



# WIRTSCHAFTLICHKEIT, ANWENDUNGEN UND GRENZEN VON EFFIZIENTEN PERMA- NENT-MAGNET MOTOREN.

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Markus Lindegger, CIRCLE MOTOR AG**

Tannackerstrasse 25, CH-3073 Gümligen, [www.circlemotor.com](http://www.circlemotor.com), [info@circlemotor.ch](mailto:info@circlemotor.ch)

**Dominique Salathé, Yann Gosteli, Daniel Imgrüth, Damian Zumstein**

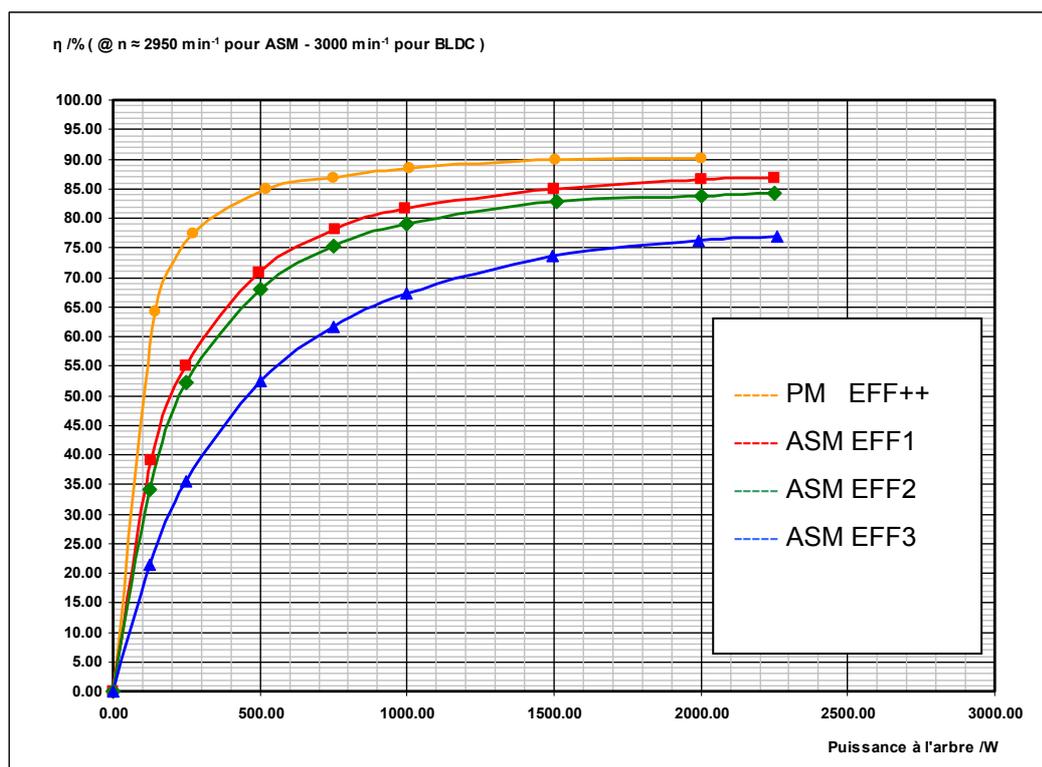
**Hochschule für Technik + Architektur Luzern**

Technikumstr. 21, CH-6048-Horw, [www.hta.fhz.ch](http://www.hta.fhz.ch) [dgsalathe@hta.fhz.ch](mailto:dgsalathe@hta.fhz.ch)

**Hans-Peter Biner, Blaise Evéquoz, Marc Emery**

**Hochschule Wallis HEV's**

Route du Rawy 47, CH-1950 Sion, [www.hevs.ch](http://www.hevs.ch) [hpeter.biner@hevs.ch](mailto:hpeter.biner@hevs.ch)



## Impressum

Datum: 30. Juni 2006

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Elektrizität

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](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektbegleiter: [roland.brueeniger@r-brueeniger-ag.ch](mailto:roland.brueeniger@r-brueeniger-ag.ch)

Projekt- / Vertragsnummer: 101374 / 151633

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Zusammenfassung .....	3
Resumée.....	3
Abstract.....	3
1. Ausgangslage .....	5
1.1    Bedeutung.....	5
1.2    Projektpartner .....	5
2. Ziel der Arbeit .....	5
3. Lösungsweg.....	5
4. Ergebnisse .....	7
4.1 Theoretischer Teil. Erarbeitet durch die Fachhochschule Luzern .....	7
4.1.1 Einführung .....	7
4.1.2 Simulationsprogramm Maxwell 3D und RMXprt .....	17
4.1.3 Motorensimulationen .....	30
4.1.3.1 PMM im 5.5 kW - Leistungsbereich .....	37
4.1.3.2 PMM im 15 kW - Leistungsbereich .....	52
4.1.3.3 PMM im 55 kW - Leistungsbereich .....	71
4.1.3.4 PMM im 90 kW - Leistungsbereich .....	91
4.1.4 Zusammenfassung .....	106
4.2 Praktischer Teil. Erarbeitet durch die Fachhochschule Wallis.....	112
4.2.1 Verwendete Maschinen.....	112
4.2.2 Netzbetrieb einer PMSM .....	117
4.2.3 Drehzahlregelung einer Synchronmaschine .....	120
4.2.3.1 Sinusmodulation .....	121
4.2.3.2 Blockmodulation .....	122
4.2.4 Messgeräte: Prinzip der Messungen und Genauigkeit .....	122
4.2.5 Leerlaufmessungen.....	126
4.2.5.1 Verluste in Funktion der Spannung .....	126
4.2.5.2 HF-Verluste in Funktion der Schaltfrequenz im Leerlauf.....	127
4.2.6 Lastmessungen .....	128
4.2.6.1 Wirkungsgrad im Netzbetrieb .....	128
4.2.6.2 Einfluss auf den der Schaltfrequenz Wirkungsgrad .....	130
4.2.6.3 Einfluss der Modulationsart Sinus ↔ Block.....	130
4.2.6.4 Bemerkungen zu gepulsten elektronischen Stellern .....	131
4.2.7 Zusammenfassung .....	133

5. Diskussion .....	134
5.1 Einleitung .....	134
5.1.1 Wirkungsgradklassifizierung.....	135
5.1.2 Wo entstehen die Verluste? .....	135
5.2 Einsparung von Rohstoffen und Gewicht.....	137
5.3 Kleinere Anlaufenergie durch reduziertes Massenträgheitsmoment des Rotors.....	140
5.4 Höhere Differenz der Wirkungsgrade bei kleineren Leistungen .....	140
5.5 Getriebemotoren .....	140
5.6 Betriebsverhalten .....	143
5.6.1. PM-Motor direkt am Drehstromnetz. ....	143
5.6.2 Betrieb der Motoren mit Drehzahlverstellung .....	143
5.7 Wo sind effiziente PM Motoren nicht einzusetzen. ....	145
6. Potential zur Einsparung von el. Energie mit effizienten PM-Motoren in der Schweiz. ....	145
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	146
Symbolverzeichnis, Definitionen.....	149
Referenzen .....	150
Anhang.....	ab 150

## Zusammenfassung

Mit Magneten aus Seltenerdmetallen, vor allem Neodym-Eisen-Bor, lassen sich in Permanent-Magnet-Motoren starke Magnetfelder aufbauen und in Bezug zur Asynchronmaschine einige Verlustquellen umgehen. Diese Eigenschaft spricht für den Einsatz des Permanent-Magnet-Motors zum Energie sparen. Die drei Projektpartner, Circle Motor AG, die Fachhochschulen Luzern und Wallis, setzten sich das Ziel, die Vor- und Nachteile der Permanent-Magnet-Maschine im Vergleich zur Asynchronmaschine zu kennen und geeignete Anwendungen aufzuzeigen.

Für die Herstellung von Permanent-Magnet-Motoren zeigen sich bis in den Leistungsbereich von einigen 100kW keine Grenzen. Hier nähern sich auch die Wirkungsgrade der beiden Motorenarten einander an. Die Permanent-Magnet-Motoren lassen sich bei Leistungen unter 10kW, wo die hohen Stückzahlen am Markt liegen, mit höherem Wirkungsgrad und geringerem Gewicht bauen, als vergleichbare Asynchronmotoren. Das eingesparte teure Kupfer und Aluminium bezahlt das Magnetmaterial, wenn vom schwereren IEC Normmotor ( Asynchronmotor ) zum leichteren Permanent-Magnet Motor gewechselt wird. Die bevorzugte Anwendung von Permanent-Magnet-Motoren sind Strömungsmaschinen, da ein echter Bedarf für Drehzahlverstellung vorliegt, lange Laufzeiten gegeben sind und der Wirkungsgrad höher liegt. Permanent-Magnet-Motoren benötigen weniger Anlaufenergie und sind einzusetzen, wenn oft angefahren wird. Bei kleinen Getriebeuntersetzungen und grösseren Leistungen, sind bei Permanent-Magnet-Direktantrieben gegenüber Getriebemotoren Vorteile erkennbar.

## Resumée

Des aimants à base de terres rares, surtout le Neodymium-Fer-Bore, permettent la réalisation de champs magnétiques forts dans des machines à aimants permanents, ce qui évite quelques sources de pertes par rapport à la machine asynchrone. Cette caractéristique met en évidence l'utilisation de la machine à aimants permanents dans l'objectif d'économiser de l'énergie. L'objectif des trois partenaires du projet, Circle Motor AG, les hautes écoles de Lucerne et du Valais, était de connaître les avantages et les inconvénients des machines à aimants permanents et de démontrer des applications possibles.

Dans la gamme de puissance de quelques centaines de kW, il n'y a pas de limites pour la réalisation de machines à aimants permanents. Dans ce cas, les rendements des deux machines sont proches. Dans une gamme de puissance en dessous de 10kW, où on trouve un grand nombre de pièces sur le marché, il est possible de construire des machines à aimants permanents avec un rendement plus élevé et un poids plus faible par rapport aux machines asynchrones. Le fait de passer du moteur normalisé lourd IEC (moteur asynchrone) au moteur à aimants permanents plus léger permet d'économiser du cuivre et de l'aluminium, qui sont chers, et cette économie paie le matériel magnétique. L'utilisation préférée des moteurs à aimants permanents est dans le domaine des machines de circulation (pompes) où il existe un vrai besoin de variation de vitesse, où on trouve des longues durées de fonctionnement et où le rendement doit être supérieur. Les moteurs à aimants permanents nécessitent moins d'énergie au démarrage : ils sont donc à utiliser dans les applications où il y a beaucoup de démarrages. Les entraînements directs à aimants permanents ont des avantages par rapport à des entraînements à engrenage avec un faible rapport de réduction ou de puissances élevées.

## Abstract

With magnets made of rare-earth-metals, particularly neodymium-iron-boron, it is possible to create strong magnetic fields in permanent magnet motors and to avoid several losses in respect to the asynchronous motor. This characteristic calls for the use of the permanent magnet motor to save energy. The three project partners, Circle Motor AG and the universities of applied sciences of Lucerne and Wallis, had in mind to identify the advantages as well as the disadvantages of the permanent magnet motor compared to the asynchronous motor and to show adequate applications.

Nowadays, the industry builds permanent magnet motors up to a range of performance of several 100kW. At these high-power-applications, the energy efficiencies of the two types of motors come very close to each other. At engine powers under 10kW, where the majority of motors in use lies, the permanent magnet motor can be built with higher energy efficiency and lower weight than comparable asynchronous motors. The savings on expensive copper and aluminium pay for the permanent magnets if the transition from the heavy IEC norm motor (asynchronous motor) to the lighter permanent magnet motor is made. The favoured use of permanent magnet motors is in fluid flow engines where the need of variable speeds as well as long operating times are given and regular. In this case the energy efficiency is higher, as well. Permanent magnet motors dissipate less start-up energy and are of good use in the case of frequent stop-and-go cycles. At low gear reductions and higher powers permanent magnet direct drives have obvious advantages compared to geared motors.

# 1. Ausgangslage

## 1.1 Bedeutung

Mit den Magnetwerkstoffen 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 zugeführt werden muss, wie beispielsweise beim Asynchronmotor. Deshalb ist bei Permanent – Magnet – Motoren eine hohe Effizienz gegeben. Neodym-Eisen-Bor ( NdFeB ) Magnete, gesintert oder Kunststoff gebunden, sind preiswert erhältlich und die Eigenschaften bezüglich der Stärke des Magnetfeldes, der max. Einsatztemperatur, der Formgebung und der Korrosionsfestigkeit der Oberflächen, werden laufend weiterentwickelt. Dieser Trend fördert den Einsatz des Permanent – Magnet – Motors mit seiner Eigenschaft zum Energie sparen.

## 1.2 Projektpartner

Mit der Entwicklung eines 3kW Permanent – Magnet – Generators für Windkraftanlagen besitzt die *Fachhochschule Wallis* die Kompetenz bei der Berechnung und dem Bau solcher Maschinen, sowie bei der zugehörigen Leistungselektronik. In verschiedenen Projektarbeiten und einer Diplomarbeit, Bau eines Generators mit Jochwicklung, FEM – Analysen, sowie Untersuchungen von Wirbelstromverlusten in einem Spaltrohr mittels Permanent – Magnet – Technik ist die *Fachhochschule Luzern* für diesen Aufgabenbereich gerüstet.

Die Energiesparmotoren von *Circle Motor AG*, aus den BFE Projekten, wurden an der Fachhochschule Luzern, im Labor für el. Maschinen, ausgemessen. Recherchen zu den BFE Projekten führten zum Kenntnis des Markts und den Anwendungsgebieten von Permanent – Magnet – Motoren. Ebenfalls besitzt *Circle Motor AG*, bezüglich Permanent Technik, Industriekontakte, auch in den europäischen Raum.

Mit Unterstützung des *Bundesamts für Energie BFE*, führten die drei Projektpartner eine Studie bezüglich der **Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent – Magnet – Motoren** durch.

## 2. Ziel der Arbeit

Als „roter Faden „ durch den gesamten Aufgabenbereich wird der Permanent – Magnet – Motor mit der Asynchronmaschine verglichen. Die Asynchronmaschine ist im Markt als IEC Normmotor in hoher Zahl eingesetzt. Deshalb bilden die IEC Normmotoren die Referenz für die Gegenüberstellung. Das Ziel ist, die Vorteile und die Grenzen der Permanent – Magnet – Maschine zu kennen und vorteilhafte Anwendungen am Markt aufzuzeigen. Diese Aufgabe gliedert sich in drei Teile:

- theoretischer Teil
- praktischer Teil
- Markt

## 3. Lösungsweg

In einem **theoretischen Teil** wird untersucht, wie sich mit zunehmender Baugrösse der el. Maschinen, Wirkungsgrad, Gewicht, Volumen und Leistung verhält. Zu Permanent – Magnet – Motoren, die im preislichen Wettbewerb zu drehzahlverstellbaren IEC Normmotoren stehen, gibt es sehr wenige Daten von namhaften Motorenherstellern. Die *Fachhochschule Luzern* berechnete deshalb die benötigten Daten der Permanent – Magnet – Motoren im *Maxwell 3D*. Für den Vergleich sind die Leistungsstufen 5,5, 15, 55, 90kW definiert.

Die Messe SPS in Nürnberg diente als umfangreiche Datenquelle für IEC Normmotoren. Ein Bericht im Anhang gibt einen vertieften Einblick in den heutigen Stand der Permanent – Magnet – Technik, mit dem Ziel magnetbestückten Rotoren optimal zu gestalten.

**In einem praktischen Teil** wird die Effizienz von sechs Motoren und von verschiedenen elektronischen Ansteuerungsverfahren, auf einem Prüfstand der *Fachhochschule Wallis*, untersucht. Drei Asynchronmotoren mit unterschiedlichen Effizienzklassen und drei Permanent – Magnet – Motoren im Leistungsbereich um 3kW sind einander gegenübergestellt. Geprüft wird ebenfalls die Möglichkeit, Permanent-Magnet-Motoren direkt am Netz zu betreiben.

Die gewonnenen Ergebnisse werden von *Circle Motor AG* im Kapitel 5 zu **marktbezogenen Aussagen** zusammengefasst, wie: ist eine generelle Grenze für Permanent – Magnet – Maschinen 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-Maschinen geeignet, wo sind sie nicht geeignet. Gibt es Vorzüge bei den Steuerungsprinzipien bezüglich Effizienz. Lassen sich aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen für Vereinbarungen mit der Industrie ableiten. Gibt es einfache kostengünstige Steuerungsverfahren für Permanent – Magnet – Motoren, für feste und verstellbare Drehzahlen, die Normmotoren > 1kW ersetzen können, mit den Vorteilen, wie Energieeinsparung, integrale Bauweise, Kompaktheit etc.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Theoretischer Teil. Erarbeitet durch die Fachhochschule Luzern

#### 4.1.1 Einführung

##### Theorie Motorenaufbau

Da ein Motor an sich ein sehr komplexes System darstellt, muss beim Bau auf die verschiedensten Details (elektrischer und mechanischer Art) geachtet werden. Dies in vollem Umfang hier durchzuführen, würde den Rahmen unserer Projektarbeit bei weitem übersteigen. Wir beschränken uns in unseren folgenden Ausführungen auf die uns als wichtig erscheinenden Details. Diese Sachverhalte sind nach bestimmten Kriterien ausgewählt. Alle ausgesuchten Kriterien sollen den Wirkungsgrad positiv beeinflussen und schliesslich das Ziel für einen energiesparenden Permanent-Magnet-Motor verfolgen.

Ein Kriterium festzulegen, welches den Wirkungsgrad anheben soll, macht nur Sinn, wenn es in der Simulation auch umgesetzt werden kann. Aus diesem Grund haben wir nur Parameter ausgewählt, welche mit unserem Motorensimulationsprogramm *Maxwell 3D* und *RMxprt* eingestellt werden können.

##### Konstruktiver Aufbau

Mit Ausnahme von Maschinen ganz kleiner Leistung ist bei Synchronmaschinen der Anker feststehend. Man bezeichnet ihn daher mit Ständer oder Stator. Der rotierende Teil (Läufer oder Rotor) besteht aus Polen, Feldwicklungen und der Welle. In unserem Fall, d.h. bei den Permanentmagnet-Motoren ist der Aufbau ähnlich einer Synchronmaschine. Jedoch sind auf dem Rotor keine Feldwicklungen untergebracht, sondern Dauermagnete. Der Rotor ist sozusagen immer magnetisch und er muss nicht mit Energie versorgt werden.

Im Folgenden reden wir von so genannten Innenläufern, da der Rotordurchmesser kleiner ist als der Statordurchmesser und so der Rotor innerhalb des Ständers rotieren kann. Andere Maschinen haben den Stator innen angeordnet. Die Pole auf dem Läufer rotieren dann auf einem grösseren Durchmesser um den Stator. Dadurch kann ein grösseres Schwungmoment erzeugt werden. Diese Bauart wird als Aussenläufer bezeichnet. Der prinzipielle Aufbau einer Maschine besteht somit grundsätzlich aus Stator und Rotor.

##### Stator

Der Statoraufbau von einer Synchronmaschine und einer Asynchronmaschine sind gleich. Somit auch der Aufbau unseres Permanentmagnetmotors. Bei unseren Simulationen verwenden wir genormte Statorbleche aus dem *Kienle+Spiess* Katalog [1]. Die Blechschnitte werden meistens aus Segmenten gestanzt.

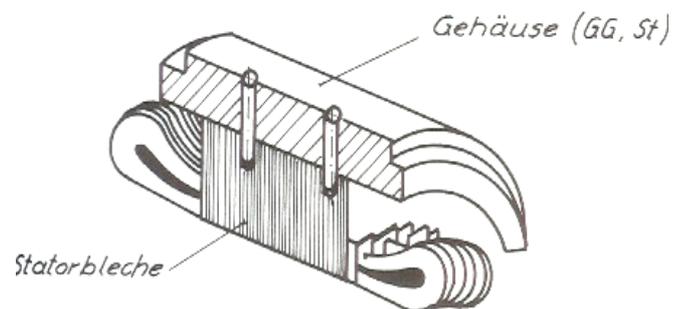


Abb. 1

Das Ständerpaket besteht somit aus der Schichtung dieser Bleche und kann in der Länge variiert werden. Durch die Schichtung oder in der Fachsprache auch Lamellierung genannt, können die Wirbelströme reduziert werden. Der lamellierte Eisenkörper wird bei kleineren Motoren direkt an das Gehäuse aus Gusseisen oder Walzstahl befestigt (Abb. 1). Bei kleineren Leistungen erhält der Eisenkörper keine Luftschlitze. Die Wärmeabfuhr erfolgt vom Stator über die Gehäuseausenwand an die Ausenluft. Dabei wird oft zur Vergrösserung der Kühloberfläche das Gehäuse mit Kühlrippen versehen.

Bei Maschinen grösserer Leistung ist zur Erreichung einer guten Kühlung die Aufteilung des Eisenkörpers in einzelne Blechpakete unerlässlich.

## Rotor

Der Rotor des Permanentmagnetmotors besteht aus einem Eisenkörper, welcher nicht zwingend geblecht werden muss, weil dort keine Wirbelströme entstehen. Aus dem *Kienle+Spiess* Katalog [1] sind keine definierten Rotorgeometrien vorhanden. Im Katalog sind lediglich die Blechschnitte des Stators für den Aufbau eines Asynchronmotors vorhanden. Deshalb kann der Rotordurchmesser in der Simulation variiert werden und dementsprechend verändert sich auch der Luftspalt. Dadurch können wir die Eisen- und Kupferverlustkurve ermitteln und so den optimalen Luftspalt jeder Maschine bestimmen.

Auf dem Rotor werden die Permanentmagnete angebracht. Neben den herkömmlichen *ALNICO* Magneten und den Hartferritmagneten sind besonders die so genannten Hochenergiemagnete oder auch Seltenerd magnete von grosser Bedeutung. Neben den kleinen Abmessungen, bei welchen diese immer noch ein hohes Energieprodukt aufweisen, stechen auch ihre hervorragenden Koerzitivfeldstärken und ihre hohen Remanenzen ins Auge. Diese sind ein Mehrfaches der Werte anderer Werkstoffe. Daher sind diese Materialien sehr entmagnetisierungssicher. Durch das hohe Energieprodukt können die Motoren, in welche die Magnete eingebaut werden, entsprechend klein gebaut werden.

Auch ändern sich die Materialeigenschaften kaum mit der Temperatur, was ein besonderer Vorteil für den Einbau in Motoren ist. Für weitere Erläuterungen bezüglich der Magnete verweisen wir auf den „Anhang A: Magnetwerkstoff-Technologie“.

Bezüglich der Anordnung der Magnete auf dem Rotor sind verschiedene Varianten möglich. Folgende Anordnungen, welche unten abgebildet sind, können im Simulationsprogramm *RMxprt* eingestellt werden. Darin sind die Magnete auf dem Rotor rot markiert. Für die Simulation verwenden wir den Magnetwerkstoff *NdFeB\_35* aus der Werkstoffbibliothek der *RMxprt* Software.

In unseren Simulationsversuchen in Kap. 4.1.3 verwenden wir stets die Rotorgeometrie nach Abb. 3 da diese in Bezug auf die Konstruktion am wenigsten Aufwand mit sich bringt.

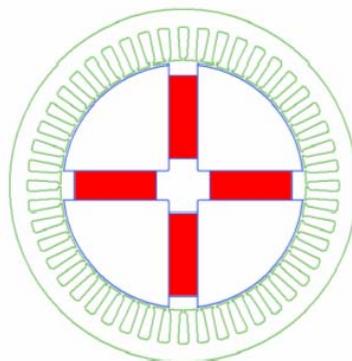


Abb. 2

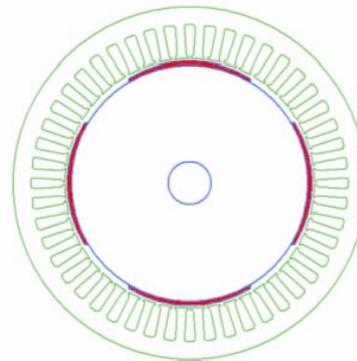


Abb. 3

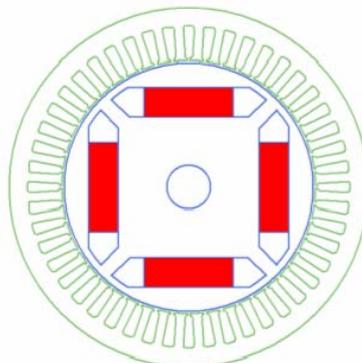


Abb. 4

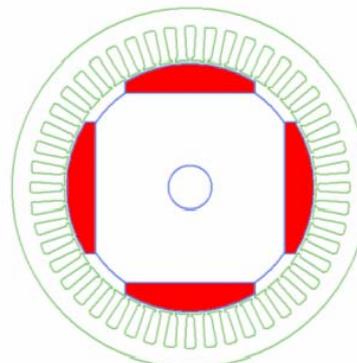
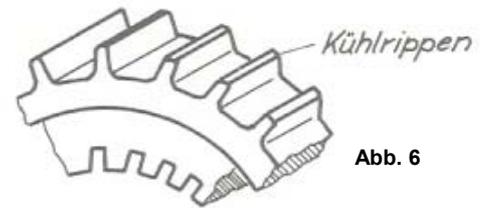


Abb. 5

## Kühlung

In den Wicklungen und im Eisenjoch elektrischer Maschinen entstehen Wärmeverluste. Energieeffizienz bedeutet nun diese Verluste zu minimieren. Bei kleineren Leistungen und je nach Betriebsart ist eine Kühlung nicht notwendig, wenn die Wärme gut an die Umgebung abgegeben werden kann. Bei grösseren Leistungen und je nach Bedürfnissen ist

eine gute Kühlung unerlässlich. Durch eine gute Kühlung ist es möglich, Maschinen bei gleicher Leistung kleiner zu bauen oder ihre Leistung bei gleicher Baugrösse zu erhöhen. In der Praxis unterscheidet man folgende Kühlungsarten (Abb. 7), auf welche wir hier nicht in die Details gehen wollen, da wir bei unserer Simulationsmotoren keine Kühlung vorgesehen haben:



### Selbstkühlung:

Die Selbstkühlung trifft auf Maschinen ohne Lüfter zu. Die Verlustwärme wird durch Abstrahlung und Luftbewegung abgeführt. Kleinmotoren arbeiten meist mit Selbstkühlung. Durch den offenen Einbau des Motors im Gehäuse verursacht die Läuferdrehung eine ausreichende Luftbewegung. Somit ist die Kühlung auch abhängig von der Drehzahl des Motors.

### Eigenkühlung:

Eigenkühlung haben Motoren, deren Lüfter am Rotor angebracht sind oder durch diesen angetrieben werden. Die Kühlung kann durch Innenkühlung oder Oberflächenkühlung erfolgen. Bei Innenkühlung wird die Wärme im Motor an die durchströmende Luft abgegeben. Der Lüfter ist innerhalb des Gehäuses am Rotor befestigt. Bei der Oberflächenkühlung befindet sich das Lüfterrad ausserhalb des Motorraumes und bläst die Kühlluft über die mit Kühlrippen versehene Gehäuseoberfläche (Abb. 6).

### Fremdkühlung:

Fremdkühlung haben Motoren mit einem von der Läuferdrehzahl unabhängigen Antrieb für die Kühlmittelbewegung, zum Beispiel einen Lüftermotor. Fremdkühlung benötigen vor allem drehzahlgesteuerte Motoren, die bei Vollast mit kleinen Drehzahlen betrieben werden oder die Kühlluft nicht der Umgebung entnehmen können.

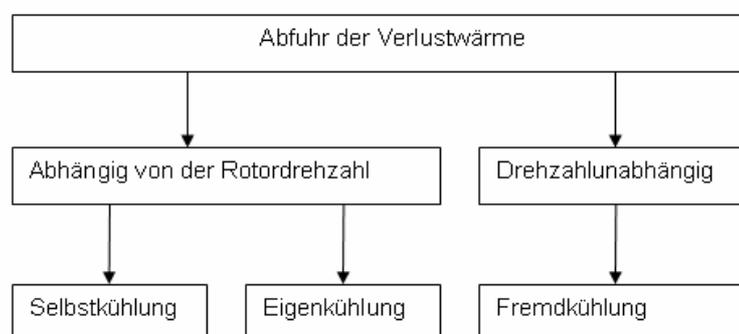


Abb. 7

## Bewicklung

Der Anker einer Maschine trägt eine in Nuten untergebrachte, am Umfang verteilte Wicklung, die aus einzelnen Spulen besteht. Eine Spule kann eine oder mehrere Windungen haben, die Spulenseite dementsprechend einen oder mehrere Leiter. Als Spulenseite bezeichnet man die Teile einer Spule, welche innerhalb einer Nute liegen. Wicklungen mit einem Leiter pro Spulenseite nennt man Stabwicklungen. Wicklungen mit mehreren Leitern pro Spulenseite bezeichnet man als Spulenwicklungen. Besteht eine Windung oder ein Leiter aus mehreren parallelen Drähten, so ist dies für die Spannungserzeugung und den Entwurf der Wicklung ohne Bedeutung.

Es wird unterschieden zwischen Durchmesserwicklung (Abb. 8) und gesehnter Wicklung (Abb. 9). Dazu ist der Begriff der mittleren Spulenseite  $w$  wichtig. Die mittlere Spulenseite  $w$  entspricht dem Abstand zwischen den Mitten zweier Zonen von entgegengesetztem Vorzeichen. Das heisst, wenn man die Maschine von oben betrachtet, einerseits dort wo der Strom in die Maschine hineinfliesst und andererseits dort wo der Strom aus der Maschine hinausfliesst. Die Zonen müssen jedoch der gleichen Phase angehören. Ist die mittlere Spulenweite gleich der Polteilung  $\tau_p$ , so handelt es sich um eine Durchmesserwicklung. Mit der Polteilung ist der Abstand vom Zentrum des einen Pols (positiv) zum Zentrum des benachbarten Pols (negativ) gemeint. Ist die mittlere Spulenweite  $w$  kleiner oder grösser als die Polteilung  $\tau_p$ , so handelt es sich um eine gesehnte Wicklung.

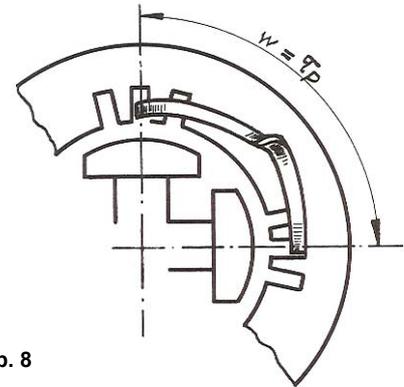


Abb. 8

*Durchmesserwicklung*

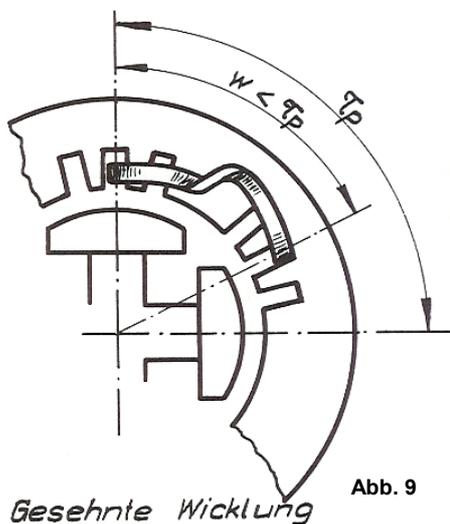


Abb. 9

*Gesehnte Wicklung*

Der Unterschied zwischen einer Durchmesserwicklung und einer gesehnten Wicklung ist in den Abb. 8 und 9 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Zweischichtwicklung, bei der die mittlere Spulenweite gleich ist der Distanz zwischen den Spulenseiten einer Spule.

Durch die Sehnung der Wicklung wird eine weitgehende Angleichung der Form der induzierten Spannungskurve an die Sinusform erreicht, denn durch die Sehnung werden die Oberwellen viel stärker geschwächt als die Grundwelle. Infolge der Sehnung ist der von der Spule umfasste Fluss kleiner als bei einer Durchmesserwicklung und somit wird auch die induzierte Spannung reduziert, was durch den Sehnungsfaktor  $k_p$  ausgedrückt wird. Um eine nicht zu grosse Einbusse an Spannung zu erhalten, sollte die Sehnung nicht über 25% betragen.

## Ganzlochwicklung:

Von einer Ganzlochwicklung spricht man, wenn die Anzahl der bewickelten Nuten pro Pol und Phase  $q$  eine ganze Zahl ist ( $q = 2, 3, 4, 5, \dots$ )

### **Bruchlochwicklung:**

Ist  $q$  eine gebrochene Zahl, so handelt es sich um eine Bruchlochwicklung. Bruchlochwicklungen werden bei kleinem  $q$  angewendet (Vorteil nur bei Zweischichtwicklungen), um eine Spannungskurve zu erreichen, die nur wenig von der Sinusform abweicht. ( $q = 1 \frac{1}{2}, 2 \frac{1}{2}, 3 \frac{1}{2}, \dots$ )

### **Wicklungsberechnung**

Für die Berechnung der Wicklung der untersuchten Maschinen führen wir folgende Formel und Bezeichnungen ein. Diese stammen aus dem Buch „Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer [2]“.

Allgemeine Formel: 
$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m}$$

Für die Formel bezeichnen wird allgemein mit  $q$  die Anzahl der bewickelten Nuten pro Pol und Phase und mit  $q'$  die gesamten Nuten pro Pol und Phase. Bei einer Einphasenwicklung ist  $q$  und  $q'$  verschieden, weil darin nicht alle Nuten bewickelt werden. Bei einer Dreiphasenwicklung ist jedoch  $q = q'$ , weil darin alle Nuten bewickelt werden. In den weiteren Ausführungen verwenden wir den Buchstaben  $q$ , da in unseren Simulationen nur Dreiphasenwicklungen zum Einsatz kommen.

$q'$  = gesamte Anzahl Nuten pro Pol und Phase

$q$  = Anzahl der bewickelten Nuten pro Pol und Phase

$Q$  = totale Nutenzahl

$p$  = Polpaare

$m$  = Phasenzahl

### **Wicklungsarten**

Bezüglich der Zahl und Anordnung der Spulenseiten, die in einer Nute liegen, unterscheidet man zwei Hauptgruppen von Wicklungen:

- Einschichtwicklung
- Zweischichtwicklung

Soll in eine Wicklung eine bestimmte Spannung induziert werden, so sind bei einer Einschichtwicklung nur halb so viele Spulen notwendig als bei einer Zweischichtwicklung. Dafür müssen aber die Spulen der Einschichtwicklung die doppelte Anzahl Windungen aufweisen.

