux Density (Tesla):	0.852519
Stator-Teeth By-Pass Factor:	0.0031205
Stator-Yoke By-Pass Factor:	7.71245e-006
Rotor-Yoke By-Pass Factor:	7.01179e-006
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	43.4068
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	3.10162
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	0.885741
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	833.397
Magnet Ampere Turns (A.T):	-880.994
Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T):	6113.97
Leakage-Flux Factor:	1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.606614
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.835639
No-Load Speed (rpm):	3340.39
Cogging Torque (N.m):	1.35882e-012

FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	8.13795
Root-Mean-Square Armature Current (A):	6.99124
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	127.449
Specific Electric Loading (A/mm):	17.8031
Armature Current Density (A/mm^2):	7.15882
Frictional and Wind Loss (W):	8.54063
Iron-Core Loss (W):	138.105
Armature Copper Loss (W):	108.527
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	255.173

Output Power (W):	3000.01
Input Power (W):	3255.18
Efficiency (%):	92.161
Rated Speed (rpm):	2906.39
Rated Torque (N.m):	9.85688
Locked-Rotor Torque (N.m):	212.769
Locked-Rotor Current (A):	269.722

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 1-layer winding can be arranged in 12 slots as below:

AAZZBBXXCCYY

Angle per slot (elec. degrees):	30
Phase-A axis (elec. degrees):	105
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

Number of Turns:	120
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.740132
End Leakage Inductance (H):	0.000233457

2D Equivalent Value:

Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla):	1.29534
Equivalent Hc (kA/m):	1030.83
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²):	0.00315652