### **Einschichtwicklung**

Normale Einschichtwicklungen haben pro Nute nur eine Spulenseite. Dies gilt für Spulen- und für Stabwicklungen (Abb. 10). Stabwicklungen nennt man Wicklungen, welche einen Leiter pro Spulenseite aufweisen. Daneben gibt es die Spulenwicklungen, bei denen mehrere Leiter pro Spulenseite vorhanden sind.

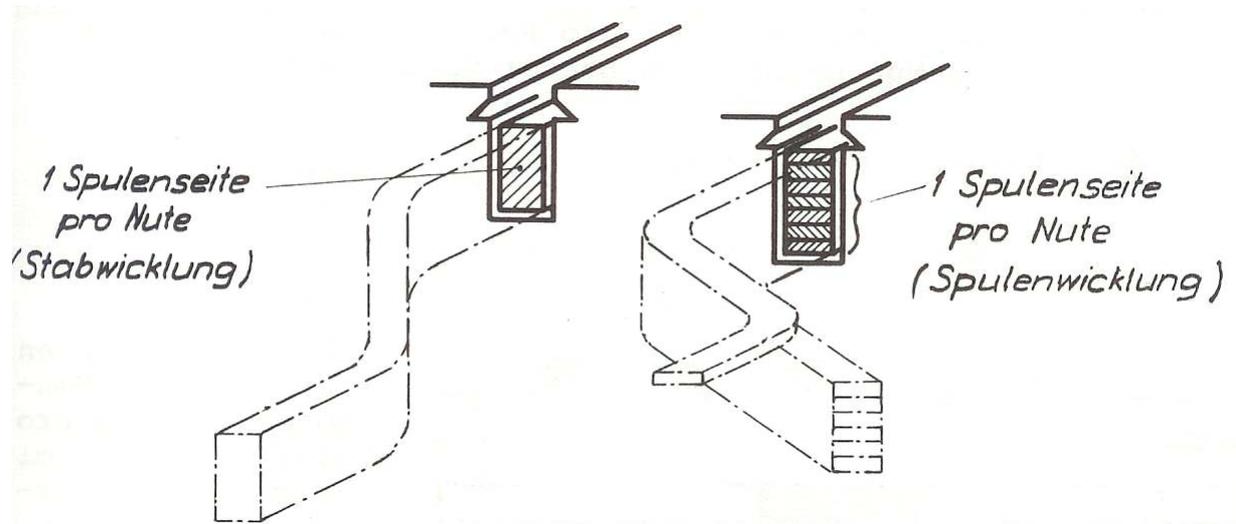


Abb. 10

### Zweischichtwicklungen

Bei der Zweischichtwicklung (Abb. 11 und 12) liegen in der Nut zwei Spulenseiten übereinander. Jede Spulenseite nimmt nur die Hälfte des nutzbaren Nutenraumes ein. Eine Spulenseite einer Spule nimmt in der Nute die Oberschicht ein, während die andere Spulenseite in der zugehörigen Nute die Unterschicht belegt. Der Abstand der Spulenseiten voneinander ist bei allen Spulen gleich. Damit weisen alle Spulen die gleiche Form auf und es stimmt daher bei der Zweischichtwicklung die mittlere Spulenweite  $w$  mit der Weite einer Spule überein.

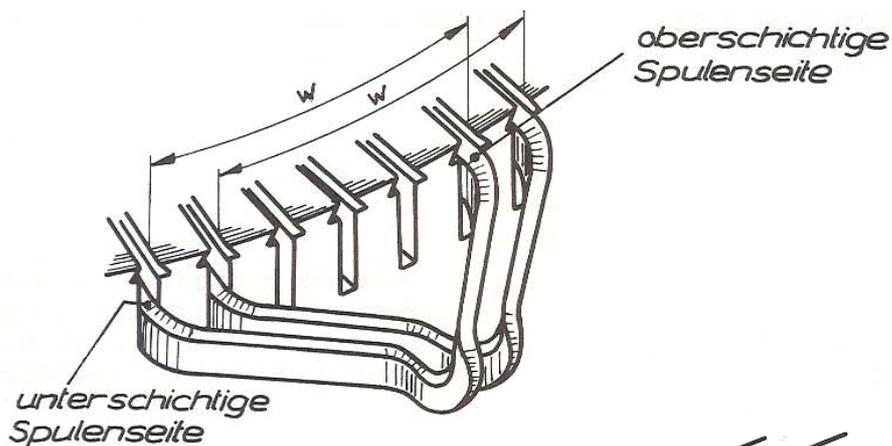


Abb. 11

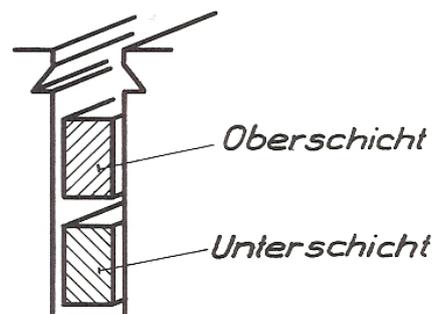


Abb. 12

## Vor- und Nachteile von Einschicht- und Zweischichtwicklungen

Die Zweischichtwicklung weist gegenüber der Einschichtwicklung gewisse Vorteile auf:

- Da die Spulen alle die gleiche Form haben, ist die Fabrikation einfacher (weniger Schablonen). Dies ist aus der Abb. 13 ersichtlich.
- Die Kühlverhältnisse, falls nötig, sind bei richtiger Auslegung des Wickelkopfes günstiger (kleinere Cu-Querschnitte möglich).
- Die Zweischichtwicklungen können mit beliebiger Sehnung (Schrittverkürzung) ausgeführt werden, was bei Einschichtwicklungen nicht ohne weiteres möglich ist.
- Geringere Streuung, da die Wickelköpfe kürzer sind.

Als Nachteil kann sich die schwierige Austauschbarkeit der Spulen auswirken.

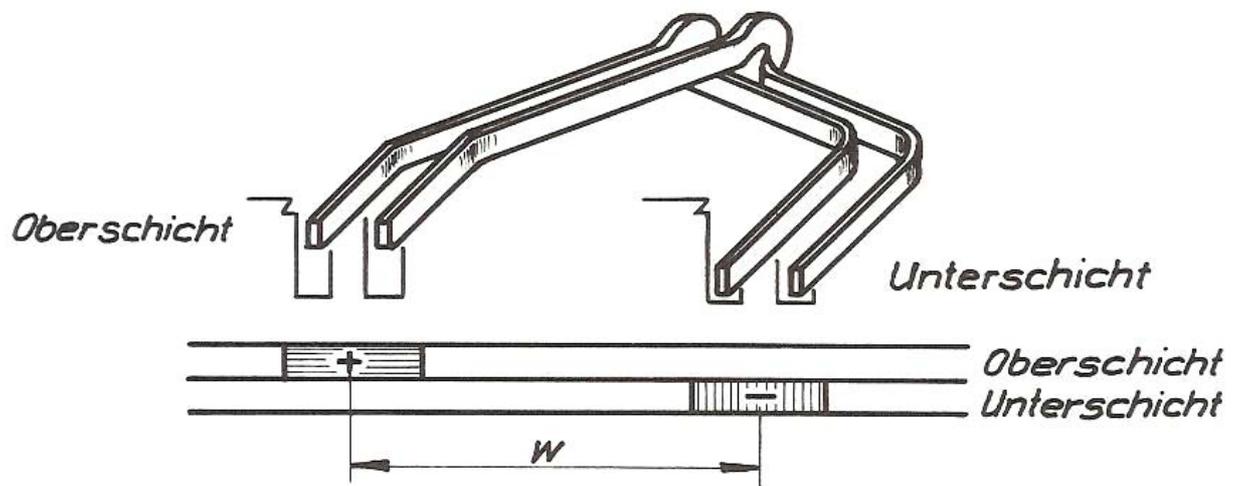


Abb. 13

### Dreiphasenwicklung

Für unsere Simulationen verwenden wir Dreiphasenwicklungen, welche durch eine geeignete Schaltung angesteuert werden. Die Steuerung ist aber nicht Gegenstand unserer Projektarbeit. Bei einer dreiphasigen Wicklung werden alle Nuten bewickelt, d.h. eine Polteilung muss Spulenseiten aller drei Phasen enthalten. Als anschauliches Beispiel sei hier auf die 4 Pol-Maschine in Abb. 14 verwiesen. Bei dieser Maschine wird eine Dreiphasen-Ganzloch-Zweischichtwicklung verwendet. Der Stator der Maschine hat eine totale Nutenzahl von  $Q = 36$ . Die Polpaarzahl beträgt  $p = 2$ . Somit ergibt sich nach der Berechnung:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

Dieser Sachverhalt ist in Abb.14 sehr schön ersichtlich. Darin wird für die bessere Übersicht nur eine Phasenwicklung angezeigt. Der Strom der einzelnen Leiter fließt von A nach -A, von B nach -B und von C nach -C. Das Minuszeichen bezeichnet immer den In-Slot, also dort wo der Strom hineinfließt (Referenzrichtung) und dementsprechend der Buchstabe ohne Vorzeichen bedeutet + und somit der Out-Slot, dort wo der Strom hinausfließt.

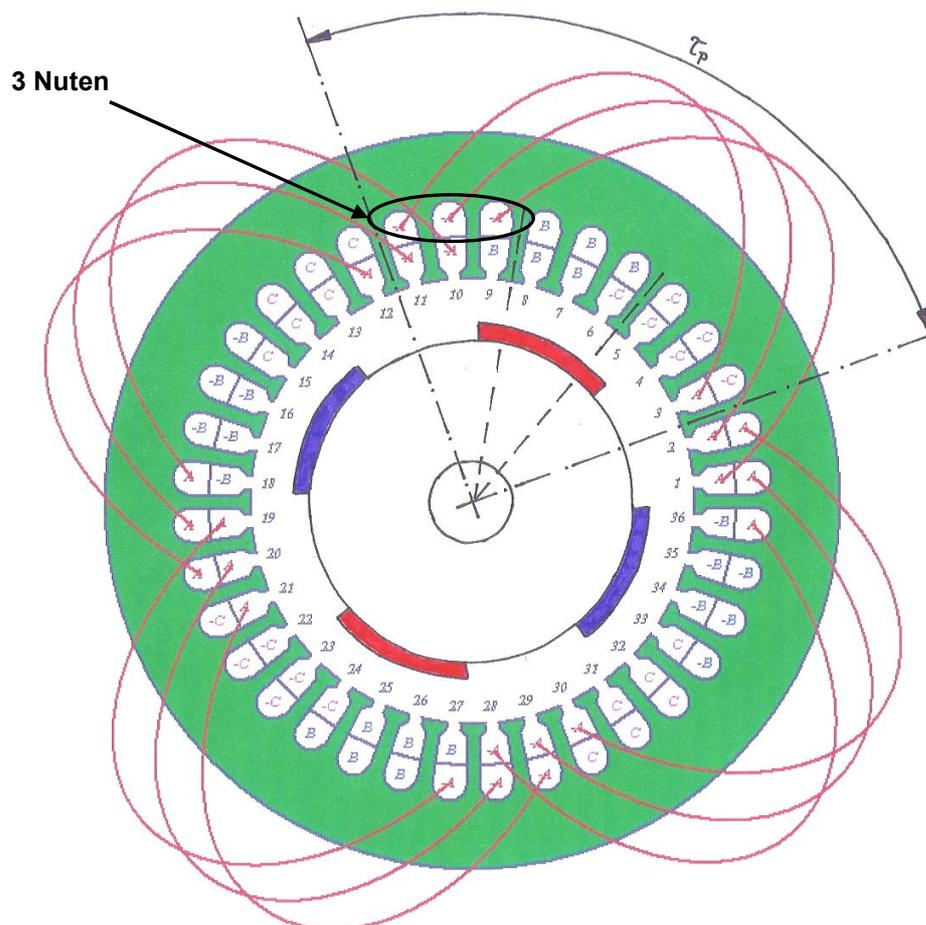


Abb. 14

## Einphasenwicklung

Um den Theorieteil der Bewicklung vollständig zu gestalten, sei hier auch die Einphasenwicklung aufgeführt, welche bei unseren Simulationen aber nicht im Vordergrund steht. Als anschauliches Beispiel sie hier auf die Abb. 15 verwiesen. Darin ist eine 4 Pol-Synchronmaschine abgebildet. In den Stator dieser Einphasen-Maschine wird eine Einschichtwicklung mit  $q = 4$  Nuten/Pol eingebaut. Die Maschine ist 4 polig ( $p = 2$ ) und es werden nur  $2/3$  aller Nuten bewickelt. Durch diese Bewicklung von nur  $2/3$  wird der Wickelfaktor  $k_w$  bei Einphasenwicklungen kleiner. Würde man voll bewickeln, so wäre die induzierte Spannung grösser gegenüber einer nur zu  $2/3$  bewickelten Einphasenwicklung. Die volle Bewicklung würde aber viel mehr Kupfer benötigen und dadurch natürlich auch mehr Isolation. Als Folge steigen die Kupferverluste und somit verschlechtert sich der Wirkungsgrad. Die Anzahl Nuten pro Pol und Phase ergibt sich somit  $q' = 6$ , da die totale Nutenzahl pro Pol 6 beträgt. Nach der bekannten Berechnung folgt nun:

$$q' = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \rightarrow Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q' \rightarrow \underline{\underline{Q = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 6 = 24 \text{Nuten}}}$$

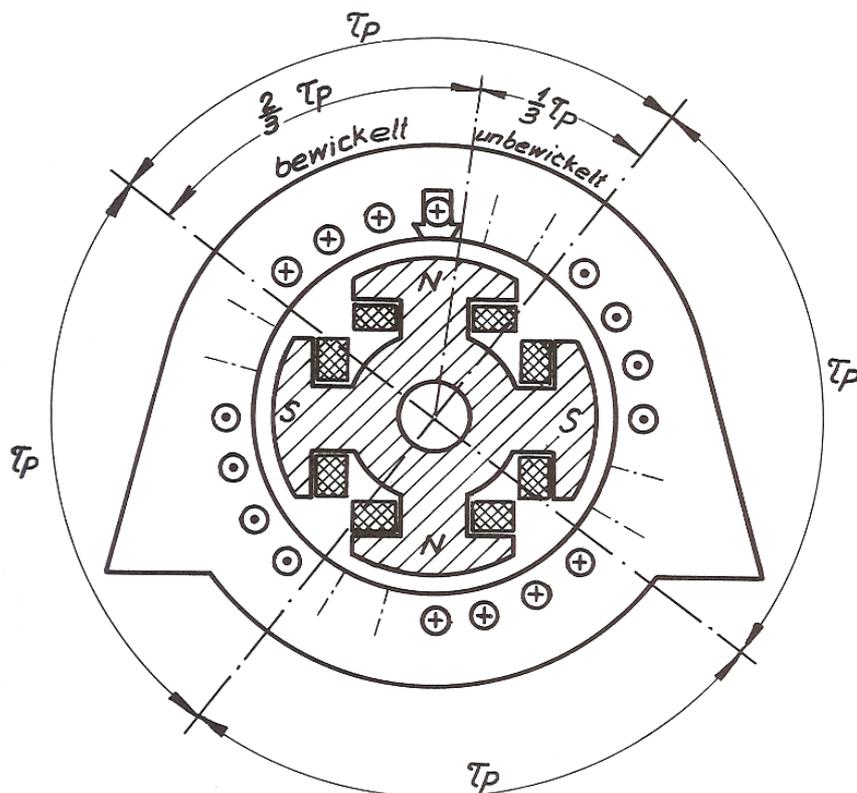


Abb. 15

Anmerkung: Das Kreuz bedeutet hier, dass die Referenzrichtung des Stromes in die Blattebene hineinzeigt und der Punkt, dass dort der Strom aus der Blattebene herausfließt. Dies ist eine andere Schreibweise zu den + und – bei der Dreiphasenwicklung. Das + bedeutet somit ein Punkt und das – ein Kreuz.

## Begriffe der Bewicklung

### Füllfaktor

Der Füllfaktor einer Maschine bezieht sich auf die Nut des Stators oder des Rotors. Bei unserem Permanentmagnetmotor ist natürlich nur der Stator massgebend, da auf dem Rotor keine Nuten vorhanden sind. Auf dem Rotor sind die Permanentmagnete angeordnet.

Der Füllfaktor bezeichnet das Verhältnis der effektiven Querschnittfläche der Kupferleiter zur Querschnittfläche der Nut.

In der Praxis wird ein möglichst hoher Füllfaktor angestrebt. Dazu kommt, dass man bestrebt ist die Nuten möglichst klein zu bemessen, da dadurch mehr Eisen vorhanden ist und es weniger schnell zur Sättigung kommt. Durch den Füllfaktor werden somit auch unterschiedliche Querschnitte erreicht, welche ausschlaggebend für den zulässigen Strom sind.

### Wicklungsfaktor $k_w$

Der Wicklungsfaktor gibt den Einfluss der Verteilung und Sehnung der Spulen auf die in der Wicklung erzeugte Spannung an. Dabei wird die Verteilung der Spulen in einzelne Nuten am Ankerumfang durch den Zonfaktor  $k_d$ , und die Sehnung der Spulen durch den Sehnungsfaktor  $k_p$  berücksichtigt.  $k_w$  ist daher das Produkt aus zwei Faktoren:

$$k_w = k_d \cdot k_p$$

Für weiterführende Erklärungen, sowie die Begriffe des Zonenfaktors und des Sehnungsfaktors, verweisen wir hier auf das Buch „*Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer [2]*“.

### Leiterisolierung

Die Wicklung des Permanentmagnetmotors darf als Niederspannungswicklung bezeichnet werden, da diese sich im Bereich von unter 1000 V bewegt.

Als Leiter werden in der Herstellung Rund- und Flachdrähte verwendet. Der Isolationsauftrag richtet sich nach der Spannung von Leiter zu Leiter und muss vor allem neben der Isolierfähigkeit auch eine genügende mechanische und thermische Festigkeit aufweisen. Als Isoliermaterial kommen Lack, Seide, Baumwolle oder Glasseide in Frage.

Für den Isolierauftrag (Durchmesserzunahme) für Runddrähte sind folgende Mittelwerte üblich:

- Lack (einfach isoliert) 0.05 mm
- Lack (doppelt isoliert) 0.01 mm
- Seide (umspinnen) 0.05 mm
- Baumwolle (umspinnen) 0.18 mm
- Glasseide (Silikonharz isoliert) 0.12 – 0.25 mm

Für den Isolationsauftrag (beidseitig) für umspinnene Flachdrähte werden folgende Werte verwendet:

- Baumwolle (einfach) 0.35 mm
- Glasseide (mit Silikonharz) 0.25 mm
- Glasband (überlappt) 0.5 mm
- Lack 0.1 – 0.4 mm
- 

Für unsere Simulationen verwenden wir einen Isolationsauftrag für Runddrähte von 0.2 mm.

## 4.1.2 Simulationsprogramm *Maxwell 3D* und *RMxpirt*

### MAXWELL 3D



*Maxwell 3D* ist eine Industriesoftware für die Simulation von elektromagnetischen Feldern. Mit Hilfe dieser Software ist es möglich das Verhalten verschiedener elektromechanischer und elektromagnetischer Komponenten in einer virtuellen Umgebung zu simulieren. Dadurch können Kosten für real hergestellte Prototypen gespart werden 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 *RMxpirt* Tool.

Mit dem *Maxwell 3D* sind folgende Analysen möglich:

- **3D Transient**

Die transiente Analyse simuliert lineare und rotierende Bewegungen. Hier können auch integrierte Schemas für die Ansteuerung des Motors eingefügt werden. Als Resultate können Feldvisualisierungen, magnetische Flüsse oder auch Verluste angezeigt werden.

- **3D AC Magnetic**

Bei dieser Berechnungsart werden vor allem Effekte wie Wirbelströme oder Skineffekte analysiert. Die Software simuliert Wirbelströme in Transformatoren, Windungen oder Sensoren. Auch hier sind Resultate wie Verluste verfügbar, des Weiteren aber auch Impedanzen, Kräfte oder Drehmomente.

- **3D DC Magnetic**

Die DC Magnetic Analyse löst vor allem statische Magnetfelder, welche in Sensoren oder Permanentmagneten vorkommen. Des Weiteren kann der Entmagnetisierungspunkt berechnet werden. Als Quellen können hier Spannungen, externe Felder, DC-Ströme oder auch Permanentmagnete definiert werden.

- **3D Electrostatic Field**

Hier werden elektrostatische Felder simuliert, welche in Hochspannungsisolatoren oder Stromunterbrecher vorkommen.

### RMXPRT



*RMxpirt* 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 Templates können bestehende Motorentypen einfach abgeändert werden, um schnell einen fertigen Motor zu generieren (Abb. 16).

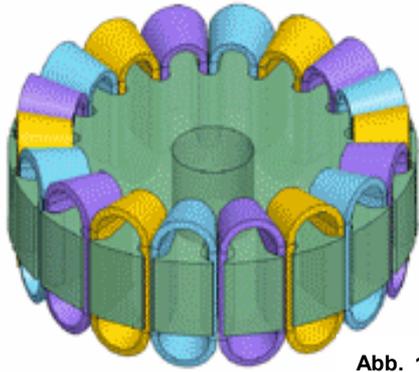


Abb. 16

Der fertig konstruierte Motor kann anschliessend mittels Eingabe von Vorgaben (Setup), wie Leistung, Spannung oder auch Drehzahl berechnet werden. Die Resultate werden dann auf einem Datenblatt zusammengefasst ausgegeben. Des Weiteren können Diagramme ausgedruckt werden.

Als weiteren Vorteil sei hier erwähnt, dass man den definierten Motor im *RMxprt* sehr einfach in das *Maxwell 3D* Programm exportieren kann. Der definierte Motor aus dem *RMxprt* zeigt sich danach in der 3D-Ansicht im *Maxwell*, wie es auf der folgenden Seite ersichtlich ist. Dort können dann weitere Berechnungen wie Flussdichten oder magnetische Feldstärken angezeigt werden.

Die folgende Grafik (Abb. 17) zeigt die vordefinierte Motorenpalette von *RMxprt*.

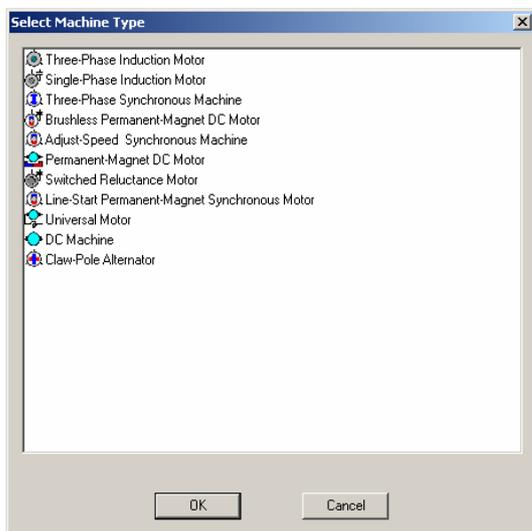


Abb. 17

Für unsere Simulationsreihe verwenden wir den Motorentyp „Brushless Permanent-Magnet DC Motor“.

### 3D-Ansichten im Maxwell 3D

Aus Abb. 18 sind die verschiedenen Ansichten eines 6-poligen Permanentmagnetmotors sehr schön ersichtlich. Darin kommt auch die Zweischichtwicklung gut zum Ausdruck. Des Weiteren können so genannte Layer ausgeschaltet werden, um nur den interessierenden Teil zu begutachten. Die Pole zum Beispiel sind hier mit den Farben gelb und blau angedeutet.

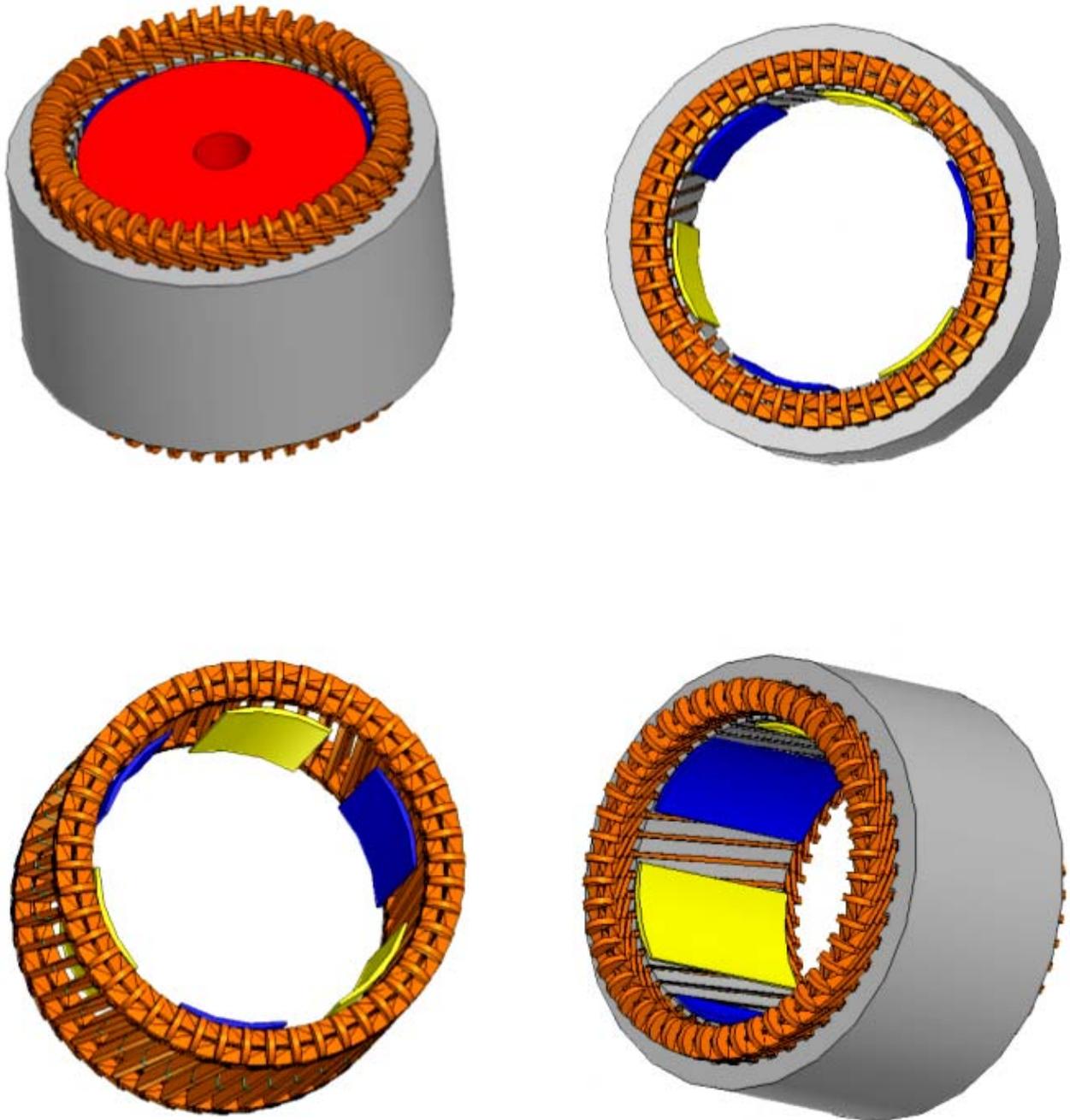


Abb. 18

## Massnahmen zur Optimierung des Wirkungsgrades

Im Folgenden sind grundsätzliche Massnahmen zur Optimierung des Wirkungsgrades beschrieben. Gewisse Berechnungen wurden aus der Vorlesung (*Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer [2]*) entnommen und auf unsere Anwendungen hin angepasst.

### Magnetgeometrie

Ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion von Synchronmaschinen sind die Rotorpole. Dabei sollten die Magnetpole auf dem Rotor so optimiert werden, damit das Luftspaltfeld möglichst sinusförmig wird. Dies ist aus der Theorie (*Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer [2]*) bekannt. Der Luftspalt an der Polkante  $l_K$  muss dazu nahezu doppelt so gross sein wie der Luftspalt auf der Polachse  $l_L$ . Dies geht aus der folgenden Berechnung hervor.

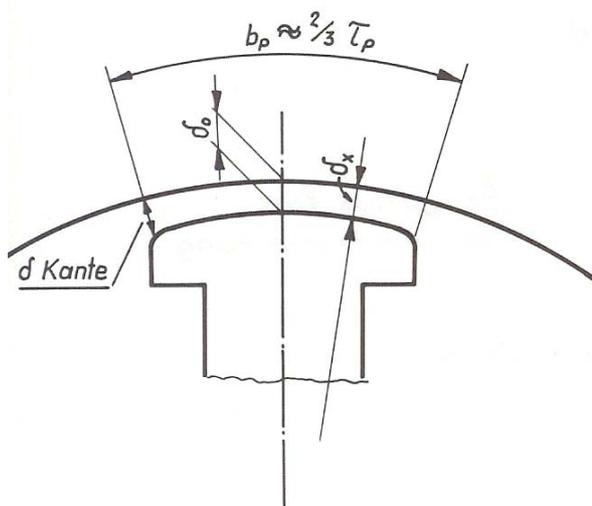


Abb. 19

$T_p$ : Polteilung

$b_p$ : Polbogen

$\delta_0$ : Luftspalt Polachse  $l_L$

$\delta_K$ : Luftspalt Polkante  $l_K$

Das Verhältnis wird in der Theorie als optimal bezeichnet, wenn gilt:

$$0.63 \leq \frac{b_p}{T_p} \leq 0.7$$

$$\delta_K = \delta_0 \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{3} \tau_p\right)} = \delta_0 \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 2 \cdot \delta_0$$

Damit wir diesen Sachverhalt in *RMxppt* einstellen können, müssen einige Überlegungen angestellt werden. Im *RMxppt* kann der Innendurchmesser des Stators, die Länge des Luftspaltes durch die Variation des Rotordurchmessers und die Anzahl Pole des Rotors eingestellt werden. Aus diesen Grössen soll im Folgenden eine Formel hergeleitet werden, bei welcher man diese drei Grössen eingeben kann und danach der optimale *Offset*  $a$  für die Polkante berechnet wird. Die Abb. 19 zeigt den Zusammenhang dieser Parameter zum *Offset*  $a$ .

Aus dem Bild ist ersichtlich, dass zwei Ausdrücke für die Berechnungen massgebend sind. Im Folgenden betrachten wir die Ausdrücke (1) und (3) (auf der nächsten Seite). Ausdruck (1) ist der Kosinussatz und Ausdruck (3) der Rotordurchmesser inklusive den angebrachten Magneten minus den gesuchten *Offset* a. Durch den *Offset* wird ein neuer Radius definiert, welcher den neuen Kreis für die „Abflachung“ an den Magneten erzeugt. Zur Veranschaulichung sei hier noch der Motor gezeigt (Abb. 21). Der benötigte Winkel  $\alpha$ , sowie die Polteilung  $T_p$  und der Polbogen  $b_p$  sind darin gut ersichtlich. Des Weiteren ist auch die Bewicklung des Stators angedeutet, welche aber nicht Gegenstand der folgenden Berechnung ist.

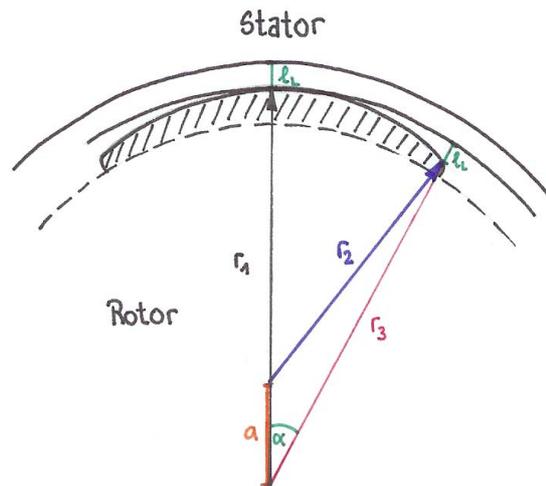


Abb. 20

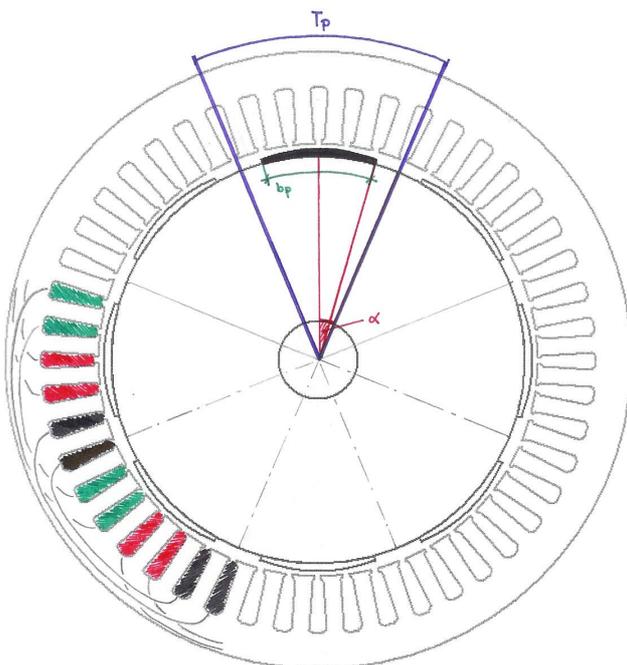


Abb. 21

Stator mit 48 Nuten für die Bewicklung und 8 Magnetpole auf dem Rotor. Aus der Theorie ist auch hier bekannt:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

Darin sind:

- q = Anzahl Nuten/Pol und Phase
- Q = Totale Nutenzahl
- p = Polpaare
- m = Phasenzahl

### Formelherleitung

→ Diese Berechnungen nehmen Bezug auf die Abbildungen 20 und 21:

$$r_2^2 = a^2 + r_3^2 - 2 \cdot a \cdot r_3 \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

→ umgeformt

$$a = r_3 \cdot \cos(\alpha) - \sqrt{r_2^2 - r_3^2 \cdot (\sin(\alpha))^2} \quad (2)$$

→ für  $r_2$  definieren wir

$$r_2 = r_1 - a \quad (3)$$

→ (3) eingesetzt in (2) und nach a aufgelöst

$$a = \frac{-(r_1^2 - r_3^2)}{2 \cdot (r_3 \cdot \cos(\alpha) - r_1)} \quad (4)$$

→ Für  $r_1$  definieren wir

$$r_1 = \frac{d_{st} - 2 \cdot l_L}{2} \quad (5)$$

→ Für  $r_3$  definieren wir

$$r_3 = r_1 - l_L$$

$$r_3 = \frac{d_{st} - 2 \cdot l_L}{2} - l_L = \frac{d_{st}}{2} - 2 \cdot l_L \quad (6)$$

→ Das Verhältnis Magnetdicke zu Luftspalt definieren wir mit dem Faktor f

$$f = \frac{l_M}{l_L} \quad (7)$$

→ Das Verhältnis Polbogen  $b_p$  zu Polteilung  $T_p$  definieren wir mit dem Faktor  $f_p$

$$f_p = \frac{b_p}{T_p} \quad (8)$$

→ Den Winkel  $\alpha$  definieren wir mit

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p_A} \cdot f_p \cdot \frac{1}{2} = \frac{180^\circ}{p_A} \cdot f_p \quad (9)$$

→ (5), (6) und (9) werden nun in (4) eingesetzt

$$a = \frac{-\left[\left(\frac{d_{st} - 2 \cdot l_L}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{st}}{2} - 2 \cdot l_L\right)^2\right]}{2 \cdot \left[\left(\frac{d_{st}}{2} - 2 \cdot l_L\right) \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{p_A} \cdot f_p\right) - \left(\frac{d_{st} - 2 \cdot l_L}{2}\right)\right]} \quad (10)$$

→ vereinfacht

$$a = \frac{-(d_{st} - 3 \cdot l_L) \cdot l_L}{d_{st} \cdot \left(\cos\left(\frac{180^\circ \cdot f_p}{p_A}\right) - 1\right) - 2 \cdot l_L \cdot \left(2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ \cdot f_p}{p_A}\right) - 1\right)} \quad (11)$$

→ Daraus folgt für den *Offset* a

$$a = \frac{3 \cdot l_L^2 - d_{st} \cdot l_L}{d_{st} \cdot \left(\cos\left(\frac{180^\circ \cdot f_p}{p_A}\right) - 1\right) - l_L \cdot \left(4 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ \cdot f_p}{p_A}\right) + 2\right)} \quad (12)$$

→ Bezeichnungen:

$a$ :	Offset
$f_p$ :	Faktor Polteilung
$b_p$ :	Polbogen
$T_p$ :	Polteilung
$d_{st}$ :	Statorinnendurchmesser
$p_A$ :	Anzahl Pole
$l_L$ :	Luftspatlänge
$l_M$ :	Magnetdicke

## Simulation

Um den Einfluss der Magnetgeometrie auf den Wirkungsgrad zu zeigen, haben wir eine Simulation durchgeführt. Die Simulation umfasst zwei Teile.

Im ersten Abschnitt zeigen wir, wie diese Massnahme den Wirkungsgrad beeinflusst. Zudem wird der Luftspalt variiert. Somit wird der Wirkungsgrad in Funktion der Luftspaltbreite dargestellt und dies bei verschiedenen Magnetanordnungen.

Der zweite Teil zeigt die Feldsimulation der verschiedenen Magnetgeometrien. Durch diese Massnahme können hohe Flussdichten, welche zusätzliche Eisenverluste verursachen, lokalisiert und durch eine geeignete Magnetgeometrie minimiert werden.

## Auswirkung der Magnetgeometrie auf den Wirkungsgrad

Um den Einfluss der „Magnetabflachung“ auf dem Rotor in Bezug auf den Wirkungsgrad zu zeigen, werden im Folgenden zwei Simulationen durchgeführt. Damit wird gezeigt, dass mit einer optimalen „Abflachung“ des Magneten bessere Wirkungsgrade für Permanentmagnetmotoren erreicht werden.

Der Luftspalt wird zwischen 0.1 bis 2.3 mm variiert. Der Wirkungsgrad wird anhand der Simulation mit *RMxpvt* in Funktion des Luftspaltes grafisch dargestellt.

Folgende Maschinenparameter bleiben während der Simulation konstant:

- Statorinnendurchmesser  $d_{st} = 140$  mm
- Rotorausendurchmesser  $d_r = 130$  mm
- Magnetdicke  $l_M = 2.5$  mm
- Anzahl Pole = 6
- Wellenleistung = 5.5 kW

Im Simulationsprogramm *RMxpvt* kann die erwähnte Abflachung des Magneten gegen Aussen eingestellt werden. Dieser Parameter wird auch im Programm als *Offset* bezeichnet und Abb. 22).

Der Parameter *Embrace* bezeichnet die Verteilung der Magnete über dem Rotor. Er kann zwischen 0 bis 1 variiert werden (Abb.23).

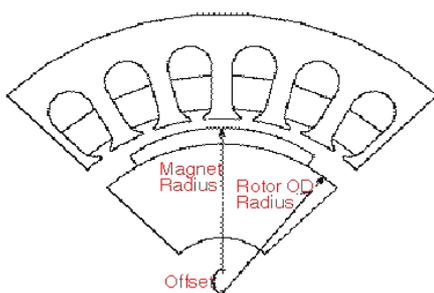


Abb. 22

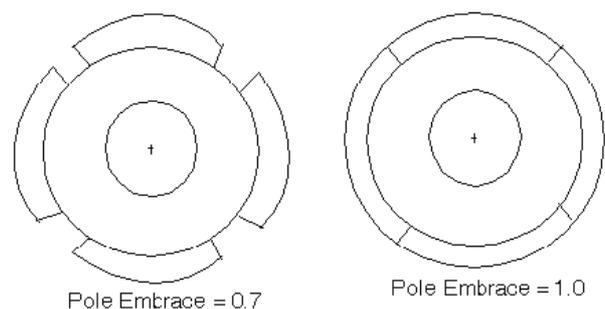


Abb. 23

Diese beiden Parameter haben Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der Maschine. Aus diesem Grunde wurden die folgenden Simulationen mit verschiedenen Einstellungen vorgenommen um eine Vorstellung zu erhalten, wie diese Parameterwerte einzustellen sind.

## Simulationsversuch 1

Beim ersten Simulationsversuch wird eine Wirkungsgradmessung mit und ohne *Offset* durchgeführt. Dabei haben die Resultate gezeigt, dass der Wirkungsgrad mit einem *Offset* über den gesamten Luftspaltbereich um einen nahezu konstanten Faktor besser ist.

Die folgenden Skizzen zeigen den Unterschied zwischen der Konstruktion mit und ohne *Offset*.

mit *Offset* 14.4 mm

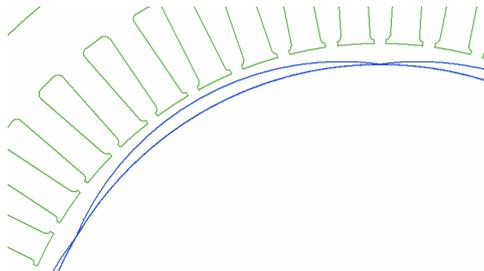


Abb. 24

ohne *Offset*

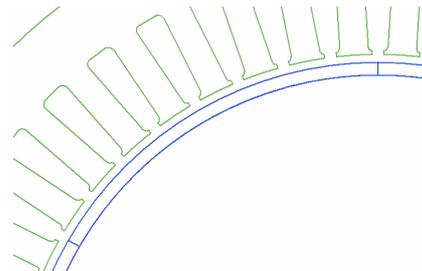


Abb. 25

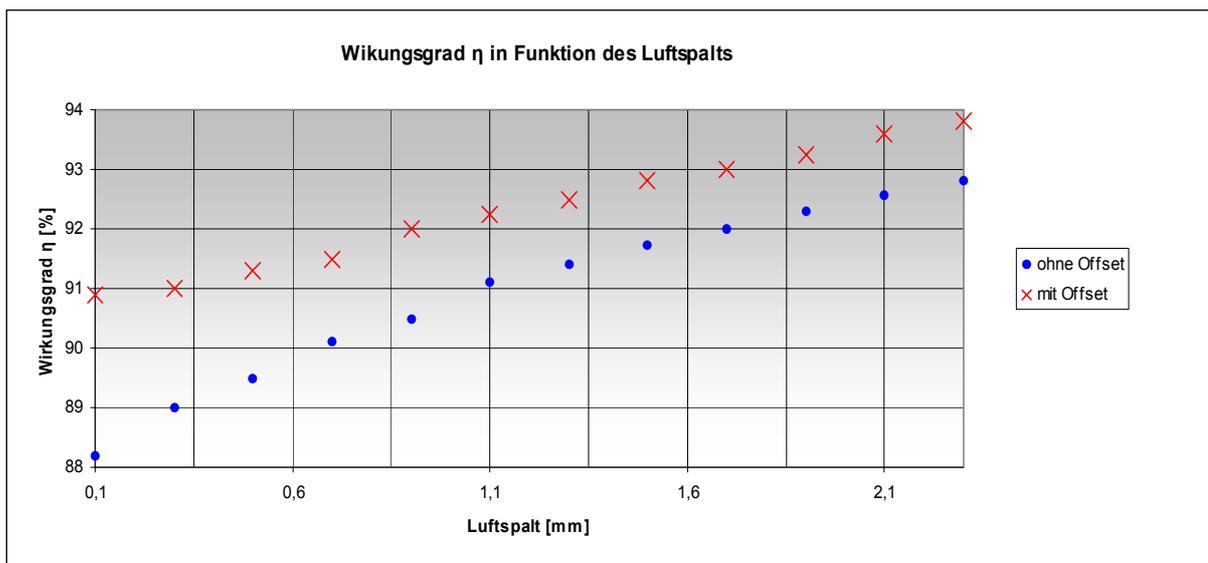


Abb. 26

## Simulationsversuch 2

Beim zweiten Simulationsversuch wird eine Wirkungsgradmessung mit und ohne *Offset* durchgeführt. Zugleich wird der Parameter *Embrace* auf den Wert 0.7 eingestellt und konstant gehalten. Die folgenden Skizzen (Abb. 27 und 28) zeigen den Unterschied zwischen der Konstruktion mit und ohne *Offset*.

mit *Offset* 14.4 mm

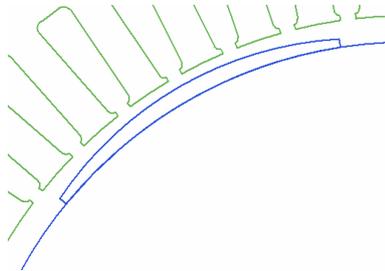


Abb. 27

ohne *Offset*

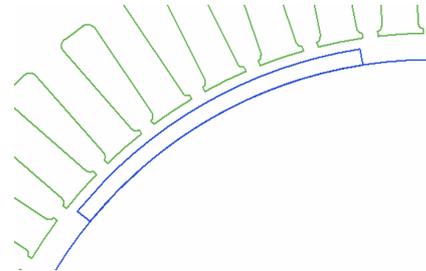


Abb. 28

Die Simulation zeigt, dass sich hier keine Verbesserung in Bezug auf den Wirkungsgrad erreichen lässt. Was hingegen dennoch auffällt, ist, dass auch bei kleinen Luftspaltabmessungen gute Wirkungsgrade möglich sind (Abb. 29).

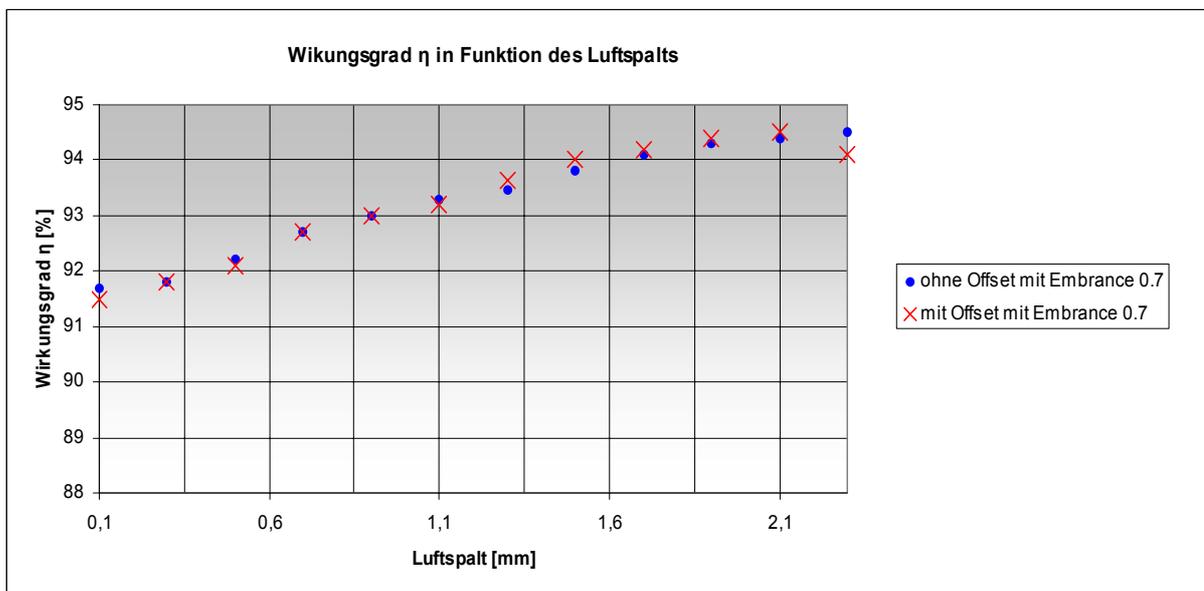


Abb. 29

## Zusammenfassung

Das unten aufgeführte Diagramm (Abb. 30) zeigt nochmals die Resultate aus den Simulationen 1 und 2. Die Resultate aus dem zweiten Simulationsversuch setzen sich klar ab. Hier fällt auf, dass schon bei kleinen Luftspaltabmessungen Wirkungsgrade von über 90% realisierbar sind.

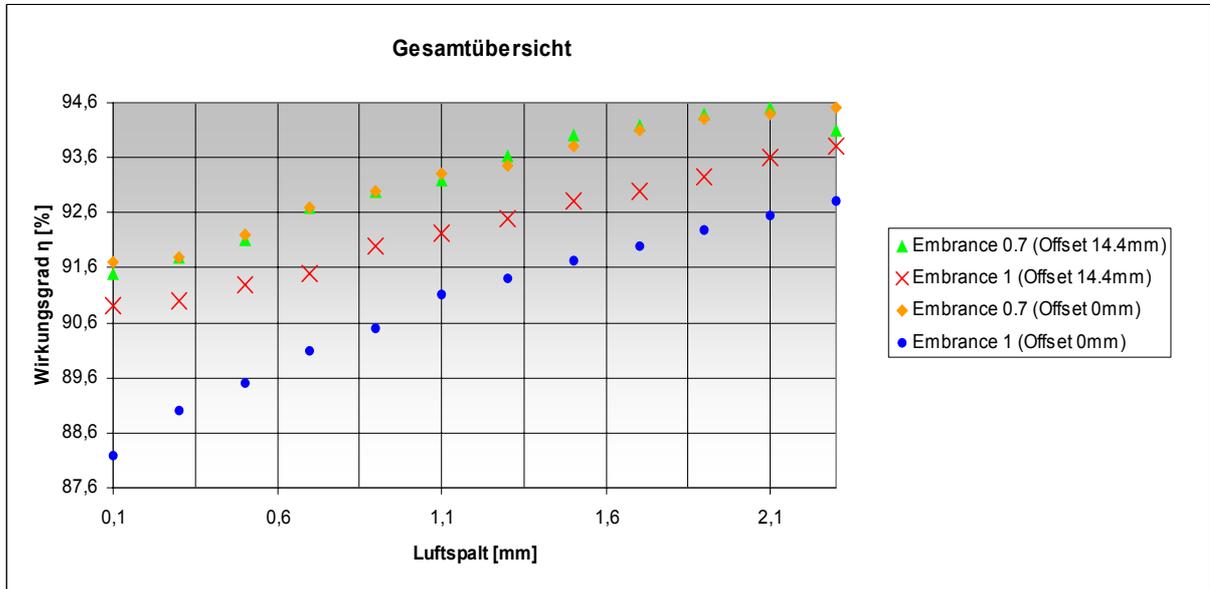


Abb. 30

Aus der Simulation geht hervor, dass die Konstruktionen mit der Parametereinstellung von *Embrace* 0.7 die besten Wirkungsgrade erzielen.

Bei diesen Konstruktionen hat eine Abflachung der Magnete keine grosse Auswirkung auf den Wirkungsgrad. Die Abflachung der Magnete hat hier den Vorteil, dass sich das Drehmoment verbessert.

Als Erklärung, dass sich das Einstellen einer gewissen *Embrace* positiv auf die Maschinenwerte auswirkt, kann erwähnt werden, dass sich die Magnetflüsse der Magnete auf dem Rotor nicht gegenseitig beeinflussen. Wären diese wie im Abb. 23 mit *Embrace* = 1 angeordnet, würden sich die Magnetflüsse gegenseitig schwächen. Hier wird in der Literatur ein Optimum bei ca.  $2/3$  festgelegt. Für unsere Simulationen verwenden wir den Wert für die *Embrace* von 0.667.

In den folgenden Diagrammen wurden bei der Simulation die Kupferverluste und die Eisenverluste miteinander berechnet. Aus den Resultaten ergeben sich folgende Kurvenscharen.

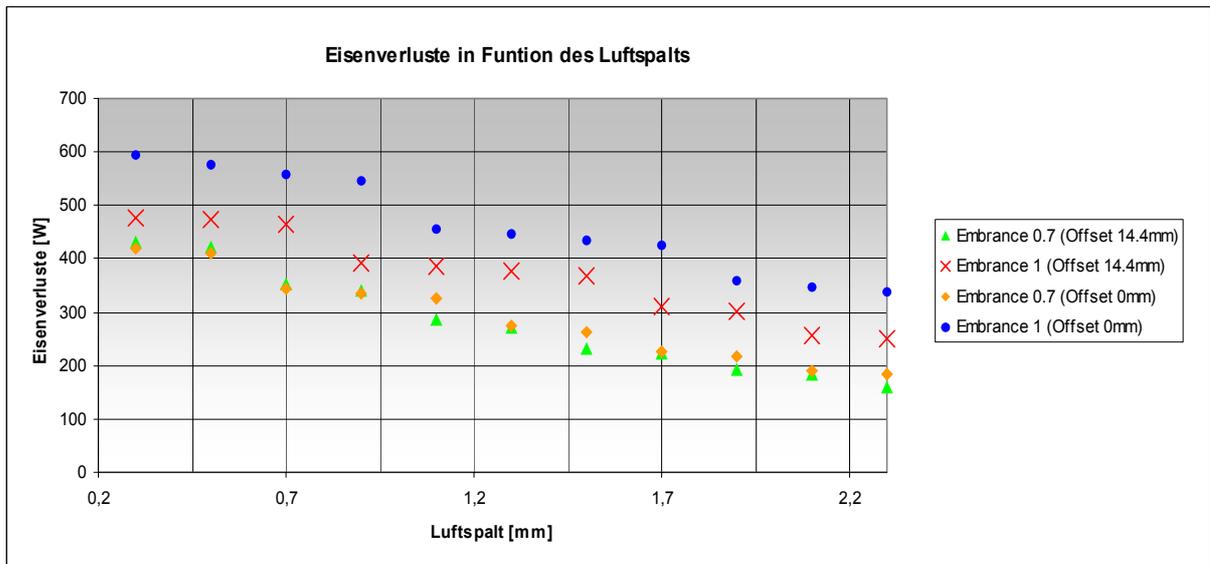


Abb. 31

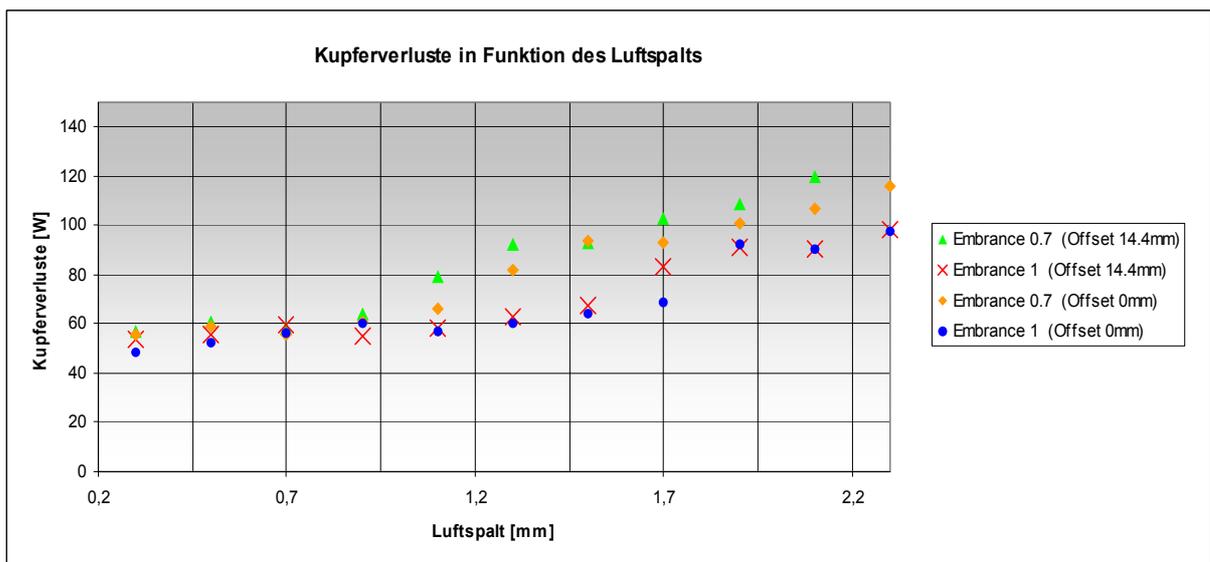


Abb. 32

Bei den Eisenverlusten gilt es zu erwähnen, dass bei einem grösseren Luftspalt die Flussdichten B kleiner werden und damit auch die Eisenverluste.

Um eine konstante Wellenleistung zu erzeugen müssen bei grösseren Luftspaltabmessungen höhere Ströme fließen. Diese Gesetzmässigkeit hat wiederum zur Folge, dass die Kupferverluste ansteigen. Es gilt zwischen den beiden Mechanismen ein Optimum zu finden um einen energieeffizienten Motor zu erhalten.

## Rotordurchmesser

Der Rotordurchmesser hat wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad eines Motors. Je nachdem wie der Durchmesser des Rotors bemessen wird, ändert sich zwangsweise auch der Luftspalt. Aus dem *Kienle+Spiess [1]* Katalog sind normierte Blechschnitte für Rotoren bis zu einer Normbaugrösse von IEC100 erhältlich (Abb. 33). Diese Baugrösse wird bei Motoren bis zu einer Leistung von 3 kW verwendet. Da wir in unseren Simulationen Maschinen simulieren, welche bis zu 100kW Leistung haben, benötigen wir dementsprechend auch grössere Rotorgeometrien (Abb. 34). Diese sind aber nicht erhältlich. Dies ermöglicht uns dem Durchmesser des Rotors und dadurch automatisch auch den Luftspalt zu variieren. Weil eine konstante Leistung aus der Maschine gezogen wird, resultieren Kupfer- und Eisenverluste, welche je nach Luftspalt verschieden sind. Je grösser der Luftspalt der Maschine, desto mehr Strom nimmt die Maschine auf, um die gleiche Leistung auf der Welle zu erzeugen. Dabei gilt es zu beachten, dass durch den Stromanstieg auch die Wicklung mehr beansprucht wird und dadurch auch mehr Kupferverluste resultieren. Dies hat zur Folge, dass der Wirkungsgrad verschlechtert wird (Kap. 5). Wird der Luftspalt klein bemessen, so sind die Eisenverluste relativ gross gegenüber den Kupferverlusten.

Aus diesen Gründen muss bei der Konstruktion des Rotors eine grosse Beachtung auf den Durchmesser oder den damit verbundene Luftspaltbreite gelegt werden.

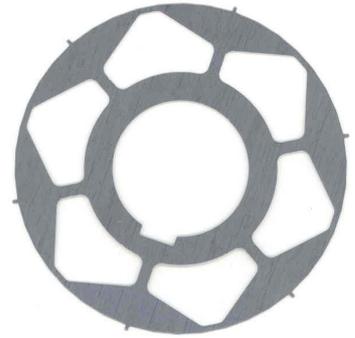


Abb. 33

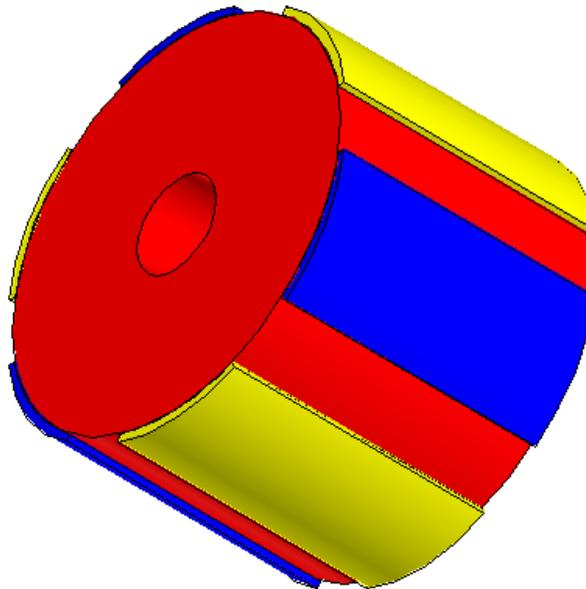


Abb. 34

### 4.1.3 Motorensimulationen

Das folgende Kapitel ist das eigentliche Kernstück der Projektarbeit „*Permanentmagnet-Motor*“. Ab Kap. 4.1.3.1 werden Permanentmagnet-Maschinen im Leistungsbereich zwischen 5.5 bis 90 kW durchsimuliert. Dabei steht das Ziel einen energiesparsamen Motor zu realisieren im Vordergrund. Aber nicht nur ein guter Wirkungsgrad ist von Wichtigkeit, sondern auch Maschinen zu konzipieren, die technisch und wirtschaftlich gebaut werden können.

Nach Absprache mit der Projektleitung haben wir uns auf Maschinen mit den folgenden Leistungen festgelegt.

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

Als Statorbleche wurden die normierten Baugrößen aus dem *Kienle+Spiess [1]* Katalog (siehe Anhang C) für die dazugehörige Leistungsklasse der ASM eingesetzt. Somit sind unsere PM-Maschinen gleich gross wie eine äquivalente ASM in diesem Leistungsbereich. Ob aus dem gleichen Volumen mehr Leistung gezogen werden kann, sollte man nach der Simulation abschätzen können.

Normierte Rotorbleche sind für solche Baugrößen auf dem Markt nicht erhältlich. Somit sind wir nicht an eine fixe Luftspaltbreite gebunden und können diese nach belieben variieren.



Bei einer Permanentmagnet-Maschine 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 auch die Ventilations- und Reibungsverluste vernachlässigt, da diese Parameter je nach Leistungsklasse der Maschine mehr oder weniger ins Gewicht fallen. Hinzu kommt, dass z.B. die Reibungsverluste durch gute Lager stark minimiert werden können. Deshalb werden die **Ventilations- und Reibungsverluste** für eine allgemeine Aussage über den Wirkungsgrad bei der Simulation der PM-Maschinen **bewusst weggelassen**.

Für diese Simulation gilt stets:

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

## Informationen zur Simulation

### Generelle Einstellungen in RMXprt

Bei der Simulation der Maschinen aus den oben aufgeführten Leistungsklassen werden verschiedene Varianten ausgetestet. Dabei werden nur 4 und 6 Pol-Maschinen verwendet. Diese sollen bei einer Drehzahl im Nennbetrieb von 3000 U/min und einer normierten Gleichspannung von 400 VDC im Zwischenkreis betrieben werden.

### Beschaltung

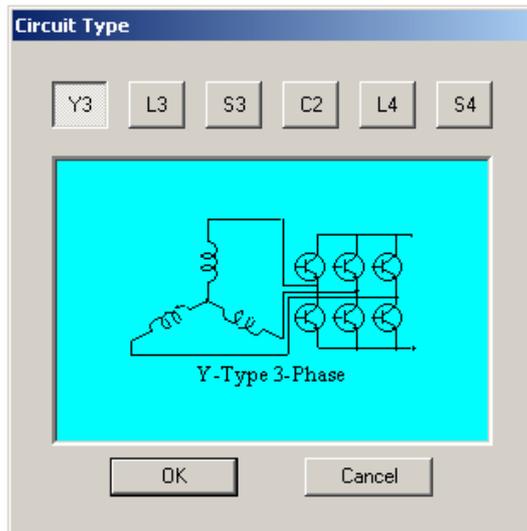


Abb. 35

Die Beschaltung bleibt für alle Maschinen jeweils gleich. Alle Maschinen werden mit dem in Abb. 35 beschriebenen Schaltungstyp betrieben. Es handelt sich hier um eine Schaltung mit einer Zwischenkreisspannung von 400 VDC. Die Dreiphasenwicklung ist in Stern geschaltet.

### Wicklung (Stator)

Speziell wurde bei der Auswahl der Maschinen darauf geachtet, dass keine Bruchlochwicklungen entstehen, sondern nur Ganzlochwicklungen.

Bei jeder Maschine muss zusätzlich noch die Anzahl Nuten pro Pol und Phase ( $q$ ) ausgerechnet werden. Dieses Mass muss für das Simulationsprogramm *RMXprt* umgerechnet werden. Der Parameter wird mit *Coil Pitch* bezeichnet. Es ist ein Mass für die Anzahl Nuten zwischen einer Wicklungsschleife. Dabei wird von der ersten freien Nute bis und mit der Nute gezählt, in welcher die Wicklung eingelegt werden muss.

Der *Coil Pitch* kann wie folgt berechnet werden:  $CoilPitch = 3 * q - 1$

Bei der Simulation wird ein Wicklungsplan in Form einer Tabelle erstellt, welche nach Bedarf im Projektbaum des Maxwell-Files unter Machine -> Stator -> Winding nachgeschlagen werden kann. Wir haben uns drauf beschränkt nur dreiphasige, zweischichtige Ganzlochwicklung zu simulieren.

- A entspricht Phase 1
- B entspricht Phase 2
- C entspricht Phase 3

Erwähnenswert sind noch die Vorzeichen der Phasen A, B und C. Bei einem negativen Vorzeichen stellt diese Nute den so genannten *Out Slot* dar. Der Strom einer Wicklung fließt aus dem *Out Slot*. Für das positive Vorzeichen (bzw. kein Vorzeichen) gilt die inverse Gesetzmässigkeit. Diese Nute wird als *In Slot* bezeichnet.

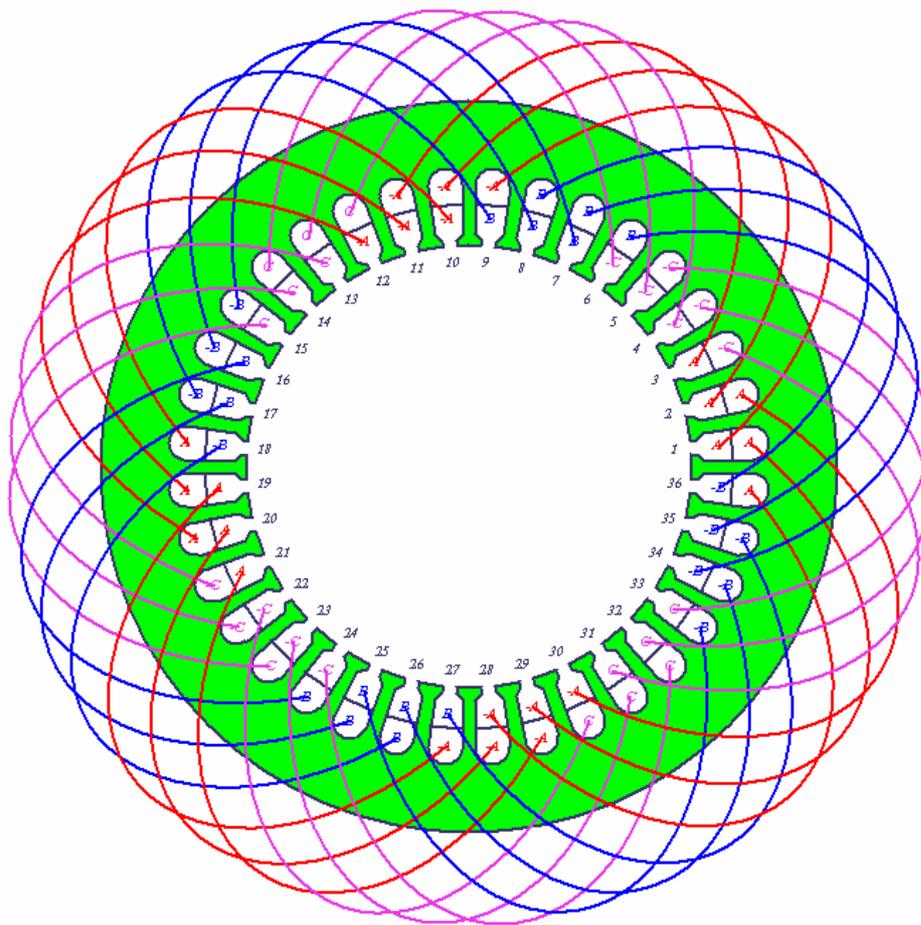


Abb. 36

In Bezug auf die Wicklung können im Programm noch die in Abb. 37 aufgeführten Parameter eingestellt werden.

- Mit dem Parameter *Winding Layers* kann eine ein- oder zweischichtige Wicklungsanordnung ausgewählt werden
- In der Regel wird beim Parameter *Parallel Branches* der Wert 2 eingestellt. Dadurch kann der Querschnitt der Wicklung erhöht werden.
- Standardmässig wird eine Isolationsdicke der Kupferleitung von 0.2 mm angenommen.
- Bei den Parametern *Conductors per Slot*, *Number of Strands* und *Wire Size* wird durch Eingabe einer 0 durch die Software den optimalen Wert berechnet und im Datenblatt abgelegt.

Name	Value
Winding Layers	2
Winding Type	Whole-Coiled
Parallel Branches	2
Conductors per Slot	0
Coil Pitch	8
Number of Strands	0
Wire Wrap	0.2
Wire Size	Diameter: 0mm

Abb. 37

## Einstellungen der Materialeigenschaften

Ein Permanentmagnet-Motor besteht hauptsächlich aus den 3 verschiedenen Werkstoffen: Eisen, Kupfer und dem Dauermagnet. Um den Motor realitätsgetreu nachzubilden, müssen diese Materialien so gut als möglich mit Parametern beschrieben werden.

In der Software *RMxprt* sind in einer Bibliothek schon sehr viele Materialien vordefiniert. Für unsere Simulationsversuche haben wir diese übernommen und nach Bedarf abgeändert.

Die Parameter für das Eisen haben wir aus dem *Kienle+Spiess [1]* Katalog. Es handelt sich hier um die Werte in der Tabelle *Coordinates*.

Zudem können noch Blechdicke und spezifische Dichte angegeben werden. Das Material wird unter der Bezeichnung *steel\_1008* geführt und kann in der Software nachgeschlagen werden.

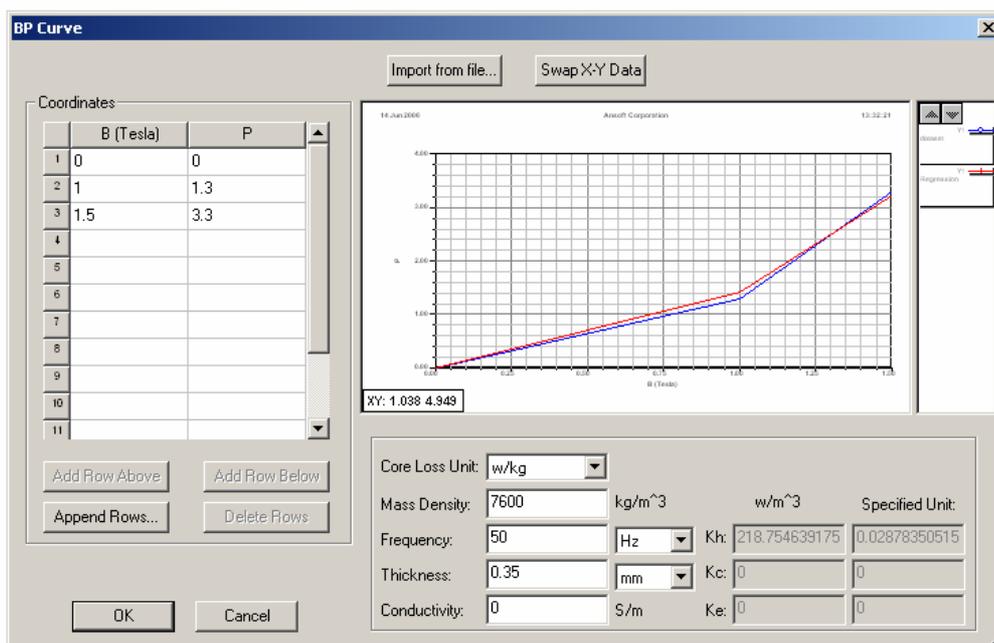


Abb. 38

Die Parameter für den Permanentmagneten können nach Abb. 39 vorgenommen werden. Das Material wurde unverändert übernommen. Diese Werte sind standardmässig von der Firma *Ansoft* vordefiniert. Die Bezeichnung lautet *NdFeB35*. Das Material kann in der Software nachgeschlagen werden.

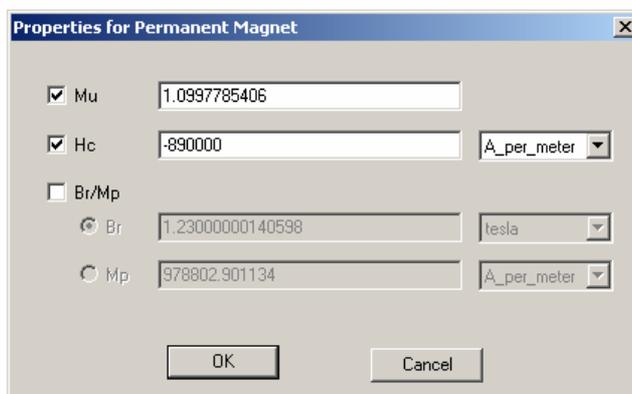


Abb. 39

## Simulationsablauf

Um eine sinnvolle Simulation durchführen zu können, muss eine maschinenspezifische Luftspaltbreite hergeleitet werden. Wie erste Simulationsversuche gezeigt haben, hat auch dieser Parameter einen wichtigen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Durch Erhöhen der Luftspaltbreite wird die Flussdichte  $B$  reduziert und damit auch die resultierenden Eisenverluste. Da bei dieser 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 für den PMM132-4-36 Maschinentypen dar, erhalten wir einen Verlauf wie in Abb. 40.

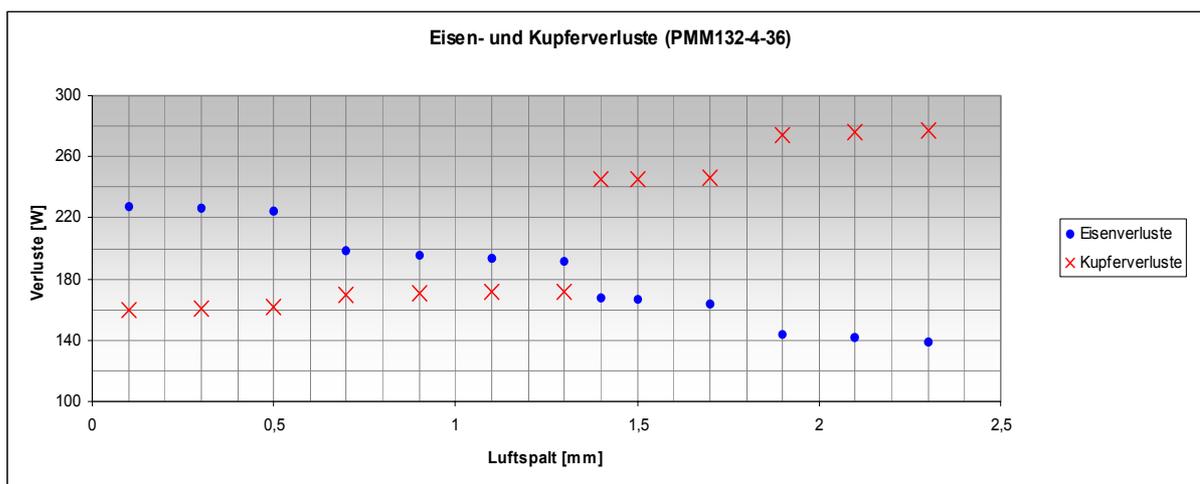


Abb. 40

Es ist un schwer zu erkennen, dass die Verluste bei einer bestimmten Luftspaltbreite (hier ca. 1.33 mm) gleich gross sind. An diesem Punkt sind die gesamten Verluste zu je 50% auf Eisen- und Kupferverluste aufgeteilt.

Diesen Luftspalt bezeichnen wir als maximale Luftspaltbreite. Wird der Luftspalt grösser gewählt, so entstehen mehr Kupferverluste als Eisenverluste. Da die Verlustleistung in Wärme umgesetzt wird, heizt die Wicklung mehr als das Eisen. Um die Maschine kühlen zu können, muss die Wärme zuerst auf das Eisen übertragen und kann erst dann an die Umgebung abgegeben werden.

In dieser Situation kann der Motor nur bei kleineren Betriebstemperaturen betrieben werden, weil die Wicklung rasch an ihre thermischen Grenzen stösst und zudem ein beschleunigter Alterungsprozess eintritt.

Um die Luftspaltbreite zu bestimmen, die diese Bedingung erfüllt, wenden wir ein iteratives Verfahren an. Dazu nehmen wir für den ersten Iterationsschritt einen Luftspalt von 1 mm an. Mit Hilfe der bereits bekannten Maschinendaten (Anzahl Pole, Statorinnendurchmesser) kann jetzt mit der hergeleiteten Formel der *Offset* für diesen Zustand berechnet werden.

Nun werden durch die Simulation die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  aufgenommen und es kann ein erster Wert für die optimale Luftspaltbreite aus dem aufgezeichneten Diagramm entnommen werden. Im zweiten Iterationsschritt wird das Resultat aus dem ersten Schritt weiter verbessert. Hier wird die Simulation zur Berechnung der Luftspaltbreite abgebrochen. Die Luftspaltbreite, welche zur Berechnung der Maschine verwendet wird, stammt aus dem Diagramm vom zweiten Schritt. Nun kann wie am Ende des ersten Iterationsschritts der *Offset* für die definitive Maschine berechnet werden. Ein

weiterer Schritt der Simulation ist die Aufnahme der Belastungskennlinie  $\eta = f(P_w)$  und der Drehzahlkennlinie  $\eta = f(n)$ .

Die erste Kennlinie (Abb. 41) stellt die Wirkungsgradcharakteristik der Maschine im Teillastbetrieb dar. Dabei testen wir die Maschine bei Unterlast mit etwa 25% der Nennleistung und bei Überlast mit etwa 300% der Nennleistung. Die Nennleistung setzen wir hier bei der Nominalleistung der betreffenden Maschine an. Der Grund dafür liegt darin, dass der Nennbetrieb bzw. die Nennleistung der simulierten Maschine nicht bekannt ist. Aus der resultierenden Belastungskennlinie können erste Schlussfolgerungen auf den möglichen Nennbetrieb gemacht werden. Die Nennleistung der simulierten PMM kann dabei durchaus höher liegen als die Nennleistung einer äquivalenten ASM dieser Leistungsgrösse. Aus diesem Grund wird die Maschine im Überlastbereich auch bei Leistungen getestet, die möglicherweise unrealistisch erscheinen.

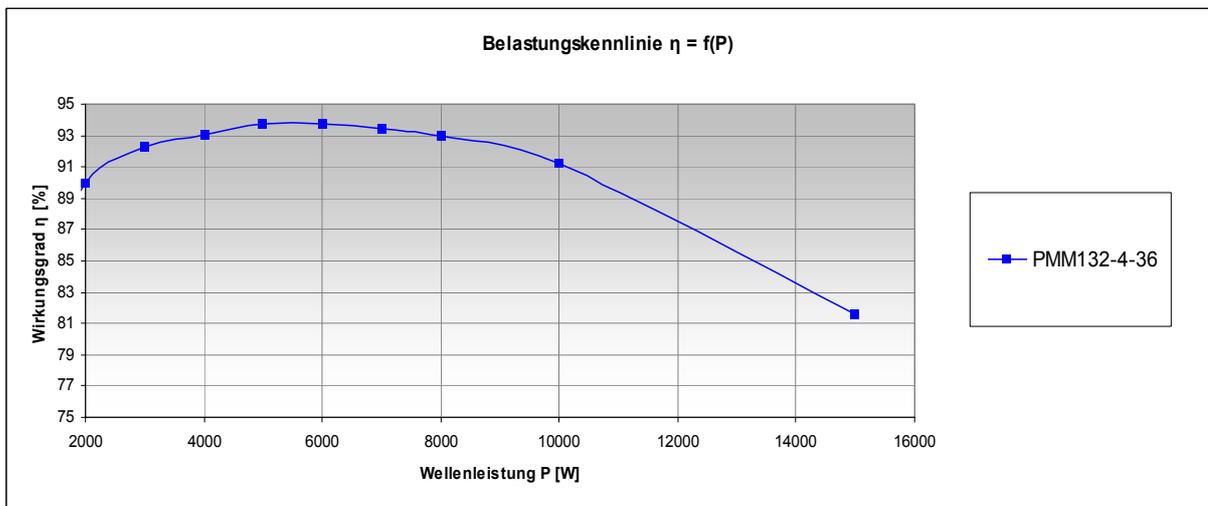


Abb. 41

Die Drehzahlkennlinie zeigt, in welchem Drehzahlbereich die Maschine vorzugsweise betrieben werden kann. Auch diese Kennlinie ist aussagekräftig im Hinblick auf einen effizienten Motor. Eine Maschine wird in den meisten Fällen nicht genau im Nennbetrieb eingesetzt, d.h. nicht bei Nenndrehzahl gefahren. Die Drehzahlkennlinie kann auch aufschlussreich sein in Bezug auf den möglichen Nennbetrieb.

#### 4.1.3.1 MM IM 5.5 KW - LEISTUNGSBEREICH

In dieser Leistungsklasse werden 3 verschiedene Maschinen simuliert. Die Bezeichnungen für diese lauten:

- PMM132-4-36
- PMM132-6-36
- PMM132-4-48

Diese Leistungsklasse hat eine minimale normierte Stator- / Rotorlänge (Eisenlänge)  $l_{RS}$  von 90 mm.

#### PMM132-4-36

##### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 200$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC132/6.135

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 3 - 1 = 8$$

##### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 90$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

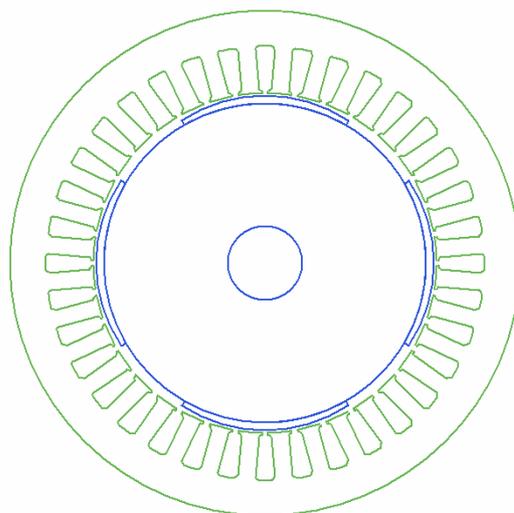


Abb. 42

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 43 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 5.605 mm.

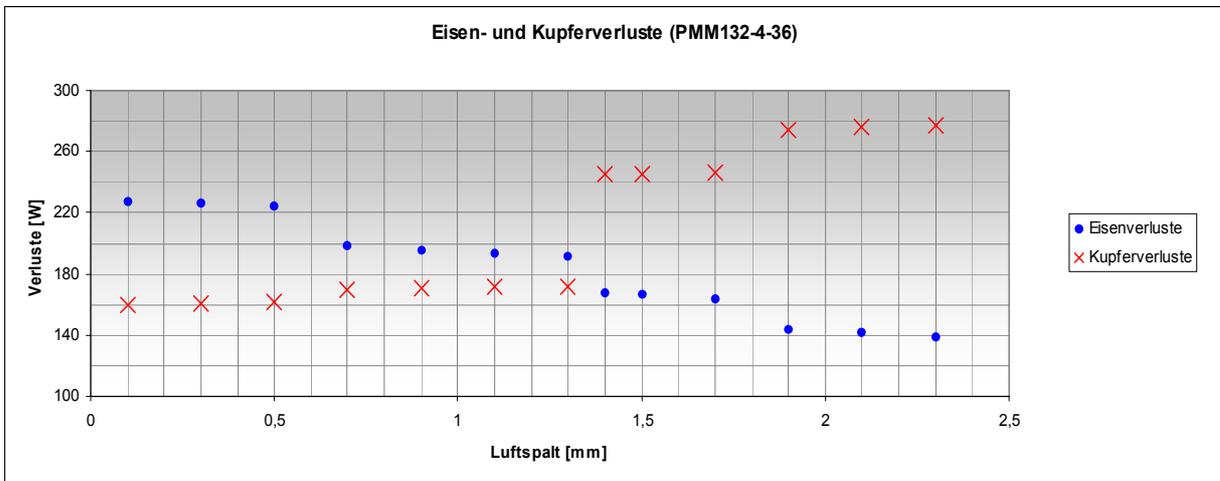


Abb. 43

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 1.35 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 44 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1.35 mm und einem berechneten *Offset* von 6.942 mm.

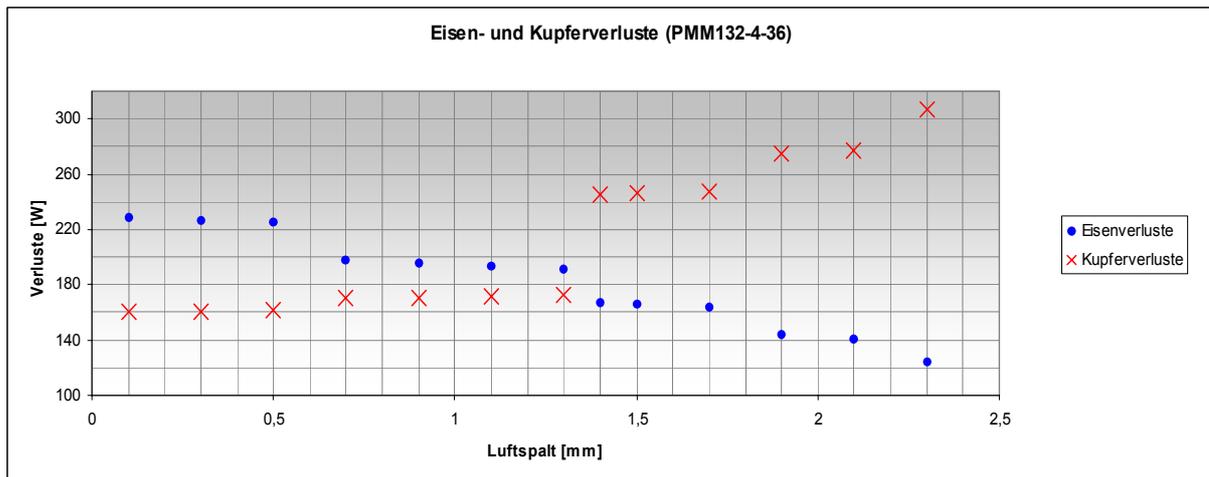


Abb. 44

Der maximale Luftspalt liegt bei ca. **1.3 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 6.942 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 132.4 mm. Diese Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 45 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

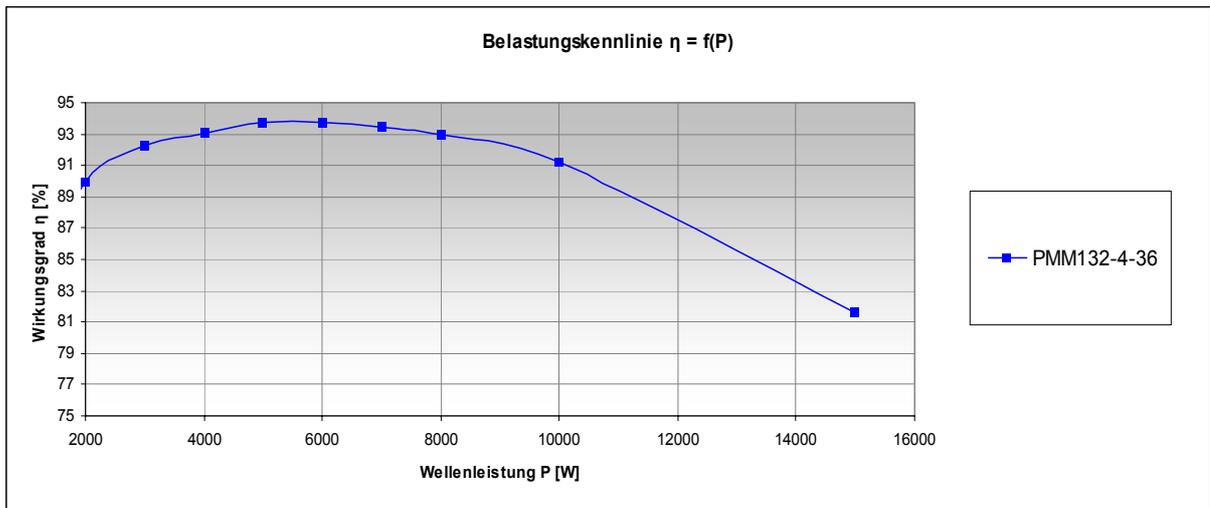


Abb. 45

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 46 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

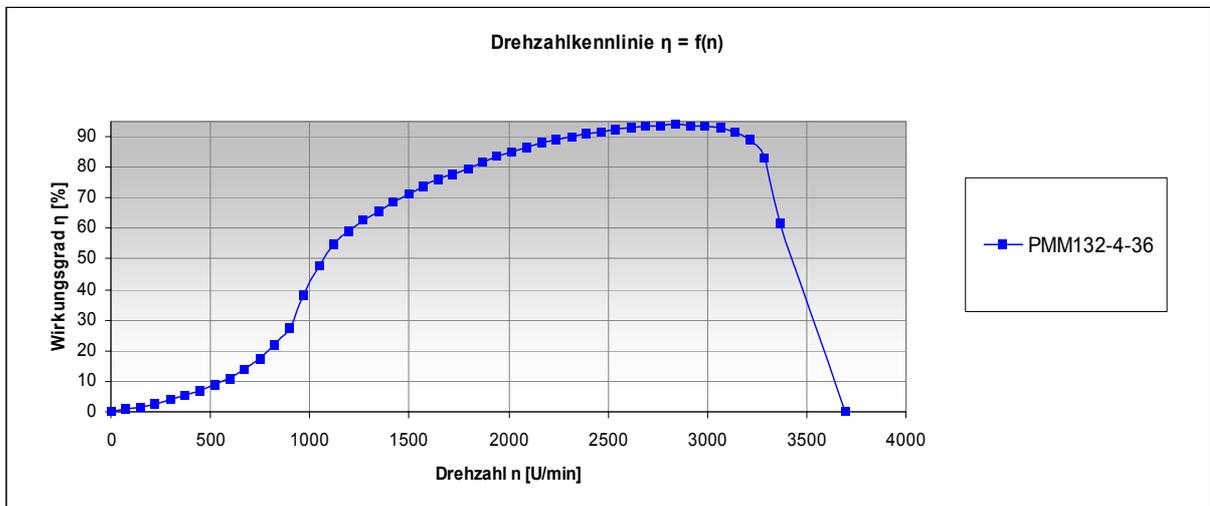


Abb. 46

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM132-4-36.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	5.5
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	4
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Wire Diameter (mm):	0.9116
Average Coil Pitch:	8
Number of Conductors per Slot:	26

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.3
Width of Magnet (mm):	65.1681
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Permanent Magnet Weight (kg):	0.503319
Armature Copper Weight (kg):	2.71741
Armature Core Steel Weight (kg):	8.35042
Rotor Core Steel Weight (kg):	7.69455
Total Net Weight (kg):	19.2657

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	14.6605
Root-Mean-Square Armature Current (A):	13.314
Iron-Core Loss (W):	191.437
Armature Copper Loss (W):	172.317
Total Loss (W):	363.754
Output Power (W):	5500.43
Input Power (W):	5864.18
Efficiency (%):	93.797
Rated Speed (rpm):	2868.55
Rated Torque (N.m):	18.3107

## PMM132-6-36

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 200$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC132/6.135

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 2 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 90$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

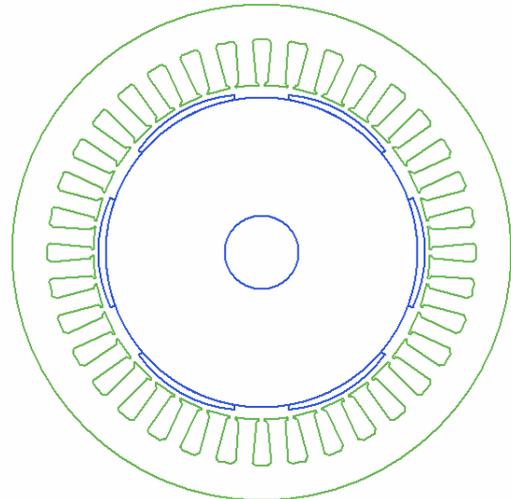


Abb. 47

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 48 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 9.496 mm.

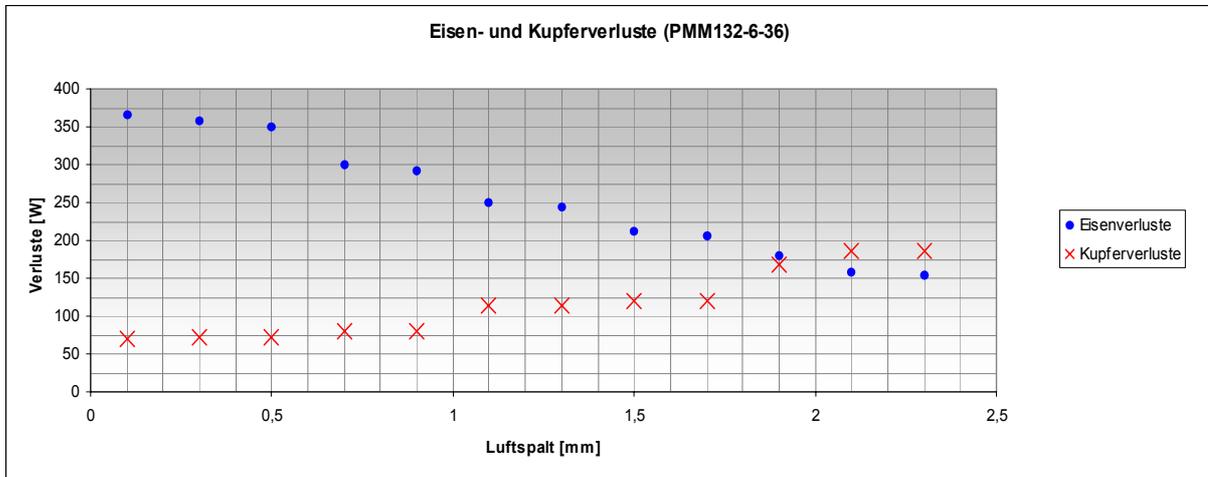


Abb. 48

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von von ca. 1.95 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 49 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1.95 mm und einem berechneten *Offset* von 13.001 mm.

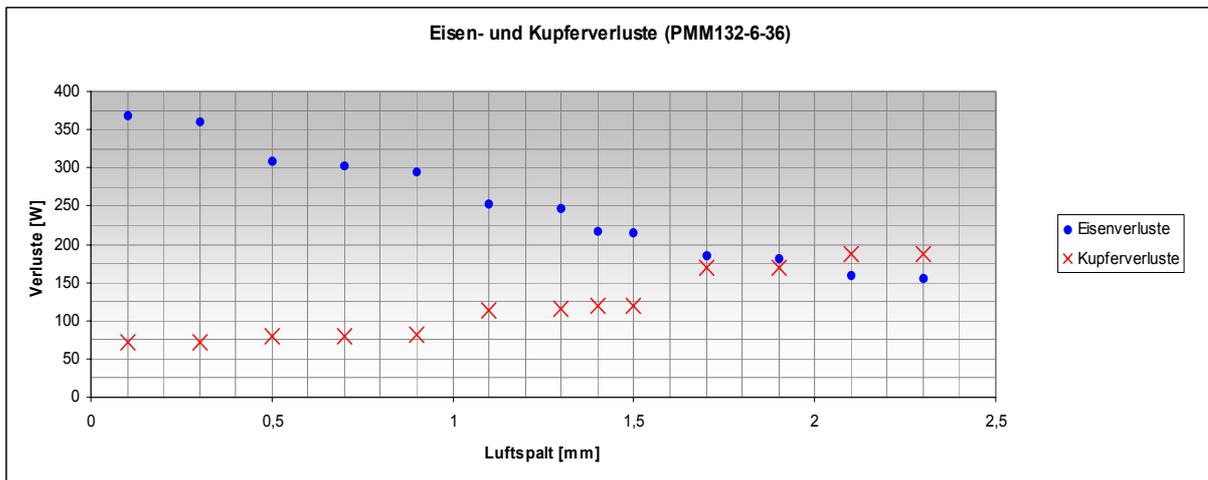


Abb. 49

Der optimale Luftspalt liegt bei ca. **1.95 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 13.001 mm. Der Rotor-durchmesser beträgt somit 131.1 mm. Diese Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 50 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

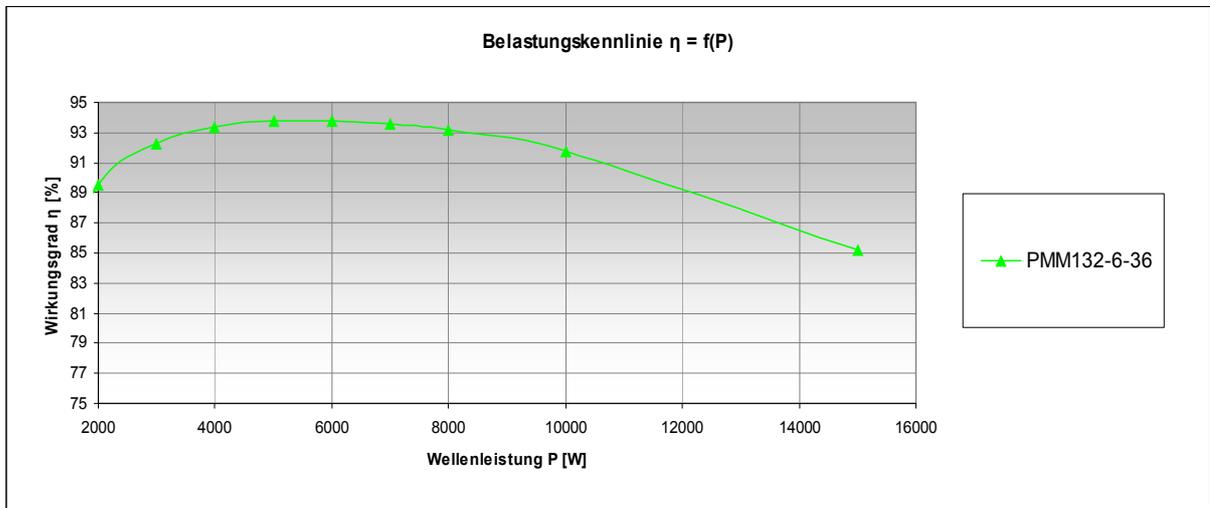


Abb. 50

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 51 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

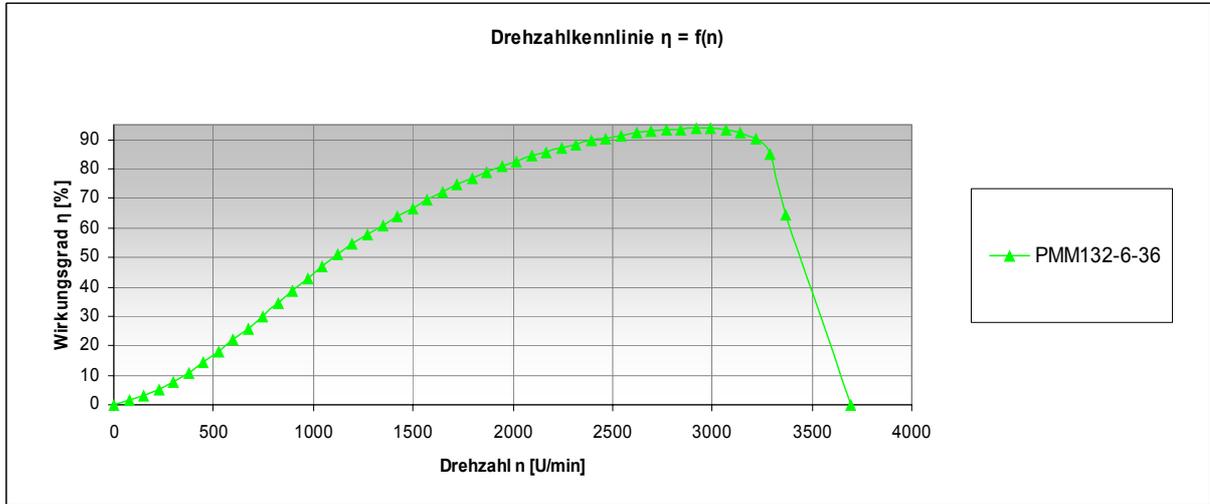


Abb. 51

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM132-6-36.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	5.5
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Wire Diameter (mm):	0.8118
Average Coil Pitch:	5
Number of Conductors per Slot:	28

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.95
Width of Magnet (mm):	44.1737
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	1.7639
Permanent Magnet Weight (kg):	0.502427
Rotor Core Steel Weight (kg):	7.52769
Armature Core Steel Weight (kg):	8.35042
Total Net Weight (kg):	18.1444

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	14.6215
Root-Mean-Square Armature Current (A):	12.9633
Iron-Core Loss (W):	180.05
Armature Copper Loss (W):	168.608
Total Loss (W):	348.659
Output Power (W):	5499.94
Input Power (W):	5848.6
Efficiency (%):	94.0386
Rated Speed (rpm):	2947.65
Rated Torque (N.m):	17.8177

## PMM132-4-48

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 200$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 140$  mm
- Anzahl Nuten = 48
- Typ-Nr.: IEC132/8.140

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 4 - 1 = 11$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 140$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 90$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

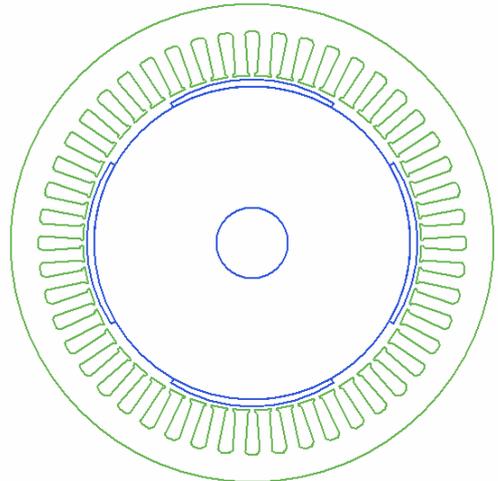


Abb. 52

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 53 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 5.605 mm.

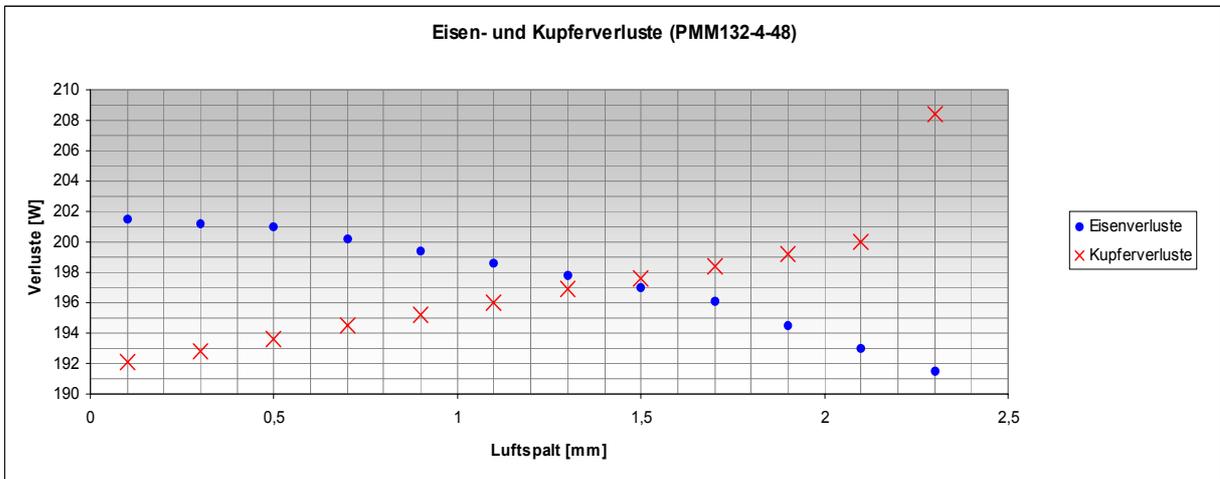


Abb. 53

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 1.45 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 54 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1.45 mm und einem berechneten *Offset* von 7.37 mm.

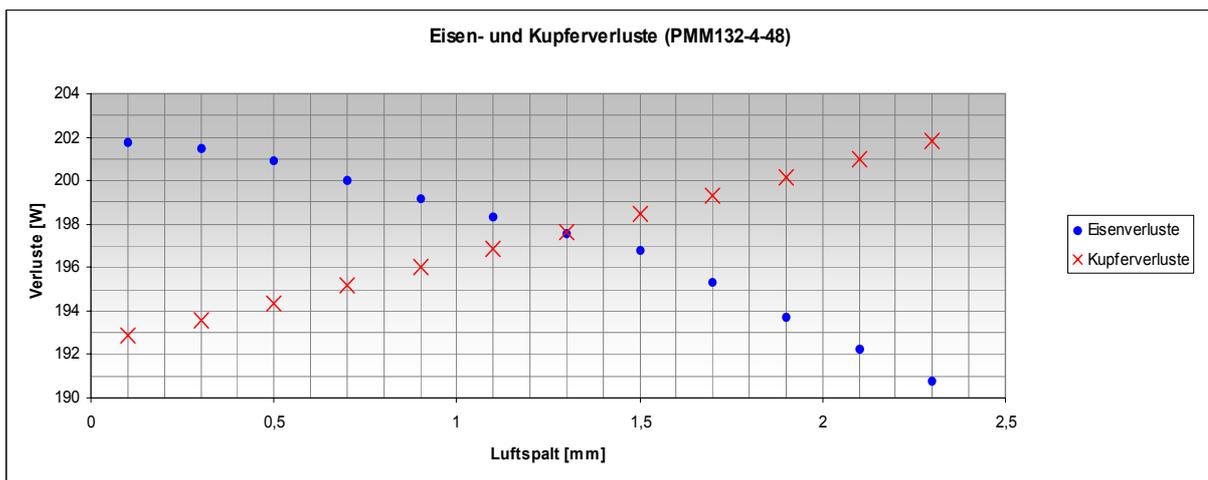


Abb. 54

Der optimale Luftspalt liegt bei ca. **1.3 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 6.84 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 137.4 mm. Diese Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 55 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

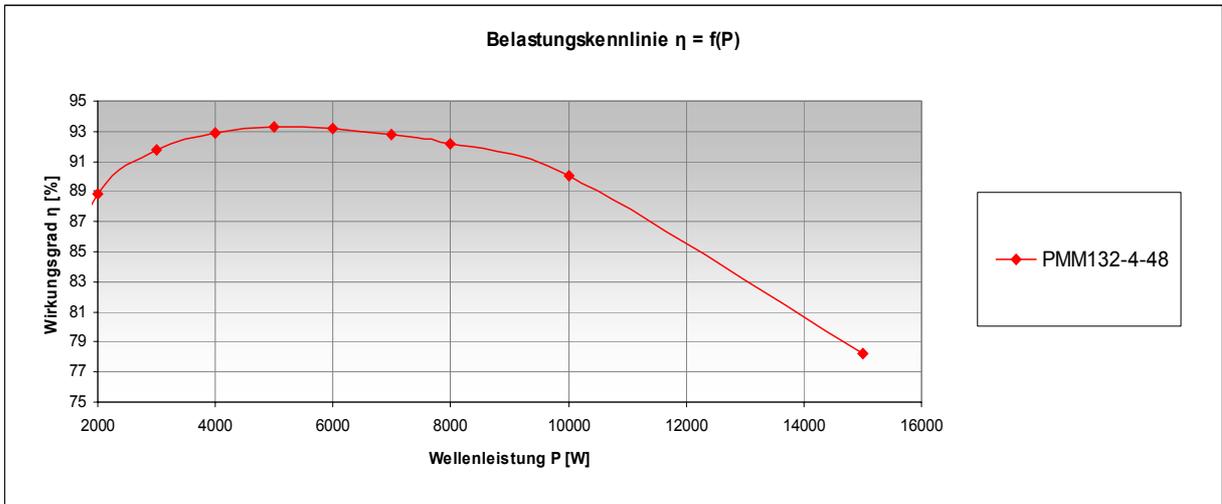


Abb. 55

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 56 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

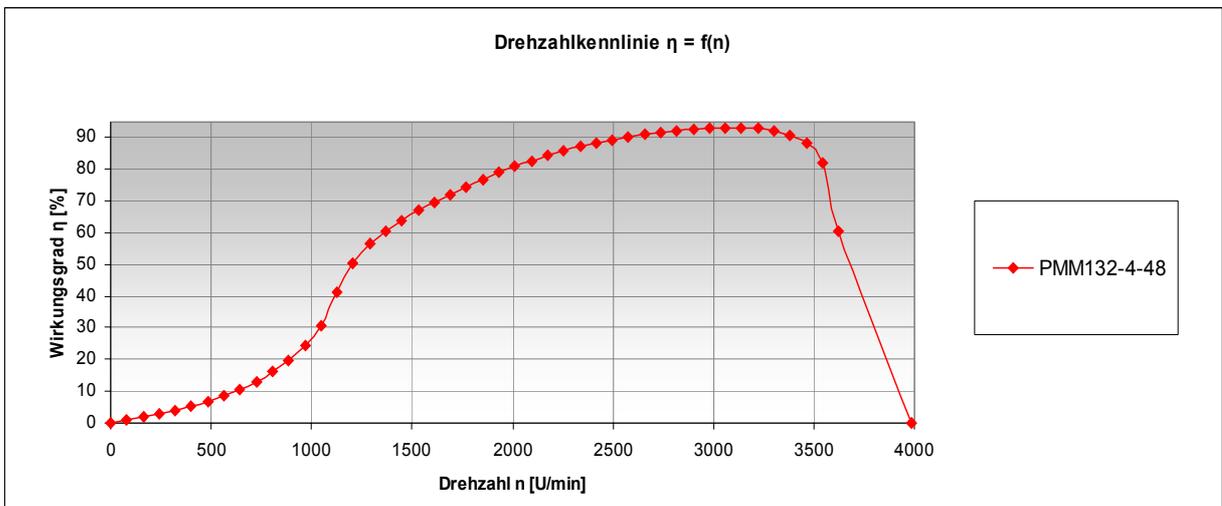


Abb. 56

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM132-4-48.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	5.5
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	4
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Wire Diameter (mm):	0.7229
Average Coil Pitch:	11
Number of Conductors per Slot:	20

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.3
Width of Magnet (mm):	67.6884
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	2.73996
Permanent Magnet Weight (kg):	0.524224
Armature Core Steel Weight (kg):	7.48562
Total Net Weight (kg):	19.1022
Rotor Core Steel Weight (kg):	8.3524

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	14.7384
Root-Mean-Square Armature Current (A):	13.3866
Iron-Core Loss (W):	197.619
Armature Copper Loss (W):	197.406
Total Loss (W):	395.025
Output Power (W):	5500.32
Input Power (W):	5895.35
Efficiency (%):	93.2994
Rated Speed (rpm):	3068.31
Rated Torque (N.m):	17.1183

## Auswertung und Beurteilung der Simulationsdaten

In diesen Abschnitt werden die Daten und Kurven aus der Simulation übereinander gelegt und können somit besser miteinander verglichen werden.

Die Abb. 57 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$  der 3 simulierten PMM.

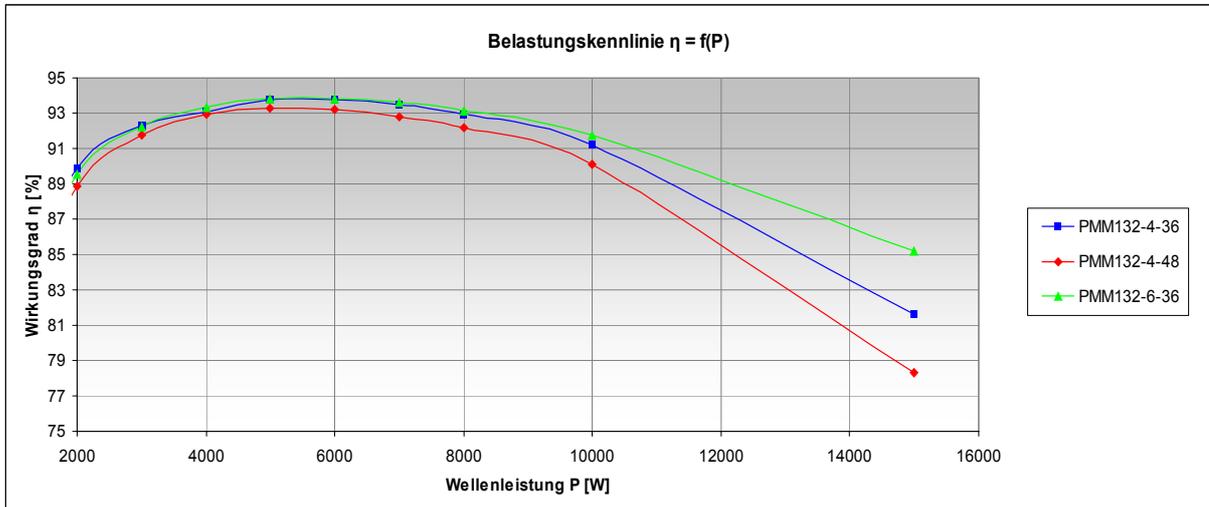


Abb. 57

Die 3 Maschinen weisen im Teillastbetrieb einen nahezu identischen Verlauf auf. Ab etwa 10 kW Wellenleistung ist eine klare Wirkungsgraddifferenz erkennbar. Dies kann anhand des Kupferanteils erklärt werden. Die PMM132-6-36 weist nach Datenblatt einen wesentlich geringeren Kupferanteil auf. Bei Überlast wirkt sich der zusätzliche Kupferanteil der beiden anderen Maschinen stark aus. Die Kupferverluste steigen quadratisch zum Strom. Im Bereich der Nennleistung (5 - 8 kW) fließen bei allen Maschinen ungefähr die gleichen Ströme. Deshalb liegen die Kennlinien in diesen Bereich enger zusammen.

Da diese Wirkungsgradverläufe (Abb. 57) nicht alle Verluste beinhalten, stützen wir uns auf die Norm IEC 60034-2. Sie beschreibt die Zusatzverluste pauschal mit einem Wert in Prozent der aufgenommenen Leistung. Sie können über den gesamten Belastungsbereich als konstant angenommen werden. In dieser Leistungsklasse kann dieser Wert maximal 3% der Nennleistung aufweisen. Das ergibt in Abb. 57 eine konstante Verschiebung der Kurven nach unten.

Die Abb. 58 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$  der 3 simulierten PMM.

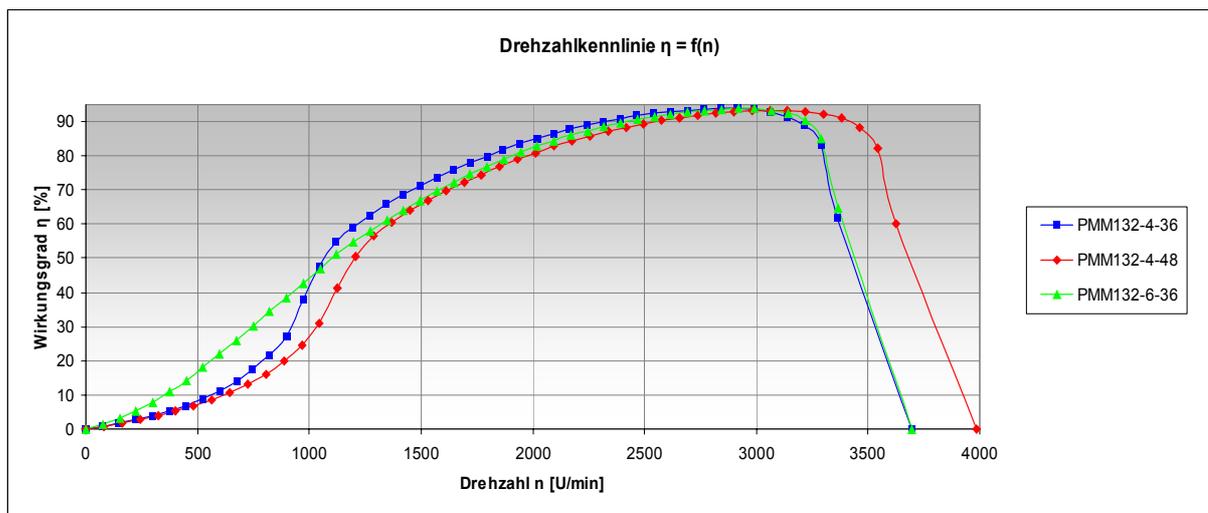


Abb. 58

Bei der Abb. 58 fällt sofort auf, dass die Maschine mit 48 Nuten (PMM132-4-48) über einen grösseren Drehzahlbereich (2500 - 3500 U/min) einen Wirkungsgrad von über 90% aufweist. Der Grund dafür liegt in der Bewicklung der Maschine. Die PMM132-4-48 weist gegenüber den andern Maschinen deutlich weniger Windungen pro Nute auf. Das Optimum aus Drehzahl- und Belastungskennlinie dieser Maschine liegt bei der erwähnten kleinen Windungszahl. Werden mehr Windungen pro Nute verwendet, kann einerseits die resultierende Nenndrehzahl abnehmen und andererseits steigen durch den zusätzlichen Kupferanteil die damit verbundenen Kupferverluste, die wiederum den Wirkungsgrad negativ beeinflussen. Die Belastungskennlinie der PMM132-4-48 (Abb. 58) würde dadurch noch stärker abgesenkt. Die Drehzahlkennlinie der Maschinen mit 36 Nuten verläuft hingegen beinahe identisch, da beide Maschinen eine nahezu identische Anzahl Windungen pro Nute aufweisen.

Die Daten der Maschinen können je nach Setup der Simulation variieren. Bei der iterativen Berechnung wurde festgestellt, dass das Drehmoment je nach Luftspaltbreite auch variieren kann. Die Abweichungen der Drehmomente der hier aufgelisteten Motoren waren jedoch gering ( $\pm 1.5$  Nm) und wurden aus diesem Grund vernachlässigt. Die Schwankung des Drehmoments wird aber bei den Maschinen in den grösseren Leistungsklassen mit Sicherheit grösser sein und muss aus diesem Grund auch berücksichtigt werden.

Die folgenden Tabellen zeigen den direkten Vergleich der PMM und ASM. Für den Vergleich dient ein Energiesparmotor nach der EFF1 Norm eines namhaften europäischen Herstellers.

	Wirkungsgrad $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
IEC132S	88.6	18	2910

	Wirkungsgrad <sup>1</sup> $\eta$ [%]	korrigierter Wirkungsgrad <sup>2</sup> $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
PMM132-4-36	93.79	90.79	18.3	2868.5
PMM132-6-36	94.03	91.03	17.8	2947.6
PMM132-4-48	93.23	90.23	17.1	3068.3

Ganz allgemein kann man festhalten, dass eine PMM132 bei ca. 3000 U/min in etwa folgende Daten aufweist.

- Wirkungsgrad  **$\eta = 91 \%$**
- Drehmoment  **$M = 18 \text{ Nm}$**

Dieser Wirkungsgrad liegt über der einer äquivalenten ASM. Zudem hat eine PMM im Teillastbereich eine wesentlich bessere Wirkungsgradcharakteristik. Eine PMM ist somit sicherlich geeigneter für den Teillast- und „Run and Stop“-Betrieb.

Zusätzlich kann man dem Datenblatt der ASM entnehmen, dass diese ein Gewicht von 40 kg aufweist. Vergleich man den Wert mit dem Gesamtgewicht der simulierten PMM von ca. 20 kg, so ist der Unterschied doch deutlich. Bei der Simulation der PMM wurde jedoch das Gussgehäuse nicht mit einberechnet.

Dennoch kann man feststellen, dass aus weniger Volumen die gleiche Leistung wie bei einer ASM bezogen werden kann.

---

<sup>1</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und beinhaltet deshalb keine Zusatzverluste

<sup>2</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und berücksichtigt auch noch die Zusatzverluste nach Norm IEC60034-2

#### 4.1.3.2 PMM IM 15 KW - LEISTUNGSBEREICH

In dieser Leistungsklasse werden 3 verschiedene Maschinen simuliert. Die Bezeichnungen für diese lauten:

- PMM160-4-36
- PMM160-6-36
- PMM160-4-48

Diese Leistungsklasse hat eine minimale normierte Stator- / Rotorlänge (Eisenlänge)  $l_{RS}$  von 180 mm.

#### PMM160-4-36

##### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 240$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC160/2.135

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$
$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 3 - 1 = 8$$

##### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 135$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 180$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

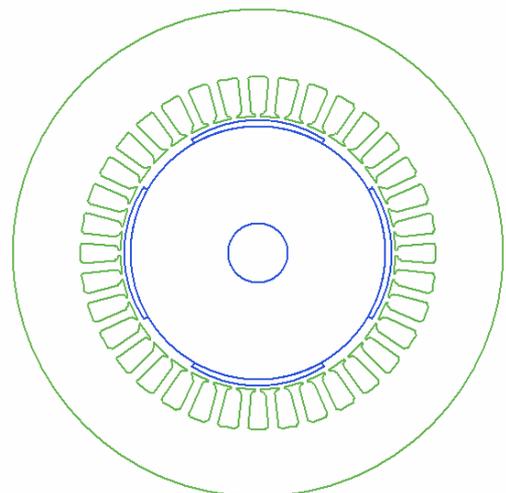


Abb. 59

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 60 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 5.605 mm.

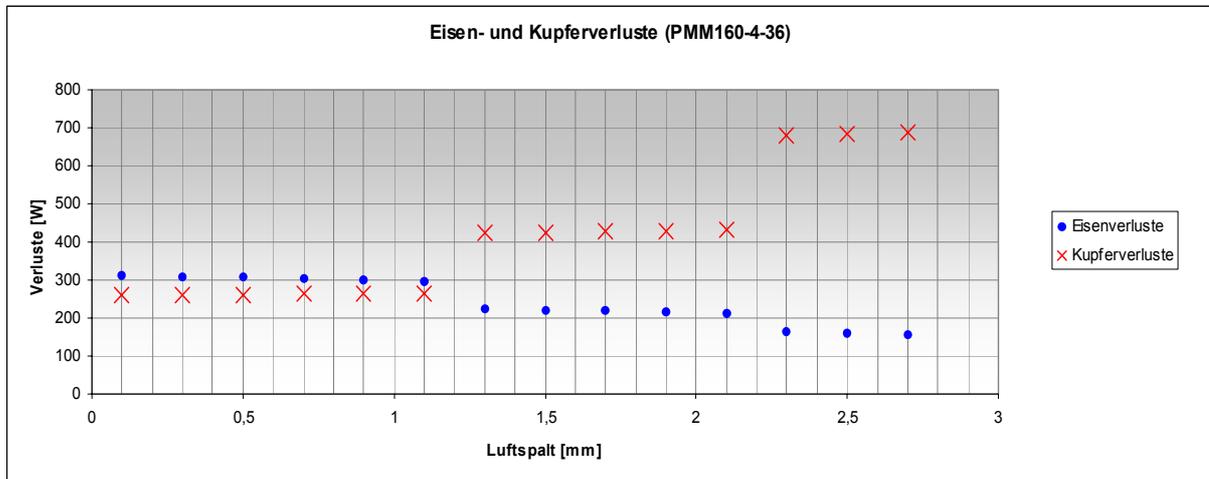


Abb. 60

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 1.15 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 61 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1.15 mm und einem berechneten *Offset* von 6.208 mm.

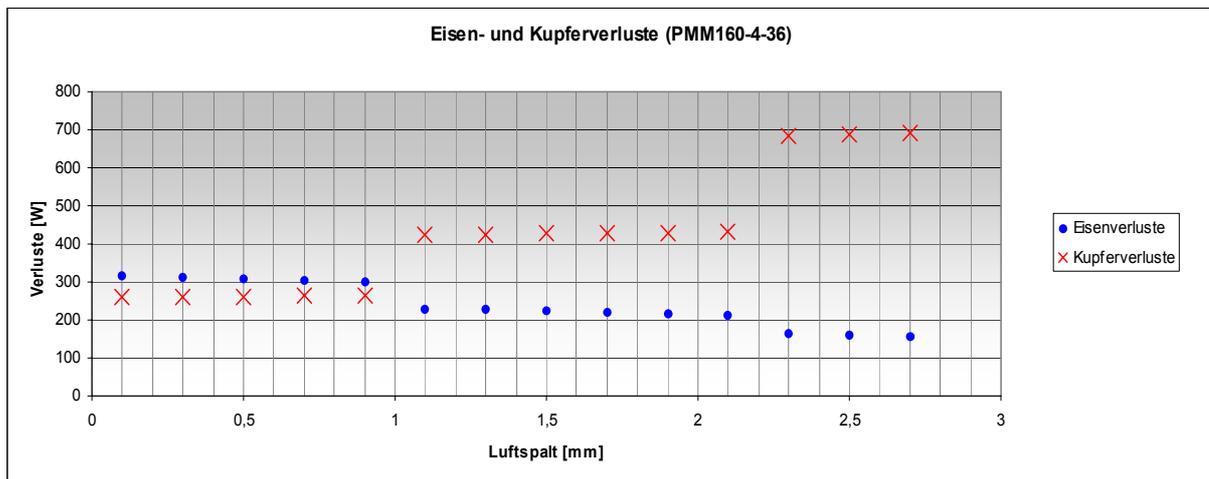


Abb. 61

Wie schon erwähnt haben wir bei der Simulation festgestellt, dass der Wirkungsgrad und das Drehmoment über den Luftspaltbereich nicht konstant bleiben. Da wir im Setup eine konstante Leistung an der Welle festlegen, muss bei grösseren Luftspaltabmessungen zwangsweise mehr Strom fließen. Dieser wiederum verursacht Kupferverluste, welche den Wirkungsgrad stark beeinflussen. Über der von uns als maximal definierten Luftspaltbreite bricht der Wirkungsgrad markant ein. Bei der Wellenleistung dieser Maschinengrösse lohnt es sich nun auch das Drehmoment zu betrachten. Bei der in

Abb. 61 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment ein Minimum auf. Der Wirkungsgrad hingegen liegt in diesem Punkt beim Maximum.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden ohne dabei den Wirkungsgrad zu sehr zu schwächen. Die Abb. 62 und 63 zeigen diesen Sachverhalt deutlich.

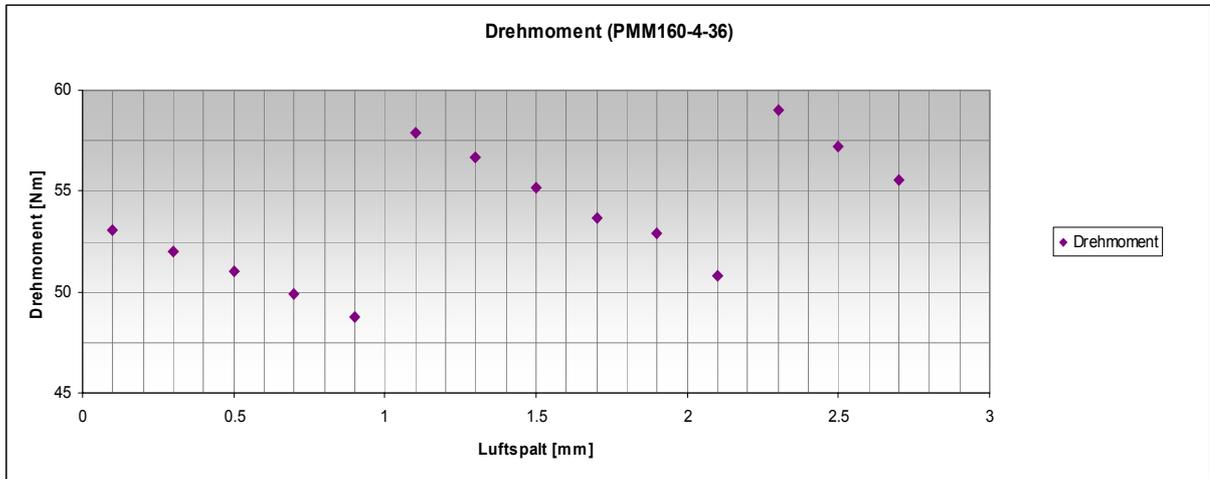


Abb. 62

Aus Abb. 61 haben wir eine Luftspaltbreite von 0.95 mm bestimmt. Anhand des Drehmomentverlaufs aus Abb. 62 liegt hier ungefähr das Minimum.

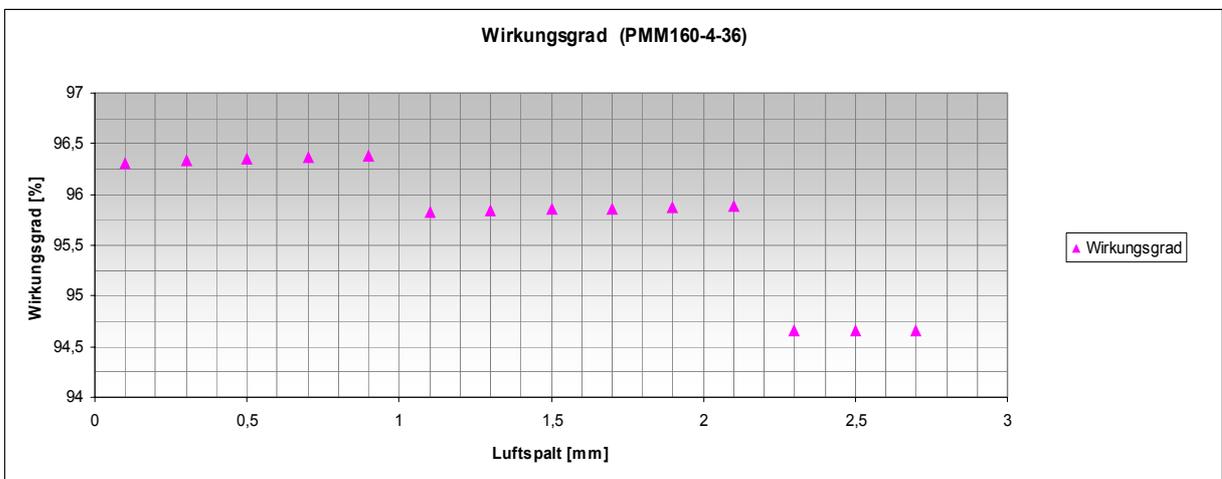


Abb. 63

Nun legen wir eine neue Konvention fest:

Energiesparende ASM aus der 15 kW - Leistungsklasse weisen ungefähr ein Drehmoment von 50 Nm auf. Auf diesen Wert beziehen wir jetzt die Luftspaltbreite des Motors. Somit beträgt die neue Luftspaltbreite ca. 0.7 mm. Wie schon beschrieben, wird die Luftspaltbreite so angesetzt, dass die Kupferverluste stets kleiner sind als die Eisenverluste. Aus diesem Grunde wird der Wert der neuen Luftspaltbreite nicht grösser gewählt als 0.95 mm. Nun stellt sich die Frage welche Auswirkung diese Massnahme auf den Wirkungsgrad hat.

Aus dem Wirkungsgradverlauf in Abb. 63 ist ersichtlich, dass er nicht zu sehr geschwächt wird und immer noch über 96% liegt.

Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **0.7 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 4.2457 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 133.6 mm. Diese Daten gelten für die Simulation der Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 64 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

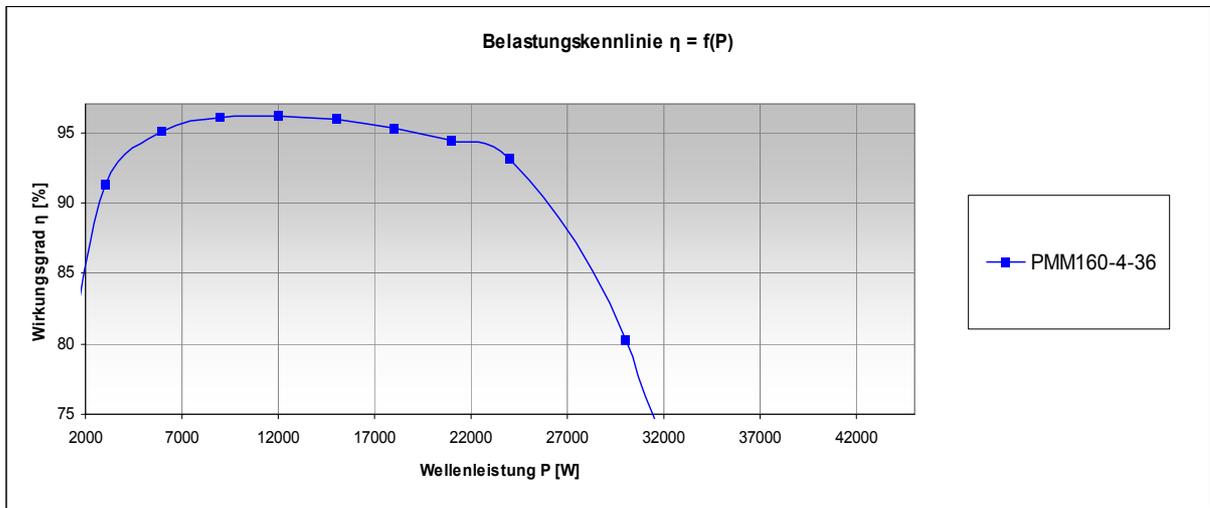


Abb. 64

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 65 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

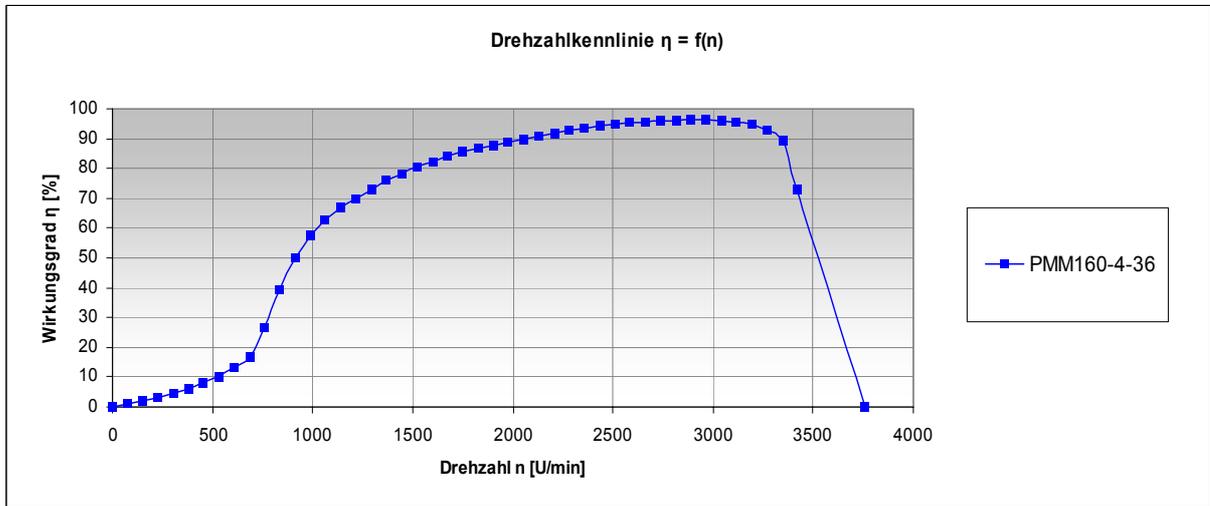


Abb. 65

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM160-4-36.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	4
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Wire Diameter (mm):	1.024
Average Coil Pitch:	8
Number of Conductors per Slot:	12

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	0.7
Type of Magnet:	NdFe35
Width of Magnet (mm):	66.1952

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	5.40078
Permanent Magnet Weight (kg):	1.07225
Armature Core Steel Weight (kg):	32.5077
Rotor Core Steel Weight (kg):	15.7002
Total Net Weight (kg):	54.6809

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	38.9081
Root-Mean-Square Armature Current (A):	36.7087
Iron-Core Loss (W):	301.473
Armature Copper Loss (W):	261.629
Total Loss (W):	563.102
Output Power (W):	15000.1
Input Power (W):	15563.2
Efficiency (%):	96.3818
Rated Speed (rpm):	2814.42
Rated Torque (N.m):	50.8952

## PMM160-6-36

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 240$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 150$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC160/4.150

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 2 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 150$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 180$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

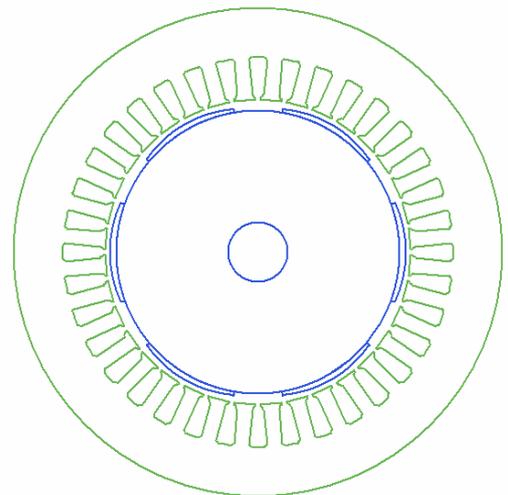


Abb. 66

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 67 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 9.929 mm.

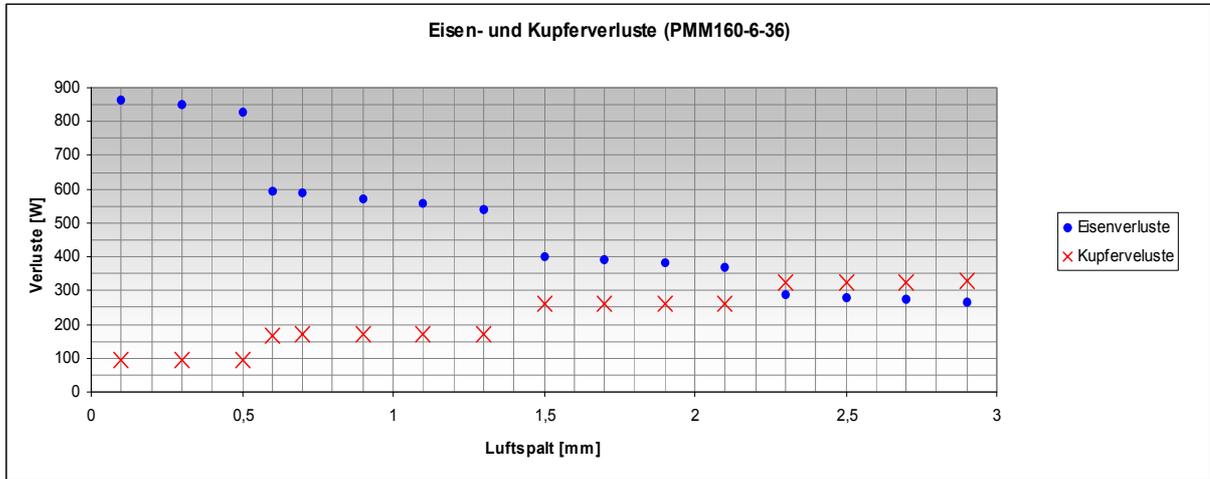


Abb. 67

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 2.25 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 68 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 2.25 mm und einem berechneten *Offset* von 14.65 mm.

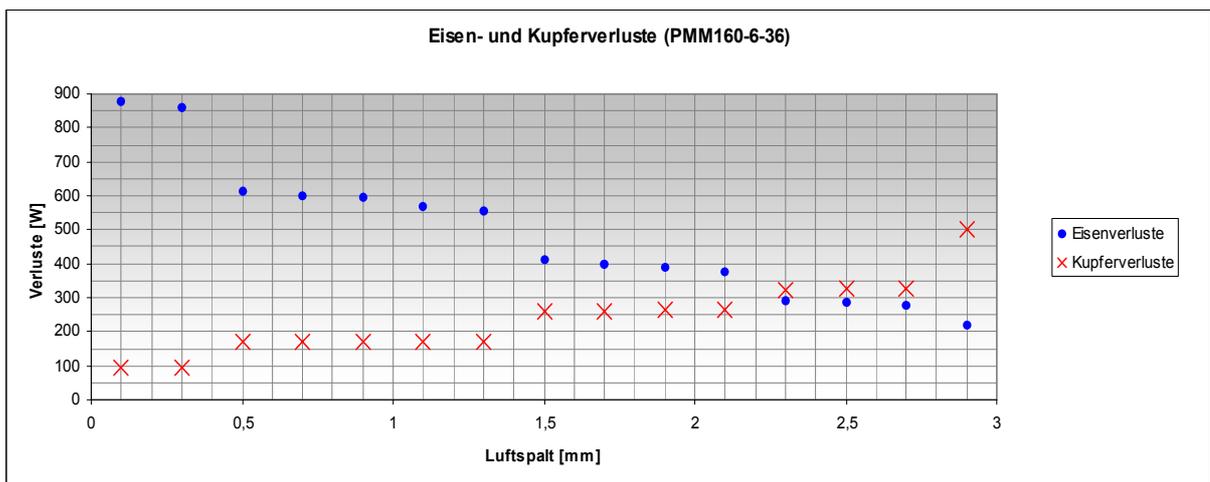


Abb. 68

Der optimale Luftspalt liegt auch nach dem 2. Iterationsschritt bei ca. 2.25 mm.

Bei der Wellenleistung dieser Maschinengrösse muss auch das Drehmoment zu betrachtet werden.

Die Funktionsverläufe aus Abb. 69 und 70 zeigen, dass genau bei 2.25 mm Luftspaltbreite ein Drehmoment von ca. 50 Nm entsteht. Deshalb muss hier keine Luftspaltverschiebung vorgenommen werden.

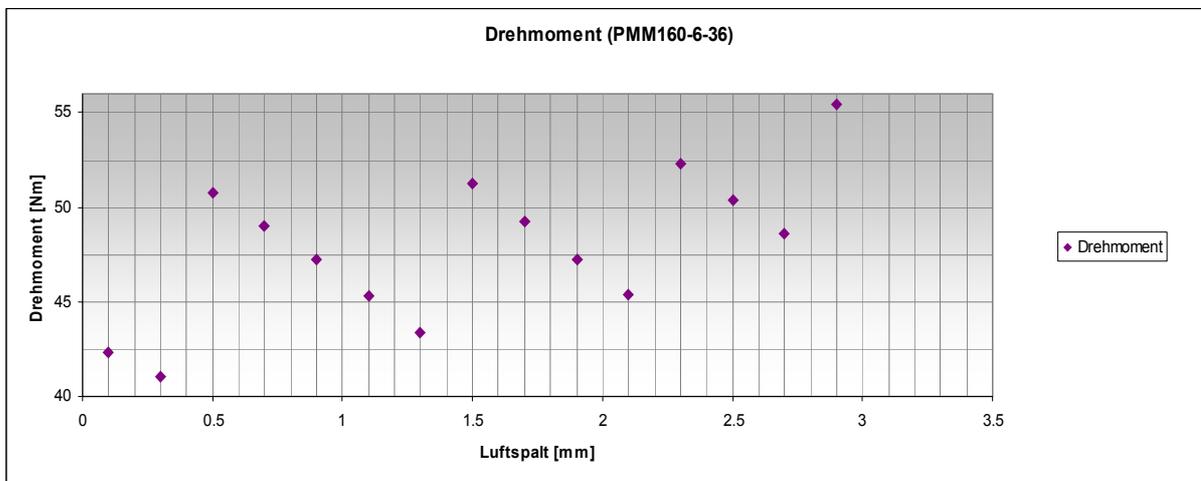


Abb. 69

Bei einer Luftspaltbreite von **2.25 mm** ist das Wirkungsgradmaximum der Maschine noch nicht erreicht. Da aber die Kupferverluste bei grösseren Abmessungen grösserer sind als die Eisenverluste wird die Simulation nicht weiter geführt.

Die Werte werden nicht angepasst und können so beibehalten werden. Somit kann ein *Offset* von 14.65 mm berechnet werden. Der Rotordurchmesser beträgt 145.5 mm.

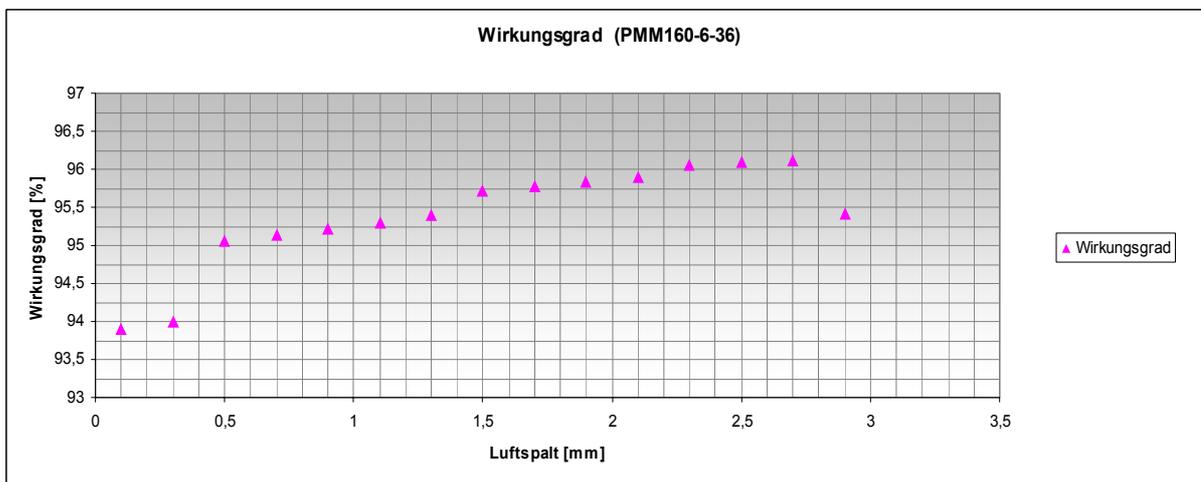


Abb. 70

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 71 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

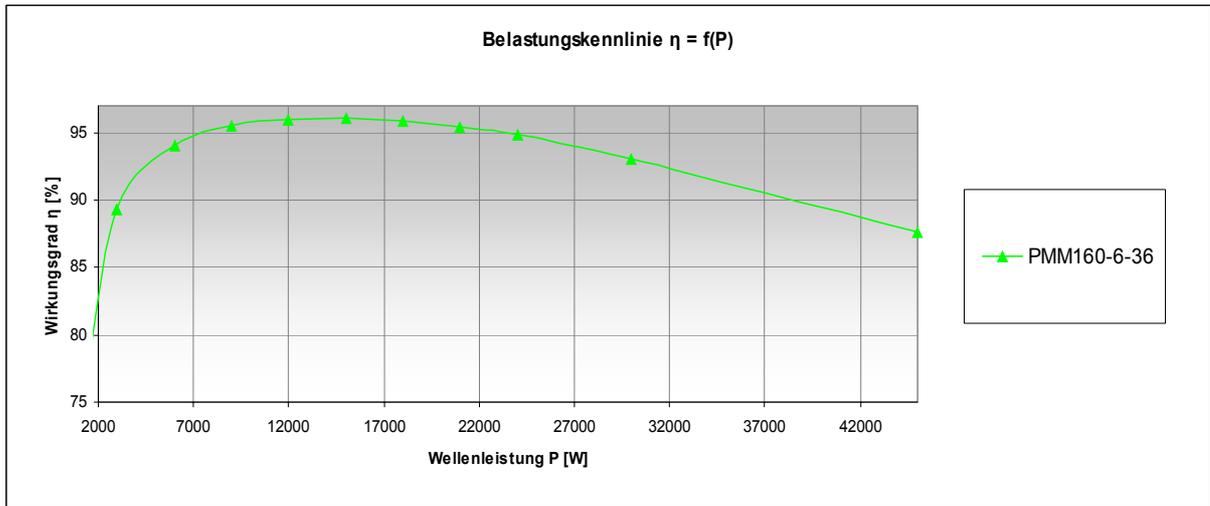


Abb. 71

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 72 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

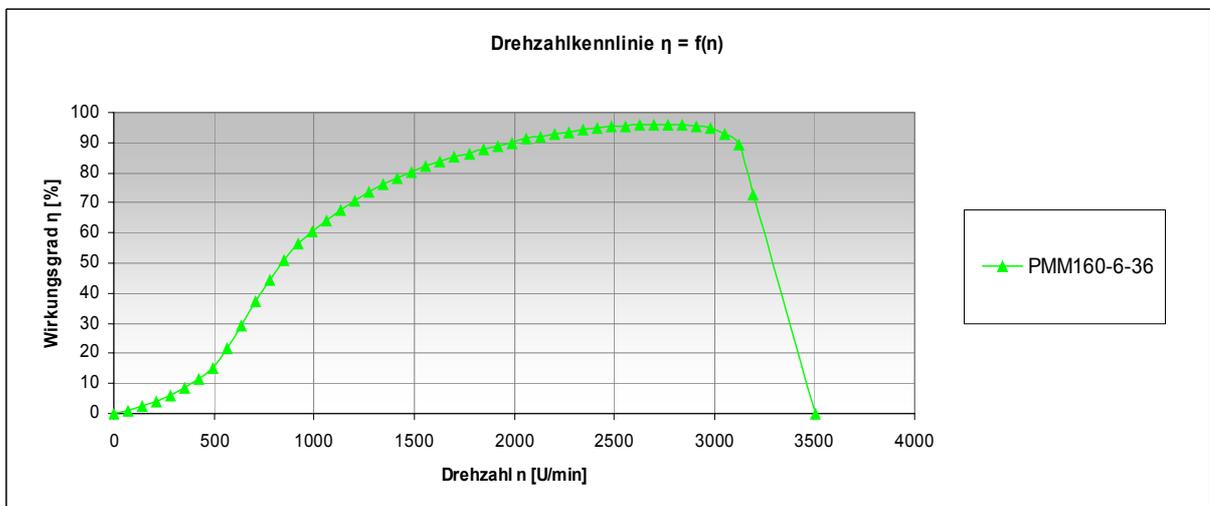


Abb. 72

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM160-6-36.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Wire Diameter (mm):	0.9116
Average Coil Pitch:	5
Number of Conductors per Slot:	14

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	2.25
Width of Magnet (mm):	49.0116
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	4.26686
Permanent Magnet Weight (kg):	1.09995
Armature Core Steel Weight (kg):	28.6607
Rotor Core Steel Weight (kg):	18.9445
Total Net Weight (kg):	52.972

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	39.043
Root-Mean-Square Armature Current (A):	36.4413
Iron-Core Loss (W):	293.556
Armature Copper Loss (W):	324.316
Total Loss (W):	617.873
Output Power (W):	14999.3
Input Power (W):	15617.2
Efficiency (%):	96.0436
Rated Speed (rpm):	2713.09
Rated Torque (N.m):	52.7934

## PMM160-4-48

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 240$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 170$  mm
- Anzahl Nuten = 48
- Typ-Nr.: IEC160/8.170

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 4 - 1 = 11$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 170$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 180$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

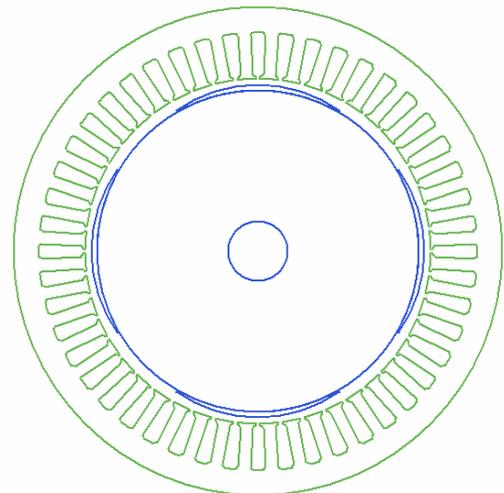


Abb. 73

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 74 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 5.913 mm.

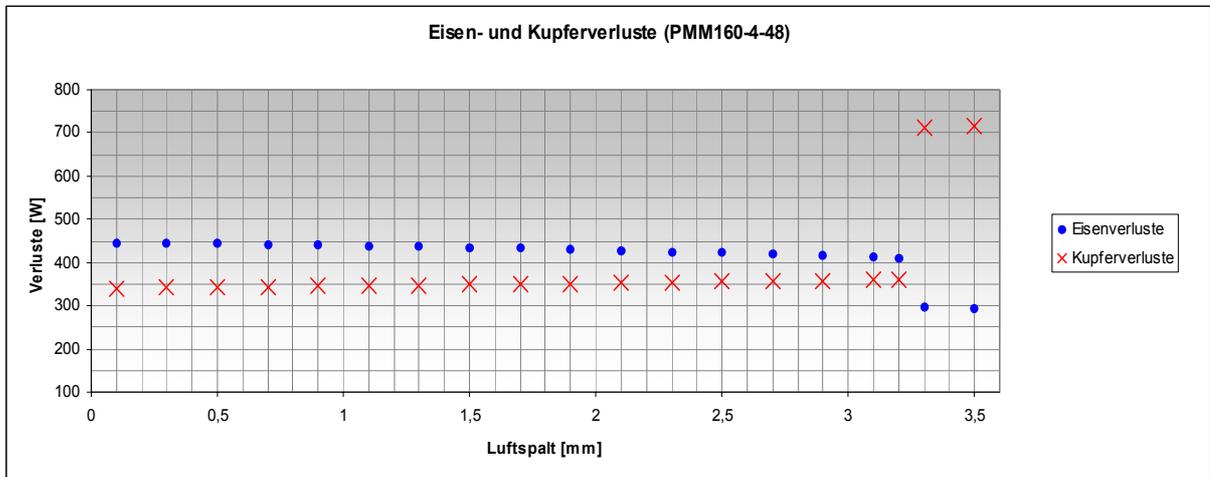


Abb. 74

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 3.22 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 75 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 3.22 mm und einem berechneten *Offset* von 12.789 mm.

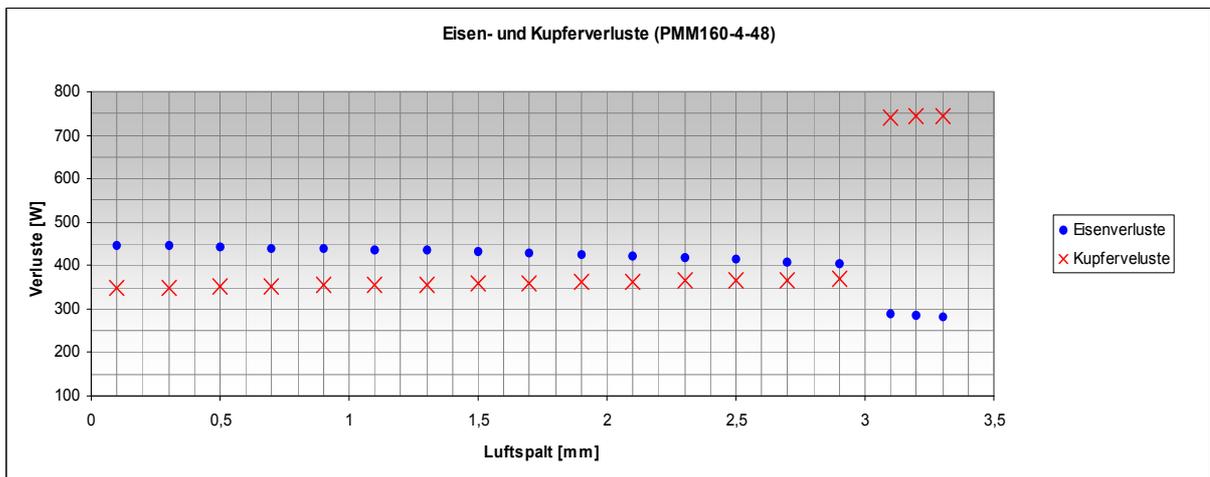


Abb. 75

Bei der in Abb. 75 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment ein Minimum auf. Der Wirkungsgrad hingegen liegt in diesem Punkt beim Maximum.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden ohne dabei den Wirkungsgrad zu sehr zu schwächen. Dieser ist über einen grossen Bereich konstant bei ca. 95%. Die Abb. 76 und 77 zeigen den Sachverhalt deutlich. Aus der Abb. 75 haben wir eine Luftspaltbreite von 2.9 mm bestimmt.

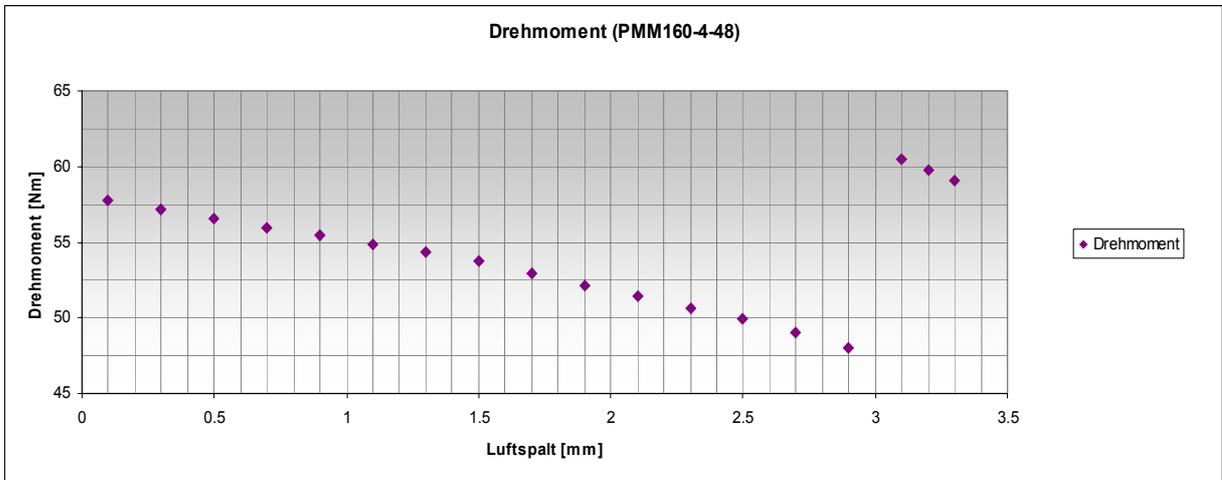


Abb. 76

Wir die neue Luftspaltbreite auf ein Moment von 50 Nm. Somit beträgt die neue Luftspaltbreite ca. 2.5 mm. Die Luftspaltbreite wird so angesetzt, dass die Kupferverluste stets kleiner sind als die Eisenverluste. Aus diesem Grund wird der Wert der neuen Luftspaltbreite nicht grösser gewählt als 2.9 mm.

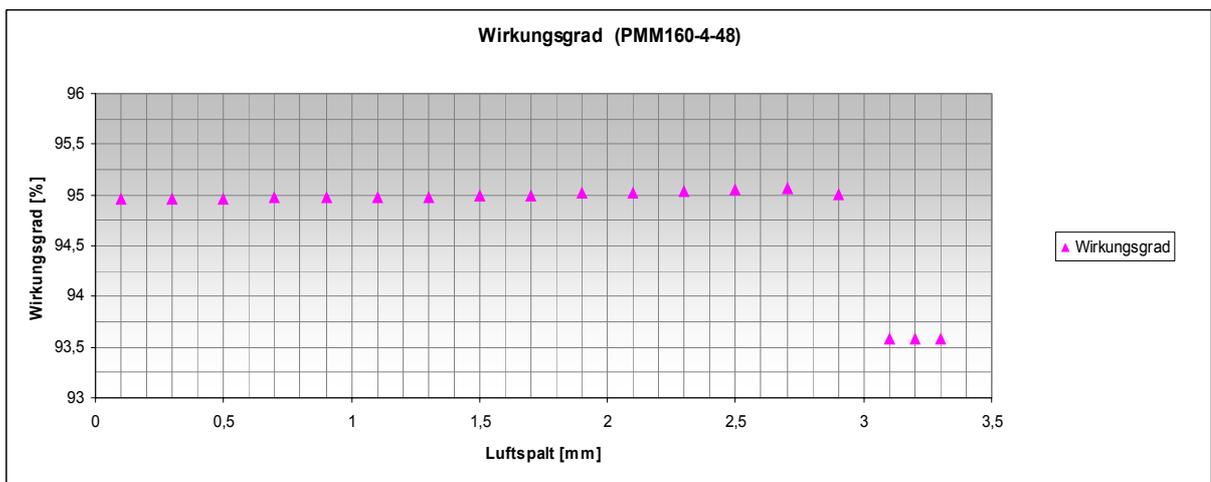


Abb. 77

Der Wirkungsgradverlauf aus Abb. 77 wird somit nicht zu sehr geschwächt und liegt immer noch bei 95%. Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **2.5 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 11.15 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 165 mm. Diese Daten gelten für die Simulation der Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 78 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

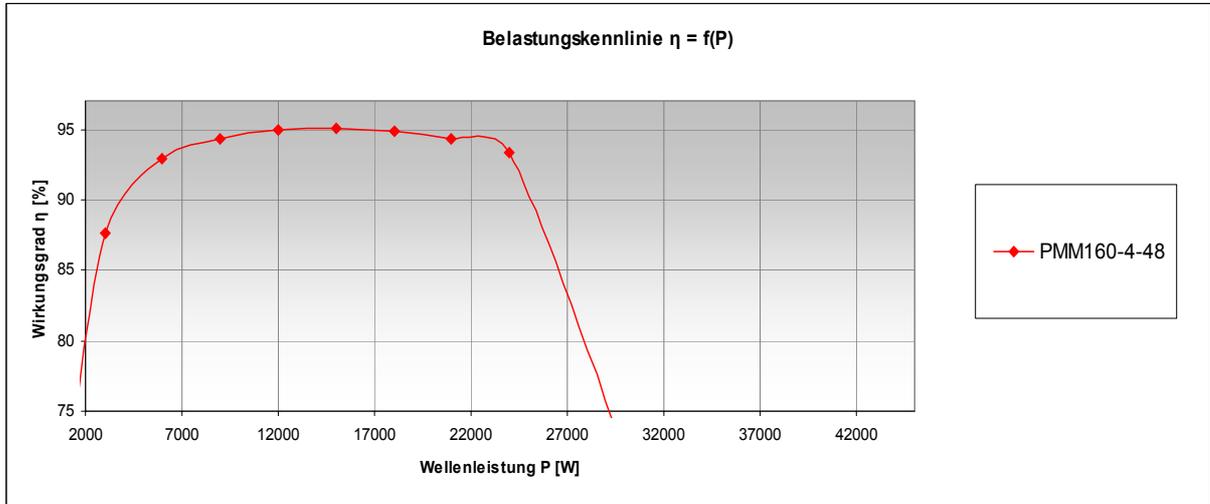


Abb. 78

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 79 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

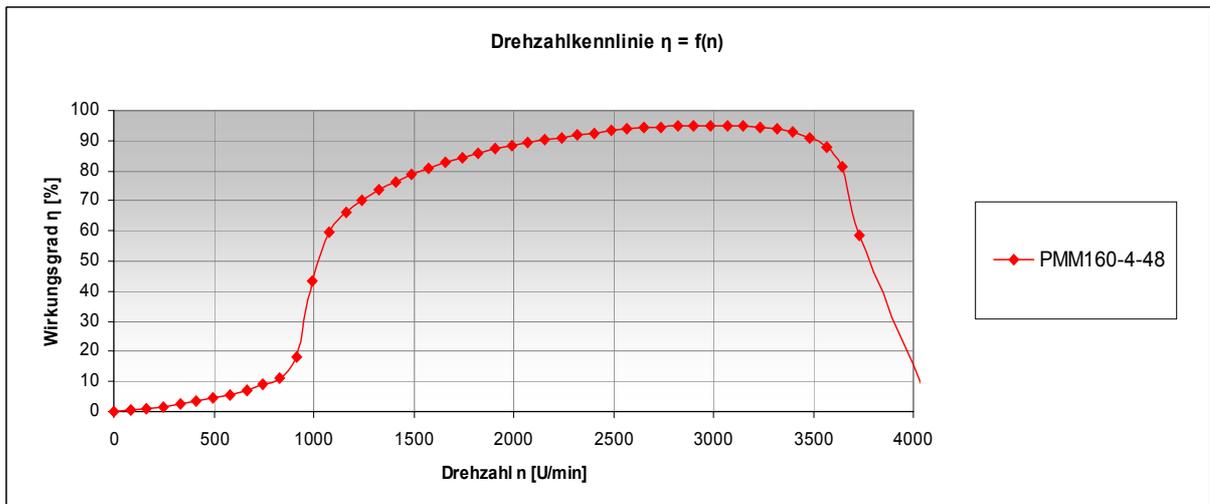


Abb. 79

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM160-4-48.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	4
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Average Coil Pitch:	11
Number of Conductors per Slot:	10
Wire Diameter (mm):	0.8118

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	2.5
Type of Magnet:	NdFe35
Width of Magnet (mm):	80.788

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	6.85089
Permanent Magnet Weight (kg):	1.15043
Armature Core Steel Weight (kg):	20.2288
Rotor Core Steel Weight (kg):	24.8858
Total Net Weight (kg):	53.1159

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	39.4486
Root-Mean-Square Armature Current (A):	38.6018
Iron-Core Loss (W):	415.847
Armature Copper Loss (W):	362.923
Total Loss (W):	778.77
Output Power (W):	15000.7
Input Power (W):	15779.4
Efficiency (%):	95.0646
Rated Speed (rpm):	2874.32
Rated Torque (N.m):	49.8364

## Auswertung und Beurteilung der Simulationsdaten

In diesen Abschnitt werden die Daten und Kurven aus der Simulation übereinander gelegt und können somit besser miteinander verglichen werden.

Die Abb. 80 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$  der 3 simulierten PMM.

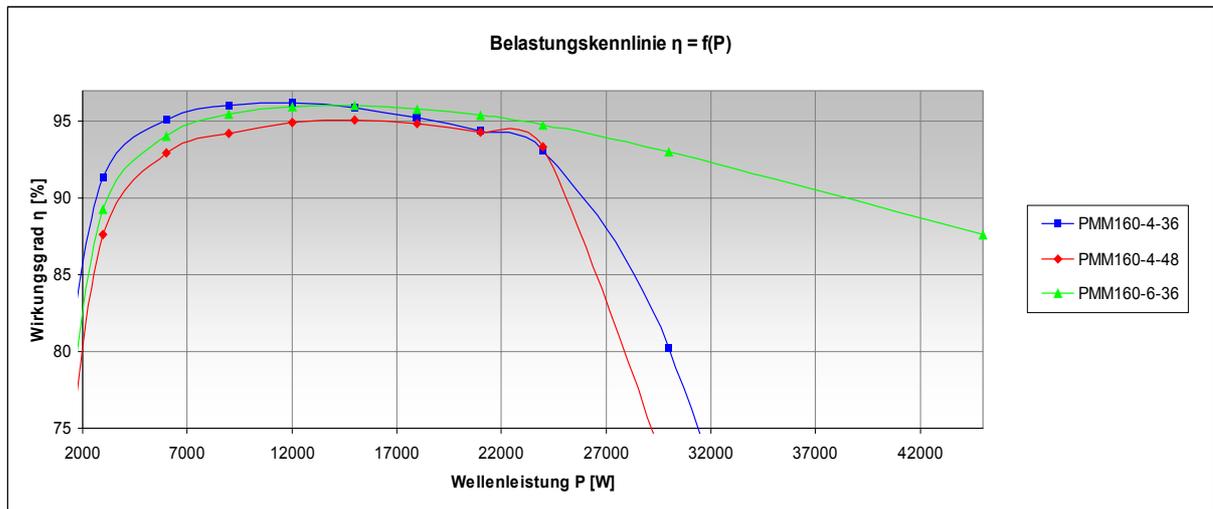


Abb. 80

Die 3 Maschinen weisen im Teillastbetrieb im Bereich der ungefähren Nennleistung von 15 kW nahezu die gleiche Charakteristik auf. Ab etwa 22 kW Wellenleistung ist eine klare Wirkungsgraddifferenz erkennbar. Diese kann an Hand des Kupferanteils erklärt werden. Die PMM160-6-36 weist nach Datenblatt 1/3 weniger Kupferanteil auf, als die Maschine mit 48 Nuten. Bei Überlast wirkt sich der zusätzliche Kupferanteil der beiden anderen Maschinen stark aus. Die Kupferverluste steigen quadratisch zum Strom. Im Bereich der Nennleistung (12 - 18 kW) fließen bei allen Maschinen ungefähr die gleichen Ströme. Deshalb liegen die Kennlinien in diesem Bereich enger zusammen.

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass die Verluste der PMM160-4-48 über den ganzen Luftspaltbereich sehr ausgeglichen sind (siehe Abb. 75). Der Wirkungsgrad bleibt beinahe über den ganzen Luftspaltbereich konstant. Somit ist diese Konstruktion wenig sensitiv auf allfällige Luftspaltvariationen. Die Maschine weist zwar nicht den besten Wirkungsgrad und das beste Teillastverhalten auf, hat aber dennoch ihre Vorteile.

Bei dieser Konstruktion (PMM160-4-48) sind Eisen- und Kupferverluste gleichmässig über einen grossen Luftspaltbereich verteilt (siehe Abb. 75). Das gleiche Verhalten zeigt sich auch bei der PMM132-4-48 in der 5.5 kW-Leistungsklasse.

Da diese Wirkungsgradverläufe nicht alle Verluste beinhalten, stützen wir uns auf die Norm IEC 60034-2. Sie beschreibt die Zusatzverluste pauschal mit einem Wert in Prozent der aufgenommenen Leistung. Sie können über den gesamten Belastungsbereich als konstant angenommen werden. In dieser Leistungsklasse kann dieser Wert maximal 1.5% der Nennleistung aufweisen. Das ergibt in Abb. 80 eine konstante Verschiebung der Kurven nach unten.

Die Abb. 81 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$  der 3 simulierten PMM.

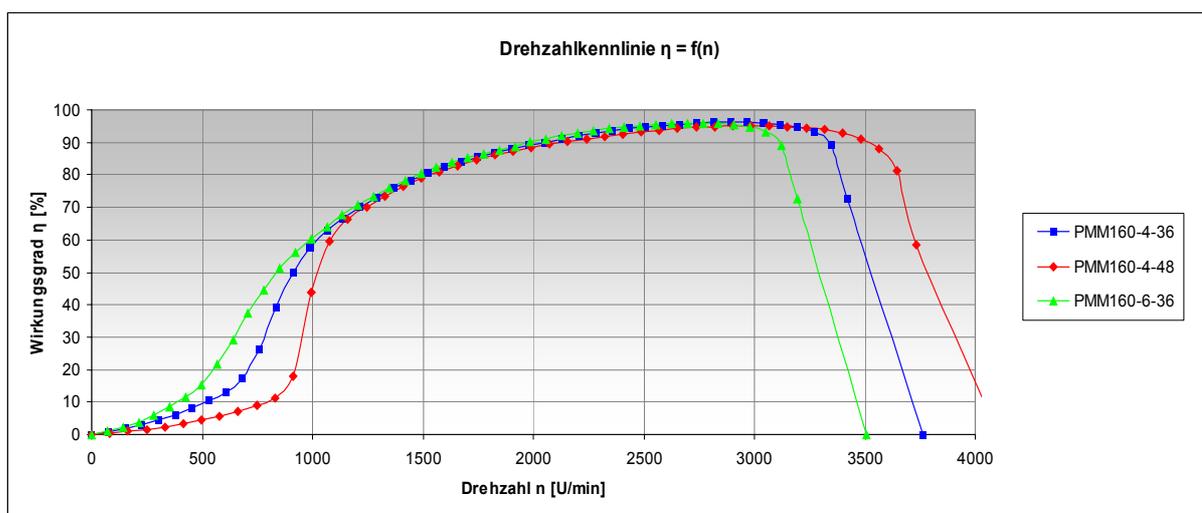


Abb. 81

Bei der Abb. 78 fällt sofort auf, dass die Maschine mit 48 Nuten (PMM160-4-48) über einen grösseren Drehzahlbereich (2000 - 3500 U/min) einen Wirkungsgrad von über 90% aufweist. Der Grund dafür liegt in der Bewicklung der Maschine. Die PMM160-4-48 weist gegenüber den andern Maschinen am wenigsten Windungen pro Nute auf. Das Optimum aus Drehzahl- und Belastungskennlinie dieser Maschine liegt bei der erwähnten kleinen Windungszahl. Werden mehr Windungen pro Nute verwendet, kann einerseits die resultierende Nenndrehzahl abnehmen und andererseits steigen durch den zusätzlichen Kupferanteil die damit verbundenen Kupferverluste, die wiederum den Wirkungsgrad negativ beeinflussen. Die Belastungskennlinie der PMM160-4-48 (Abb. 80) würde dadurch noch stärker abgesenkt. Die Drehzahlkennlinie der Maschinen mit 36 Nuten verläuft unterhalb 3000 U/min beinahe identisch. Über 3000 U/min bricht die 6-polige Maschine eher ein, da diese mehr Windungen als die 4-polige Maschine hat.

Die Daten der Maschinen können je nach Setup der Simulation variieren. Bei der iterativen Berechnung wurde festgestellt, dass das Drehmoment je nach Luftspaltbreite auch variieren kann. Die Abweichungen des Drehmoments waren im Bereich von 10 Nm. Aus diesem Grund haben wir das Drehmoment auch berücksichtigt um die optimale Luftspaltbreite zu bestimmen. Die Luftspaltbreite wurde bei einem Drehmoment von ca. 50 Nm angesetzt, ohne den Wirkungsgrad stark negativ zu beeinflussen.

Die folgenden Tabellen zeigen den direkten Vergleich der PMM und ASM. Für den Vergleich dient ein Energiesparmotor nach der EFF1 Norm, eines namhaften europäischen Herstellers.

	Wirkungsgrad $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
IEC160L	91.3	49	2925

	Wirkungsgrad <sup>3</sup> $\eta$ [%]	korrigierter Wirkungsgrad <sup>4</sup> $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
PMM160-4-36	96.38	94.88	50.89	2814.42
PMM160-6-36	96.04	94.54	52.79	2713.09
PMM160-4-48	95.06	93.56	49.83	2874.32

Ganz allgemein kann man festhalten, dass eine PMM160 in etwa folgende Daten aufweist.

- Wirkungsgrad  **$\eta = 94 \%$**
- Drehmoment  **$M = 50 \text{ Nm}$**

Dieser Wirkungsgrad liegt über der einer äquivalenten ASM. Zudem hat eine PMM im Teillastbereich eine wesentlich bessere Wirkungsgradcharakteristik in Bezug. Eine PMM ist somit sicherlich geeigneter für den Teillast- und „Run and Stop“-Betrieb.

Zusätzlich kann man den Datenblatt der ASM entnehmen, dass diese ein Gewicht von 82 kg aufweist. Vergleicht man den Wert mit dem Gesamtgewicht der simulierten PMM von ca. 55 kg, so ist der Unterschied doch deutlich. Bei der Simulation der PMM wurde jedoch das Gussgehäuse nicht mit einberechnet.

Dennoch kann man feststellen, dass aus weniger Volumen die gleiche Leistung wie bei einer ASM bezogen werden kann.

---

<sup>3</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und beinhaltet deshalb keine Zusatzverluste

<sup>4</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und berücksichtigt auch noch die Zusatzverluste nach Norm IEC60034-2

#### 4.1.3.3 PMM IM 55 KW - LEISTUNGSBEREICH

In dieser Leistungsklasse werden 4 verschiedene Maschinen simuliert. Die Bezeichnungen für diese lauten:

- PMM250-4-36
- PMM250-6-36
- PMM250-4-48
- PMM250-8-48

Diese Leistungsklasse hat eine minimale normierte Stator- / Rotorlänge (Eisenlänge)  $l_{RS}$  von 240 mm.

#### PMM250-4-36

##### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 375$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 215$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC250/2.215

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 3 - 1 = 8$$

##### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess* Katalog [1] (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 215$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 240$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf jede Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

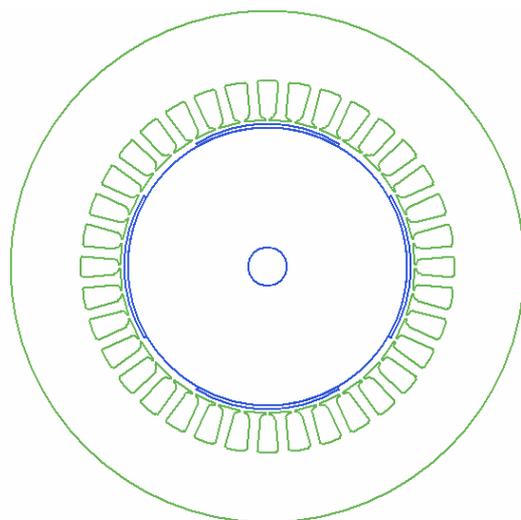


Abb. 82

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 83 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 6.168 mm.

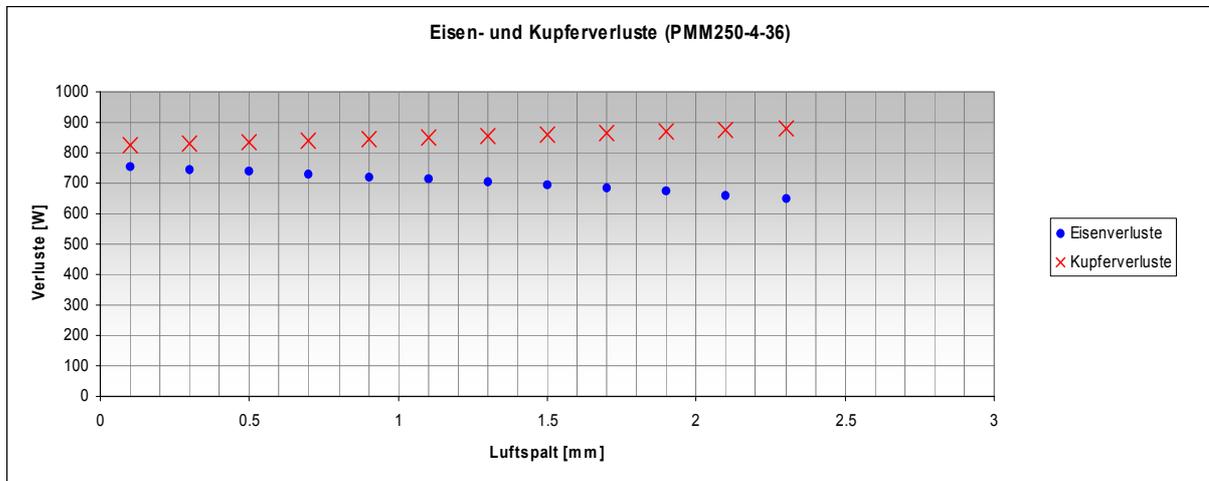


Abb. 83

Bei der Konstellation mit 4 Polen und 36 Nuten zeigt die Simulation, dass die Kupferverluste immer grösser sind als die Eisenverluste. Folglich können wir hier die Annahme der Verteilung der Verluste zu je 50% auf Eisen und Kupfer nicht anwenden.

In dieser Leistungsklasse macht der behandelte Aufbau für einen energiesparenden und effizienten Motor wenig Sinn, da die Wicklungen zunehmend belastet werden.

Der Schnittpunkt der Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  könnte man durch eine einfache Massnahme „erzwingen“. Durch ein grösseres Magnetvolumen würde man automatisch die Eisenverluste erhöhen. Damit könnte man ein solcher Schnittpunkt realisiert werden. Durch diese zusätzlichen Eisenverluste wird allerdings der Wirkungsgrad gesenkt.

Eine andere Methode wäre, dass man die Nennleistung der Maschine reduziert (z.B. 40 kW). Dadurch würde man die Kupferverluste reduzieren, was wiederum ein Schnittpunkt der beiden Kennlinien zu Folge hat.

Da diese Maschine nicht unsere Bedingungen an einen effizienten PMM erfüllt, wird die Simulation hier abgebrochen.

## PMM250-6-36

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 375$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 215$  mm
- Anzahl Nuten = 36
- Typ-Nr.: IEC250/2.215

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 2 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess* Katalog [1] (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 215$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 240$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

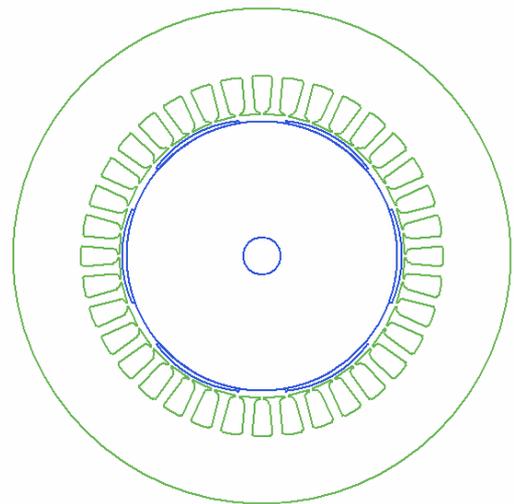


Abb. 84

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 85 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 11.332 mm.

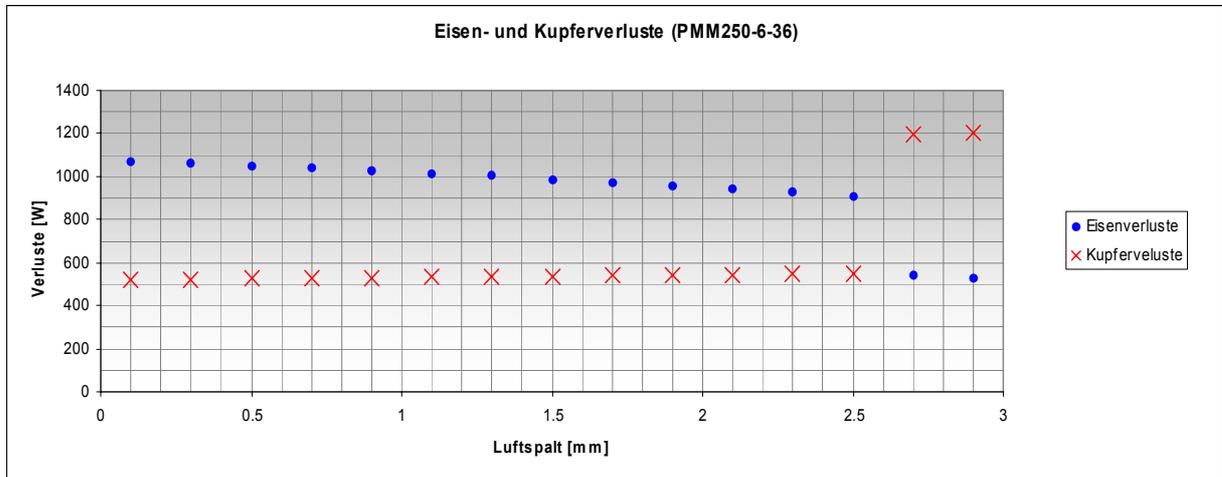


Abb. 85

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 2.57 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 86 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 2.57 mm und einem berechneten *Offset* von 19.189 mm.

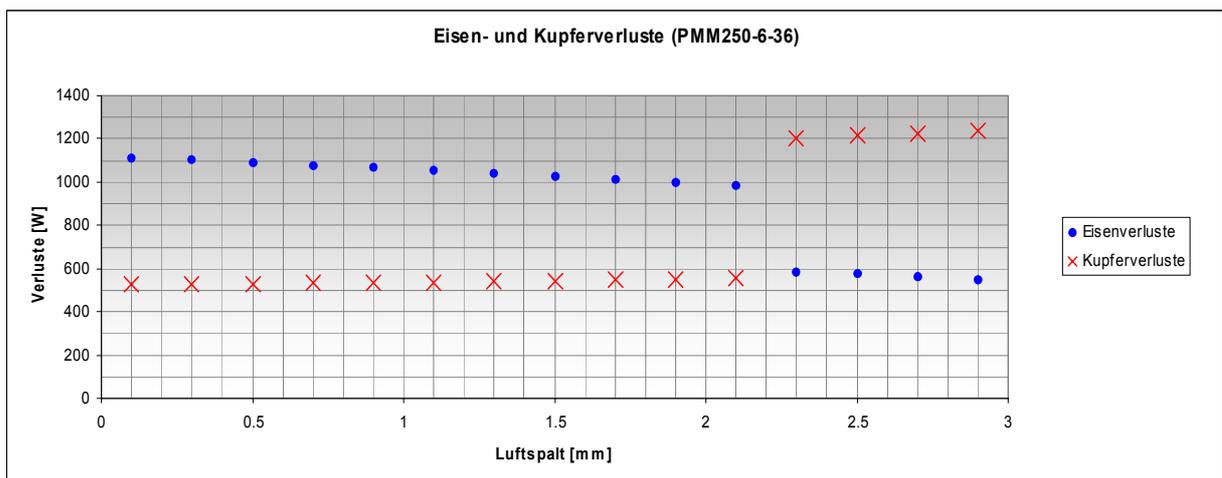


Abb. 86

Bei der in Abb. 86 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment ein Minimum auf. Der Wirkungsgrad hingegen liegt in diesem Punkt beim Maximum.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden ohne dabei den Wirkungsgrad allzu sehr zu schwächen. Dieser ist über einen grossen Bereich deutlich über 97%. Die

Abb. 87 und 88 zeigen diesen Sachverhalt deutlich. Aus Abb. 85 haben wir eine Luftspaltbreite von 2.18 mm bestimmt.

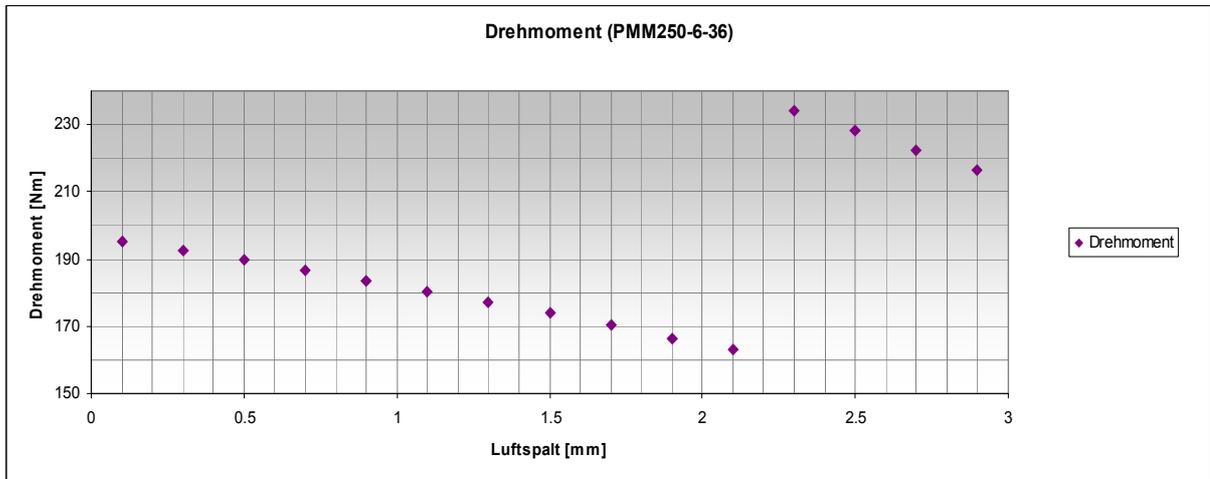


Abb. 87

Wie schon angewendet, beziehen wir die neue Luftspaltbreite auf das Moment, welches in dieser Leistungsklasse von einer ASM (EFF1) erzielt wird (175 Nm). Somit beträgt die neue Luftspaltbreite ca. 1.3 mm. Die Luftspaltbreite wird so angesetzt, dass die Kupferverluste stets kleiner sind als die Eisenverluste. Aus diesem Grund wird der Wert der neuen Luftspaltbreite nicht grösser gewählt als 2.18 mm.

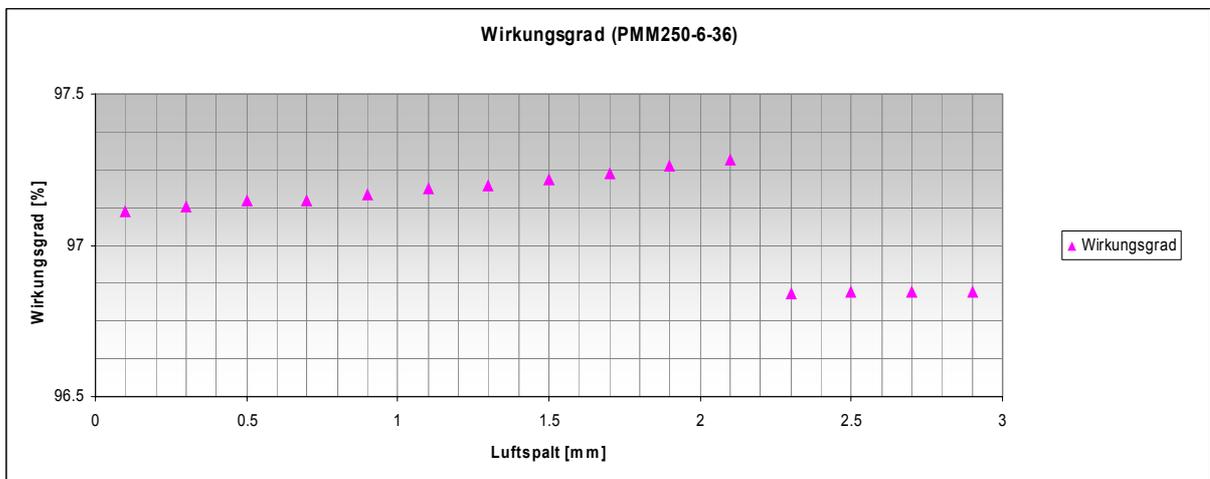


Abb. 88

Der Wirkungsgradverlauf aus Abb. 88 wird somit nicht zu sehr geschwächt und liegt immer noch deutlich über 97%. Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **1.3 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 13.418 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 212.4 mm. Diese Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 89 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

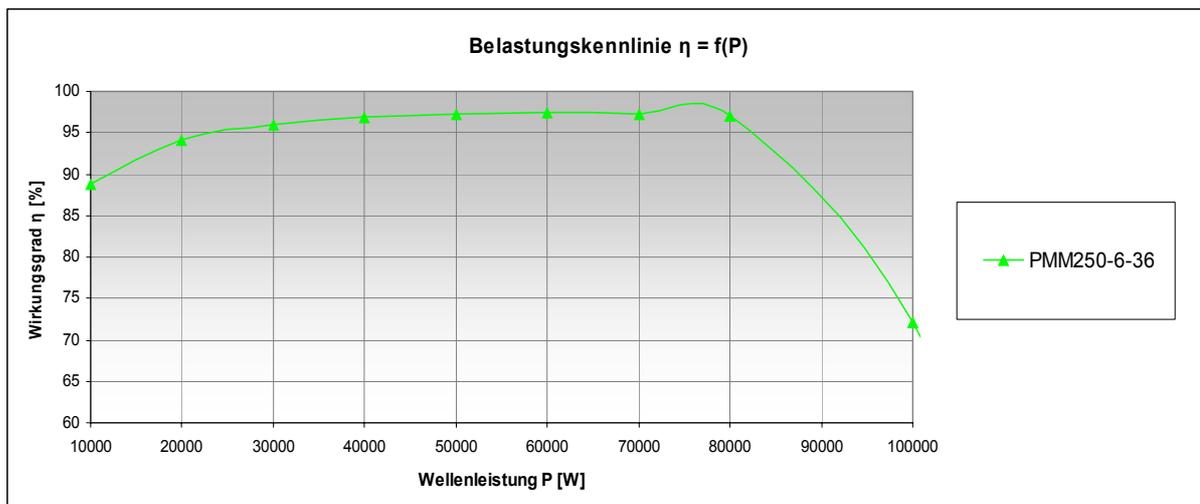


Abb. 89

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 90 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

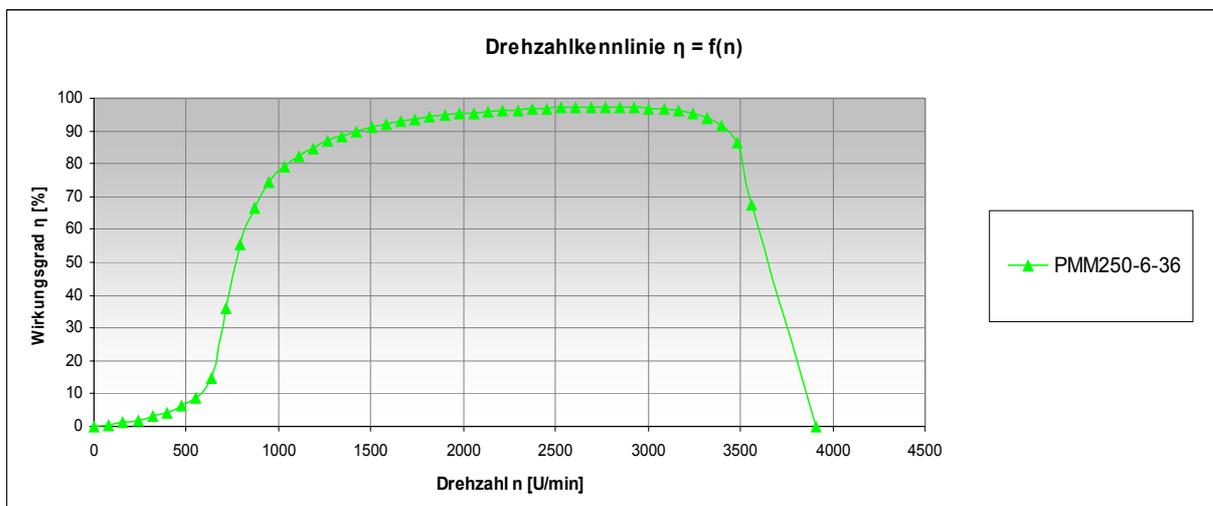


Abb. 90

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM250-6-36.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	55
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Average Coil Pitch:	5
Wire Diameter (mm):	1.024
Number of Conductors per Slot:	6

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.3
Width of Magnet (mm):	72.0132
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	13.2654
Permanent Magnet Weight (kg):	2.20607
Armature Core Steel Weight (kg):	105.238
Rotor Core Steel Weight (kg):	56.7524
Total Net Weight (kg):	177.462

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	141.373
Root-Mean-Square Armature Current (A):	140.807
Iron-Core Loss (W):	1012.9
Armature Copper Loss (W):	535.995
Total Loss (W):	1548.89
Output Power (W):	55000.2
Input Power (W):	56549.1
Efficiency (%):	97.261
Rated Speed (rpm):	2867.92
Rated Torque (N.m):	183.134

## PMM250-4-48

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 375$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Anzahl Nuten = 48
- Typ-Nr.: IEC250/4.240

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 4 - 1 = 11$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 240$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

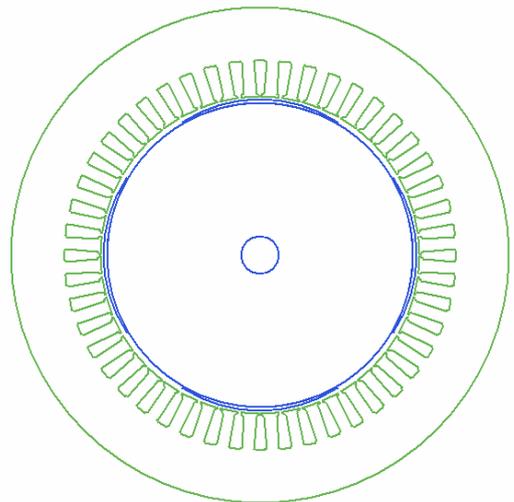


Abb. 91

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 92 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 6.4125 mm.

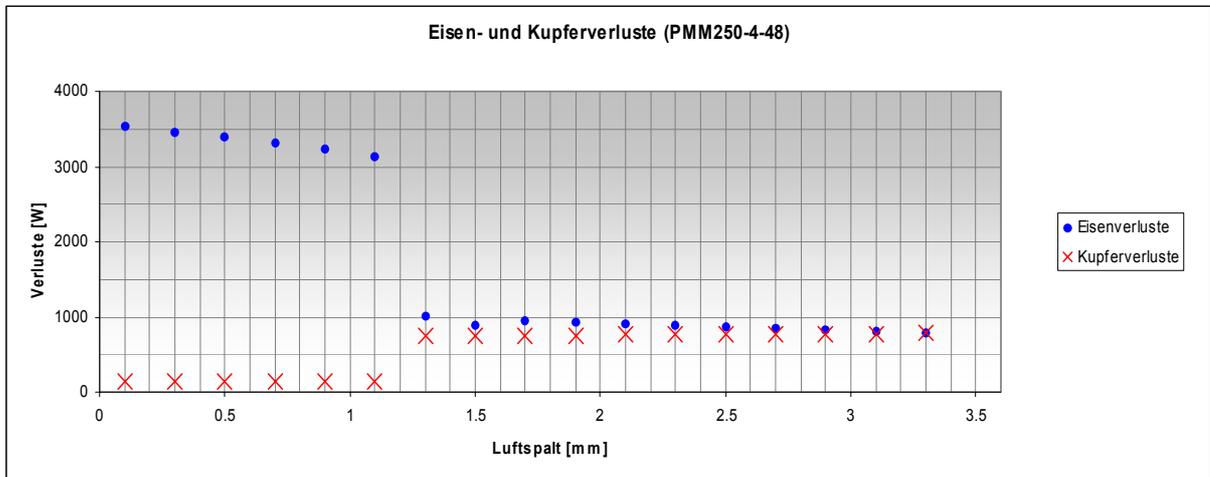


Abb. 92

Aus dem Diagramm kann keine optimale Luftspaltbreite herausgelesen werden. Aus diesem Grund setzen wir die Luftspaltbreite bei 2.5 mm fest. Damit kann ein neuer Offset berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten Offset durchgeführt um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 93 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 2.5 mm und einem berechneten *Offset* von 12.687 mm.

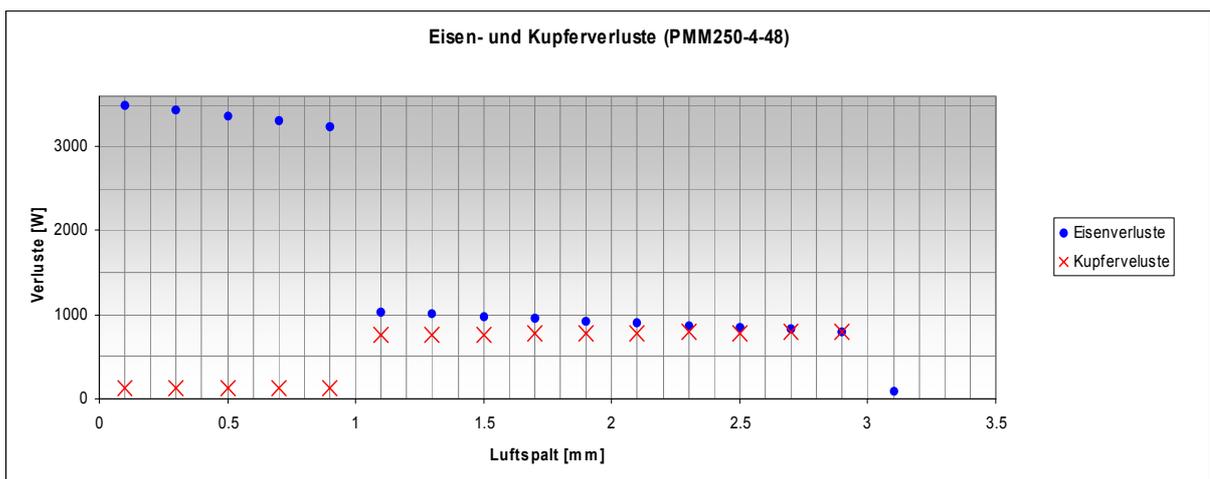


Abb. 93

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden ohne dabei den Wirkungsgrad zu sehr zu schwächen. Dieser ist über einen grossen Bereich bei ca. 97%. Die Abb. 94 und 95 zeigen diesen Sachverhalt deutlich. Aus Abb. 93 haben wir eine Luftspaltbreite von 2 mm bestimmt.

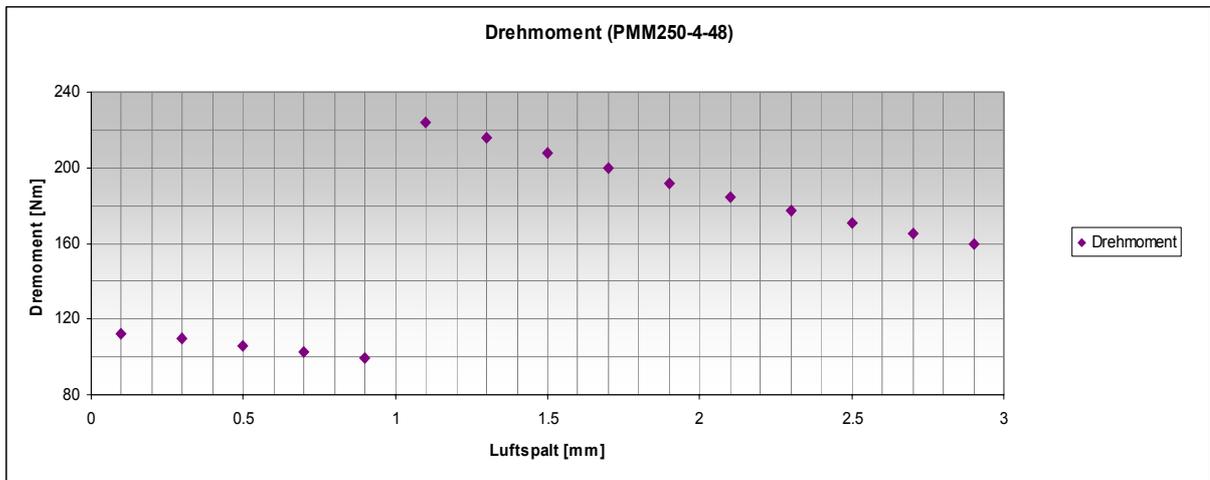


Abb. 94

Wie schon angewendet, beziehen wir die neue Luftspaltbreite auf das Moment, welches in dieser Leistungsklasse von einer ASM (EFF1) erzielt wird (175 Nm). Aus Abb. 93 kann ein Drehmoment von ca. 185 Nm herausgelesen werden. Aus diesem Grund werden die Werte nicht angepasst und können so beibehalten werden.

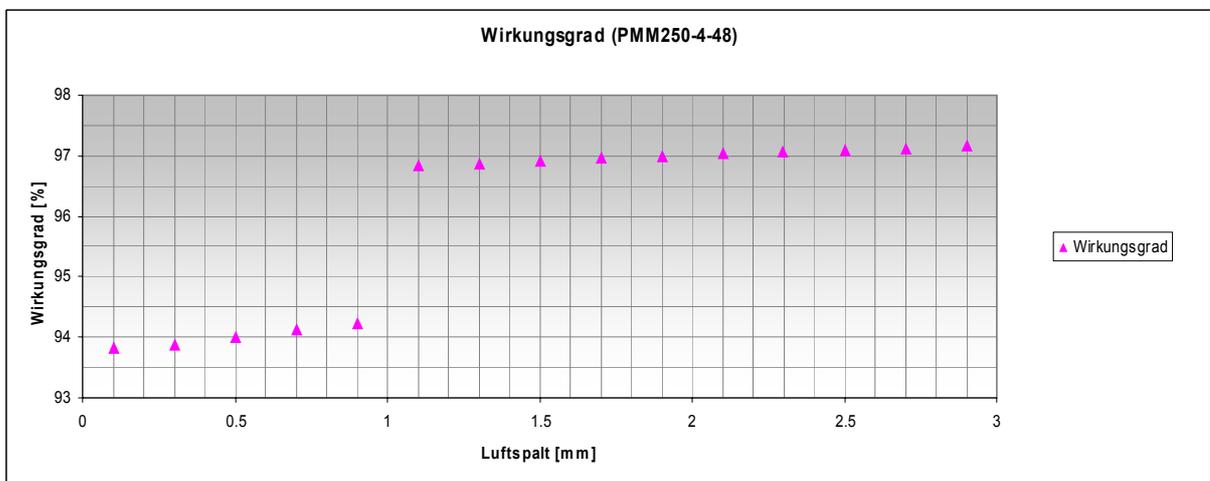


Abb. 95

Der Wirkungsgradverlauf aus Abb. 95 wird somit nicht zu sehr beeinträchtigt und liegt immer noch bei 97%. Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **2 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 10.683 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 236 mm.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 96 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

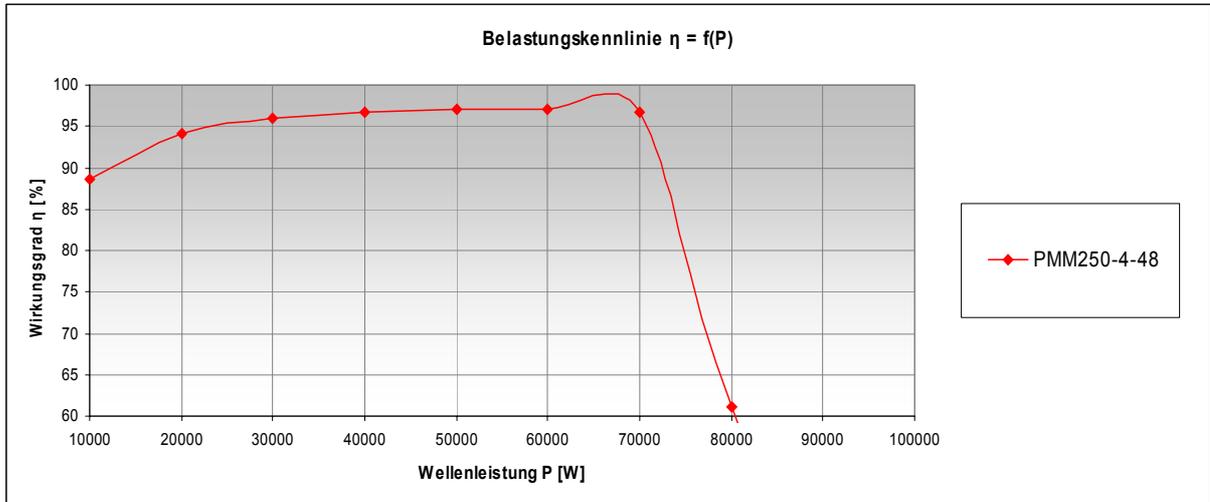


Abb. 96

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 97 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

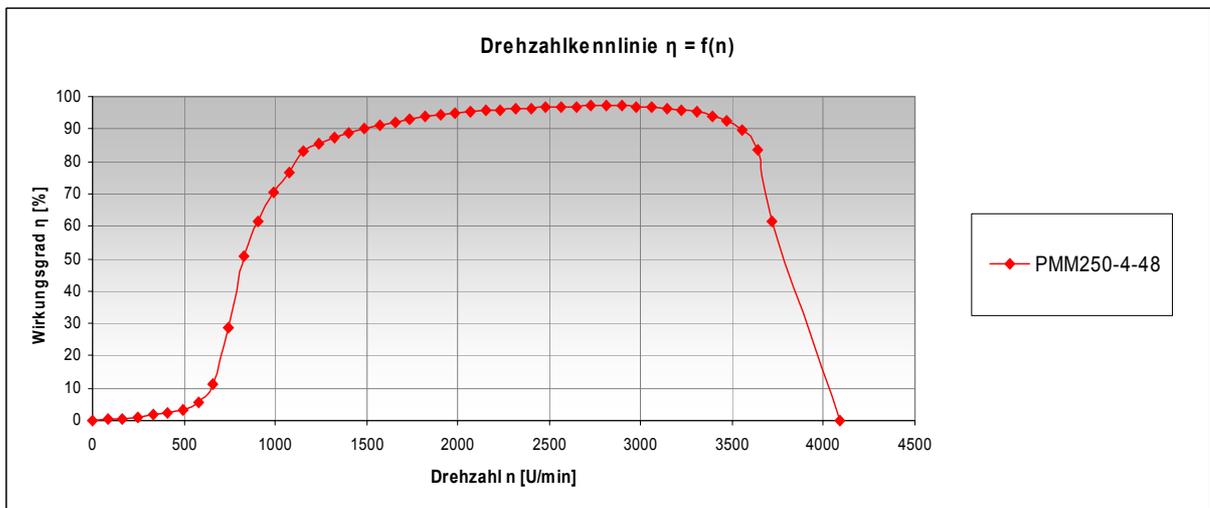


Abb. 97

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM250-4-48.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	55
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	4
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Average Coil Pitch:	11
Number of Conductors per Slot:	4
Wire Diameter (mm):	0.9116

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	2
Width of Magnet (mm):	116.397
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
Coercive Force (kA/m):	978.832
Maximum Energy Density (kJ/m <sup>3</sup> ):	300.991

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	15.3112
Permanent Magnet Weight (kg):	2.24535
Armature Core Steel Weight (kg):	94.3473
Rotor Core Steel Weight (kg):	70.7688
Total Net Weight (kg):	182.673

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	141.718
Root-Mean-Square Armature Current (A):	154.566
Iron-Core Loss (W):	910.882
Armature Copper Loss (W):	774.291
Total Loss (W):	1685.17
Output Power (W):	55002.1
Input Power (W):	56687.2
Efficiency (%):	97.0272
Rated Speed (rpm):	2769.37
Rated Torque (N.m):	189.658

## PMM250-8-48

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 375$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Anzahl Nuten = 48
- Typ-Nr.: IEC250/4.240

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 4 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess* Katalog [1] (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 240$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

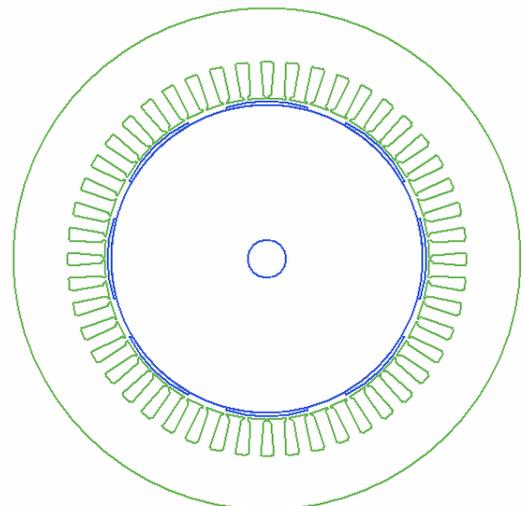


Abb. 98

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 99 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 16.879 mm.

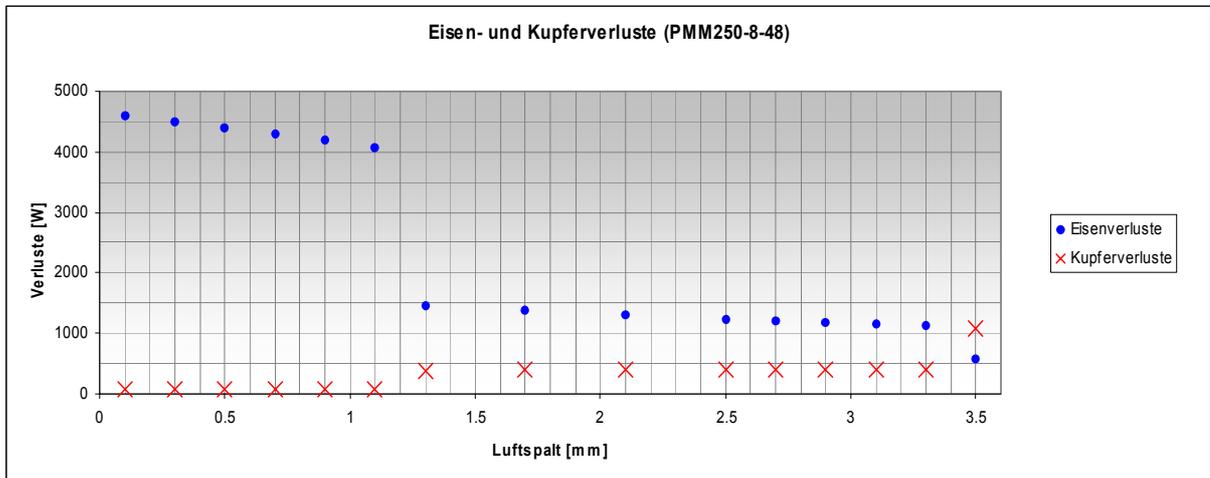


Abb. 99

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 3.43 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 100 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 3.43 mm und einem berechneten *Offset* von 27.85 mm.

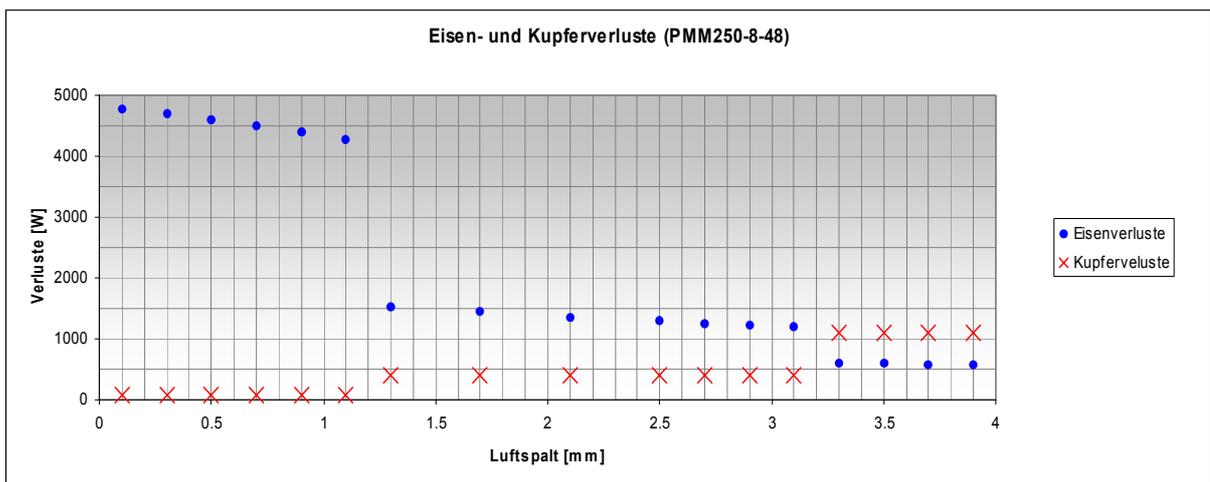


Abb. 100

Bei der in Abb. 100 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment nicht den normierten Wert auf.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment angepasst werden ohne dabei den Wirkungsgrad zu sehr zu schwächen. Dieser ist über einen grossen Bereich bei ca. 97%. Die Abb. 101 und 102 zeigen diesen Sachverhalt deutlich. Aus Abb. 100 haben wir eine Luftspaltbreite von 2 mm bestimmt.

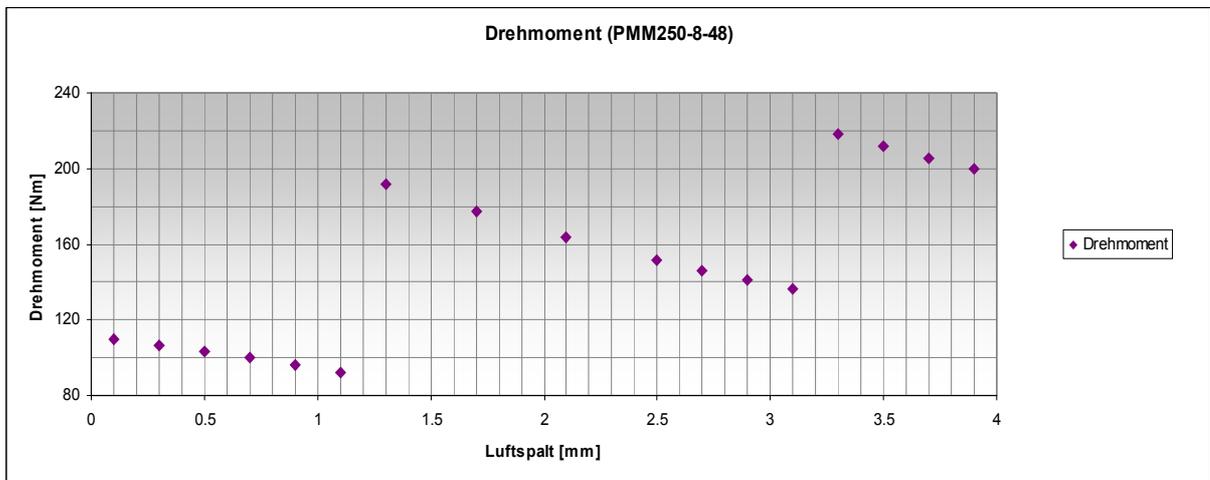


Abb. 101

Aus Abb. 100 kann ein Drehmoment von ca. 170 Nm herausgelesen werden. Aus diesem Grund wird die Luftspaltbreite auf 1.7 mm geschoben um ein Drehmoment von ca. 180 Nm zu erhalten.

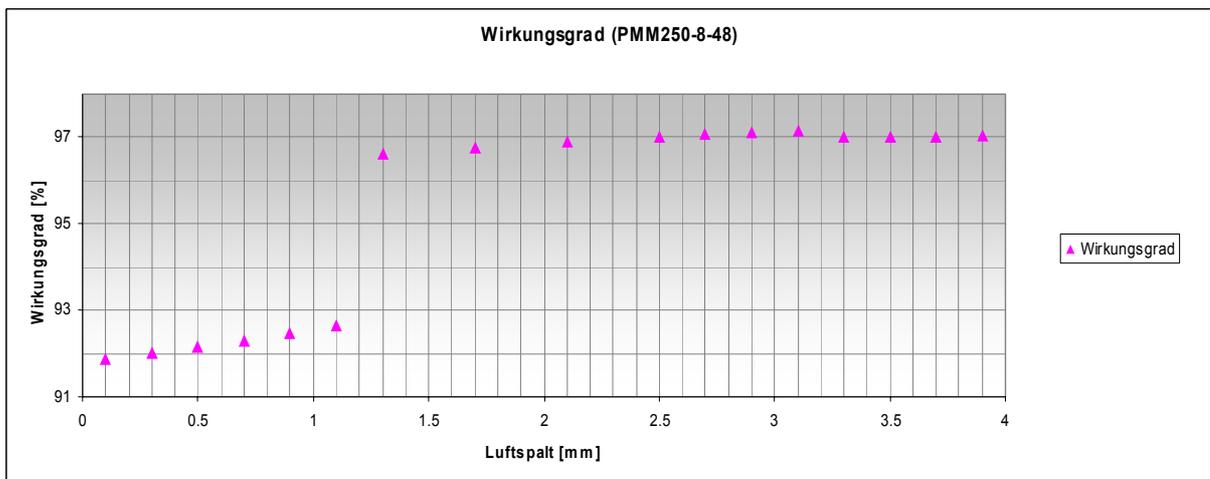


Abb. 102

Der Wirkungsgradverlauf aus Abb. 102 wird somit nicht zu sehr geschwächt und liegt etwas unter 97%. Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **1.7 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 22.006 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 236.6 mm. Die Kennlinien der Kap 5.5.4.2.2 und 5.5.4.2.3 basieren auf diesen Daten.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 103 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

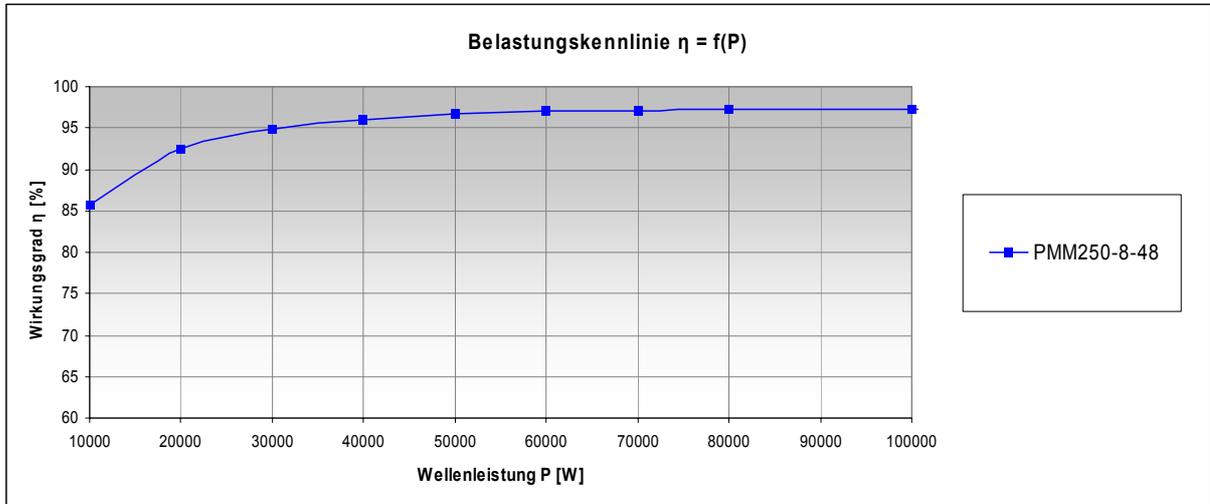


Abb. 103

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 104 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

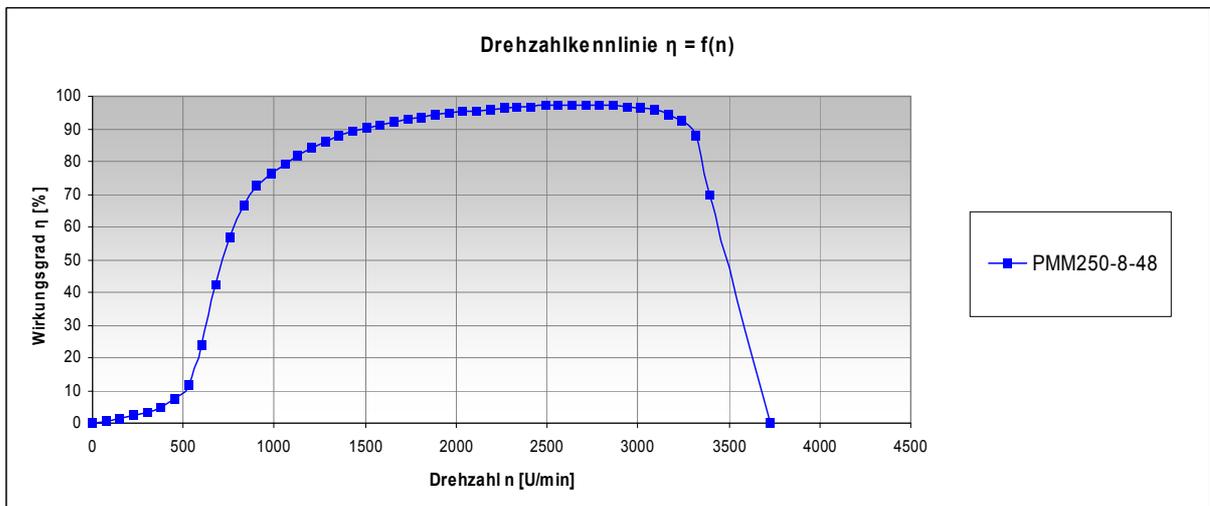


Abb. 104

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM250-8-48.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	55
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	8
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Average Coil Pitch:	5
Number of Conductors per Slot:	4
Wire Diameter (mm):	0.9116

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.7
Width of Magnet (mm):	60.7553
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	10.7557
Permanent Magnet Weight (kg):	2.46312
Armature Core Steel Weight (kg):	94.3473
Rotor Core Steel Weight (kg):	71.1449
Total Net Weight (kg):	178.711

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	141.986
Root-Mean-Square Armature Current (A):	131.357
Iron-Core Loss (W):	1403.51
Armature Copper Loss (W):	392.836
Total Loss (W):	1796.35
Output Power (W):	54998.1
Input Power (W):	56794.5
Efficiency (%):	96.8371
Rated Speed (rpm):	2934.34
Rated Torque (N.m):	178.982

## Auswertung und Beurteilung der Simulationsdaten

In diesen Abschnitt werden die Daten und Kurven aus der Simulation übereinander gelegt und können somit besser miteinander verglichen werden.

Die Abb. 105 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$  der 3 simulierten PMM.

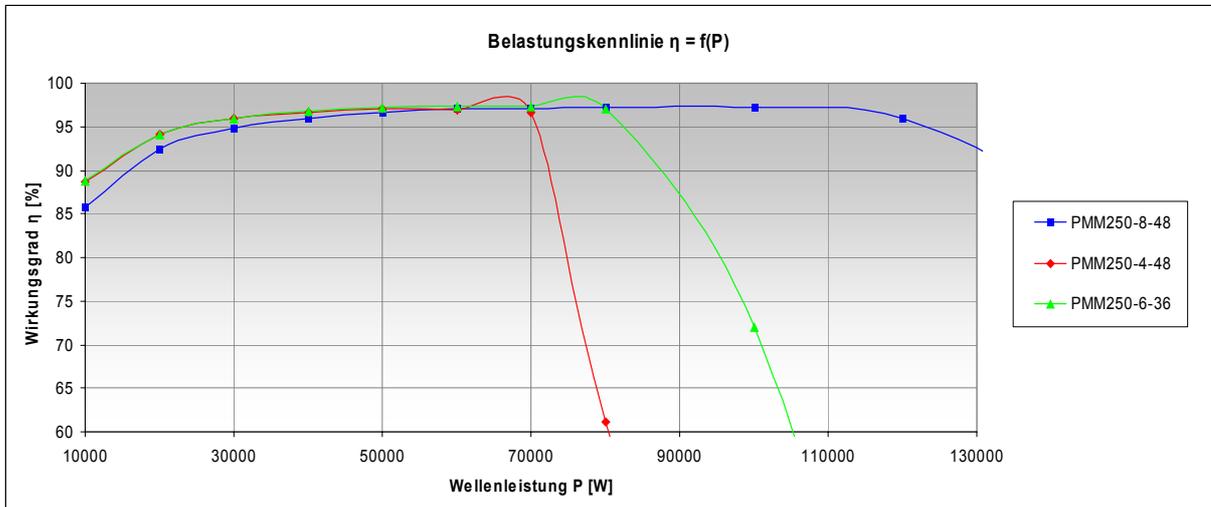


Abb. 105

Die 3 Maschinen weisen im Teillastbetrieb sehr unterschiedliche Charakteristiken auf. Bis etwa 70 kW Wellenleistung liegen die Kennlinien sehr nahe beieinander und zeigen so eine identische Teillastcharakteristik bis zu ca. 125% der Nennlast. Ab ungefähr 70 kW hat der Kupferanteil jeder Maschine einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Kennlinie.

Die PMM250-8-48 weist nach Datenblatt den geringsten Kupferanteil auf. Der Unterschied zwischen der 4- und der 8-poligen Maschine liegt nur in der Anzahl Pole. Somit müssten eigentlich beide Maschinen gleich viel Kupfer enthalten. Da aber beim Erhöhen der Anzahl Pole die Variable  $q$  (Anzahl Nuten pro Pol und Phase) und damit auch der *Coil Pitch* kleiner wird, nimmt die Windungslänge stark ab. Die Windungslänge jeder Maschine wurde mit folgenden Zahlen berechnet:

- PMM250-8-48: 370 mm
- PMM250-4-48: 520 mm

Pro Windung werden bei einer 4-poligen Maschine ungefähr 150 mm Kupferdraht mehr in die Maschine gesteckt. Auf alle Windungen hochgerechnet werden ca. 5 kg zusätzliches Kupfer benötigt. Dies widerspiegelt sich wiederum in den Kupferverlusten, welche im Überlastbereich den Wirkungsgradverlauf der PMM250-4-48 stark beeinträchtigen.

Bei der 8-poligen Maschine muss man doppelt so viele Magnete einsetzen. Durch die Rotorkonstruktion (Abflachung der Magnete, Polteilung) wird aber nur etwa 200 g mehr Magnetwerkstoff verwendet.

Die Wirkungsgradverläufe beinhalten nicht alle Verluste. Nach der Norm IEC 60034-2 stellen die Zusatzverluste bei Maschinen > 45 kW in etwa 0.5% der Nennleistung. Somit werden die Zusatzverluste mit einem konstanten Wert von 0.5% korrigiert.

Die Abb. 106 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$  der 3 simulierten PMM.

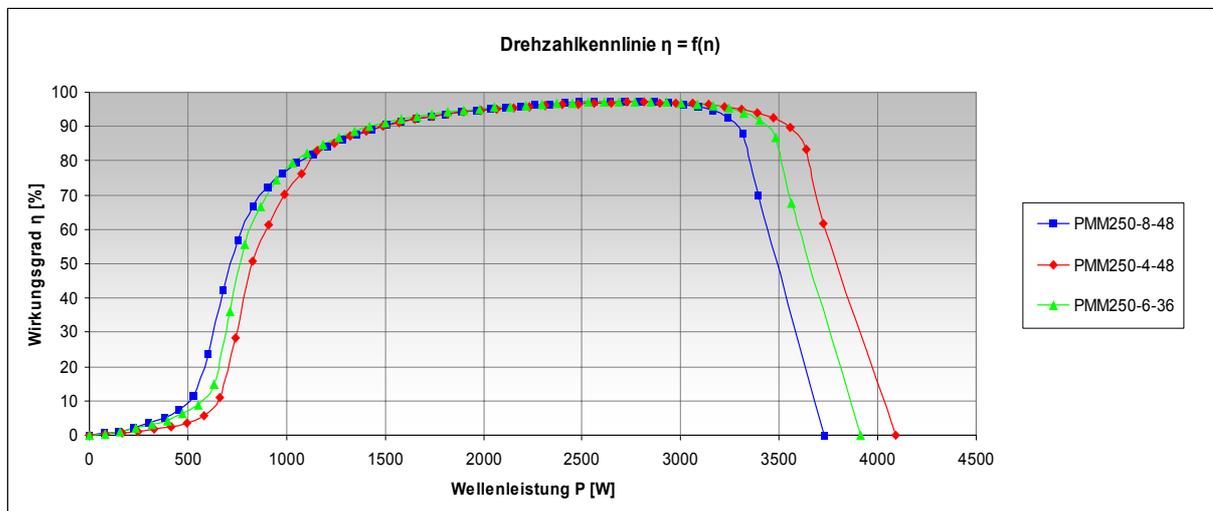


Abb. 106

Bei dieser Grafik fällt auf, dass die Maschinen über einen grösseren Drehzahlbereich (1500 - 3200 U/min) einen Wirkungsgrad von über 90% aufweisen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maschinen geordnet nach der Anzahl Pole (beginnend mit der höchsten) bei höheren Drehzahlen im Wirkungsgrad einbrechen. Höherpolige Maschinen produzieren bei steigender Drehzahl mehr Wirbelströme, d.h. Eisenverluste als Maschinen mit weniger Polen. Dieser Effekt ist der Grund für den beinahe parallelen Einbruch der Drehzahlkennlinie der 8-, 6- und 4-Polmaschine.

Die Daten der Maschinen können je nach Setup der Simulation variieren. Bei der iterativen Berechnung wurde festgestellt, dass das Drehmoment je nach Luftspaltbreite auch variieren kann. Aus diesem Grunde haben wir das Drehmoment auch berücksichtigt um die optimale Luftspaltbreite zu bestimmen. Die Luftspaltbreite wurde bei einem Drehmoment von ca. 180 Nm angesetzt, ohne den Wirkungsgrad stark negativ zu beeinflussen.

Die folgenden Tabellen zeigen den direkten Vergleich der PMM und ASM. Für den Vergleich dient ein Energiesparmotor nach der EFF1 Norm eines namhaften europäischen Herstellers.

	Wirkungsgrad $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
250SMA	94.2	177	2970

Die Wirkungsgradverläufe beinhalten nicht alle Verluste. Nach der Norm IEC 60034-2 stellen die Zusatzverluste bei Maschinen > 45 kW in etwa 0.5% der Nennleistung. Somit werden die Zusatzverluste mit einem konstanten Wert von 0.5% korrigiert.

	Wirkungsgrad <sup>5</sup> $\eta$ [%]	korrigierter Wirkungsgrad <sup>6</sup> $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
PMM250-6-36	97.26	96.76	183.1	2867.9
PMM250-4-48	97.02	96.52	189.6	2769.4
PMM250-8-48	96.8	96.3	178.98	2934.3

Ganz allgemein kann man festhalten, dass eine PMM250 in etwa folgende Daten aufweist.

- Wirkungsgrad  **$\eta = 96.5 \%$**
- Drehmoment  **$M = 180 \text{ Nm}$**

Dieser Wirkungsgrad liegt über der einer äquivalenten ASM. Zudem hat eine PMM im Teillastbereich eine wesentlich bessere Wirkungsgradcharakteristik. Die PMM ist somit sicherlich geeigneter für den Teillast- und „Run and Stop“-Betrieb.

Zusätzlich kann man dem Datenblatt der ASM entnehmen, dass diese ein Gewicht von 415 kg aufweist. Vergleicht man den Wert mit dem Gesamtgewicht der simulierten PMM von ca. 180 kg, so ist der Unterschied doch massiv. Somit kann bei der Produktion von solchen Maschinen erheblich Material eingespart werden. Bei der Simulation der PMM wurde jedoch das Gussgehäuse nicht mit einberechnet. Dieses ist aber sicherlich nicht der einzige Grund für die deutliche Gewichtsdivergenz.

Dennoch kann man feststellen, dass aus weniger Volumen die gleiche Leistung wie bei einer ASM bezogen werden kann.

---

<sup>5</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und beinhaltet deshalb keine Zusatzverluste

<sup>6</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und berücksichtigt auch noch die Zusatzverluste nach Norm IEC60034-2

#### 4.1.3.4 PMM IM 90 KW - LEISTUNGSBEREICH

In dieser Leistungsklasse werden 4 verschiedene Maschinen simuliert. Die Bezeichnungen für diese lauten:

- PMM280-6-54
- PMM280-8-48
- PMM280-12-72

Diese Leistungsklasse hat eine minimale normierte Stator- / Rotorlänge (Eisenlänge)  $l_{RS}$  von 300 mm.

#### PMM280-6-54

##### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 420$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 290$  mm
- Anzahl Nuten = 54
- Typ-Nr.: IEC280/6.290

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{54}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 3 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 3 - 1 = 8$$

##### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 290$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 300$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf jede Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

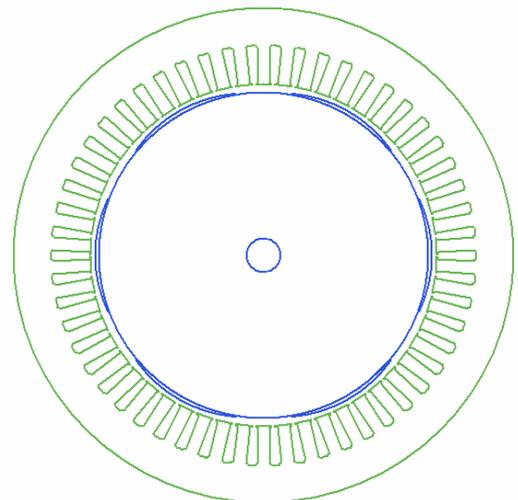


Abb. 107

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 108 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 12.345 mm.

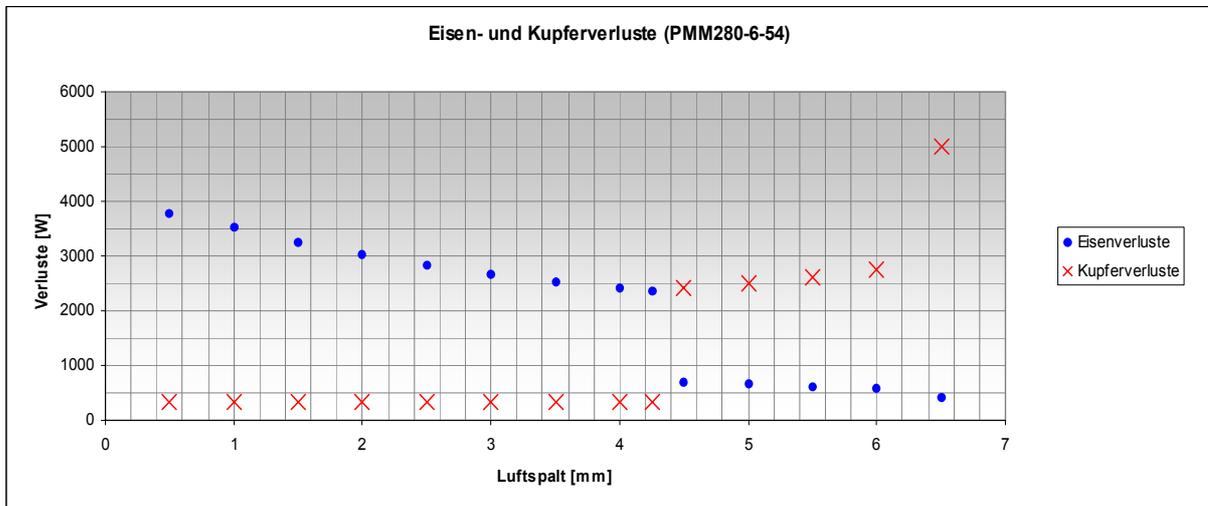


Abb. 108

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 4.235 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 109 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 4.235 mm und einem berechneten *Offset* von 28.042 mm.

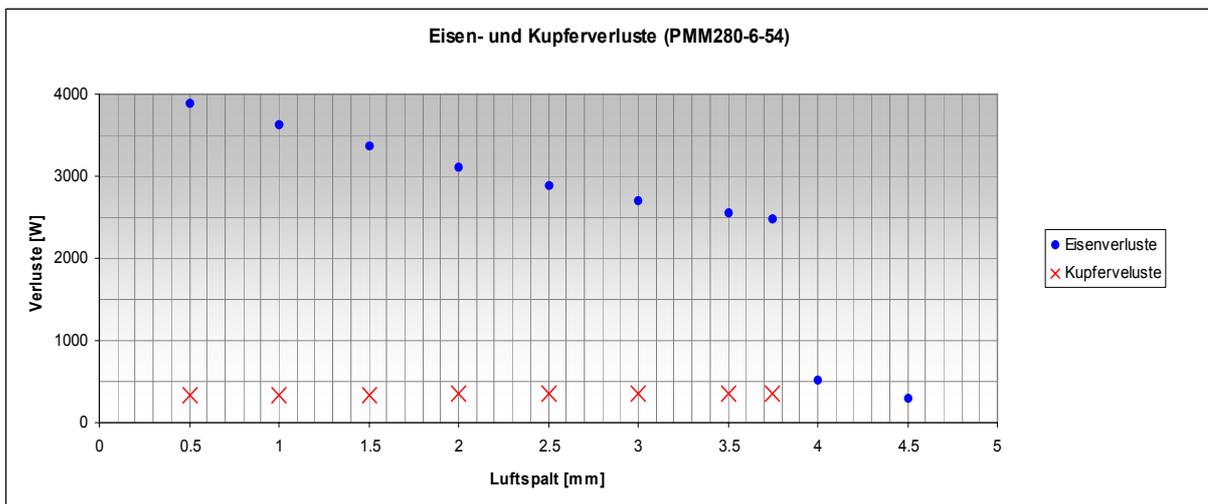


Abb.109

Bei dieser Konstellation mit 6 Polen und 54 Nuten zeigt die Simulation, dass die Kupfer- und Eisenverluste durch Anpassen der Luftspaltbreite nicht über einen sinnvollen Bereich gleichmässig über die Maschine verteilt werden können. Die Differenz der Verluste ist immer grösser als 2 kW. Nur beim Schnittpunkt sind die Verluste gleich gross. Aus dieser Tatsache haben wir uns entschlossen diese Simulation nicht weiter zu verfolgen. Diese Maschine erfüllt nicht unsere Bedingungen an einen effizienten PMM.

## PMM280-8-48

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 420$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Anzahl Nuten = 48
- Typ-Nr.: IEC280/2.240

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 2 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 240$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 300$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

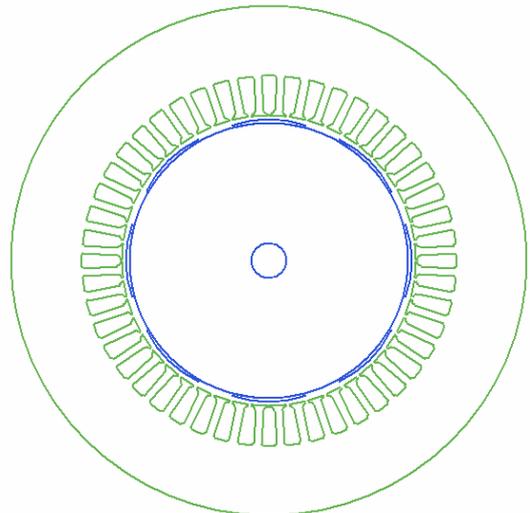


Abb. 110

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 111 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 16.879 mm.

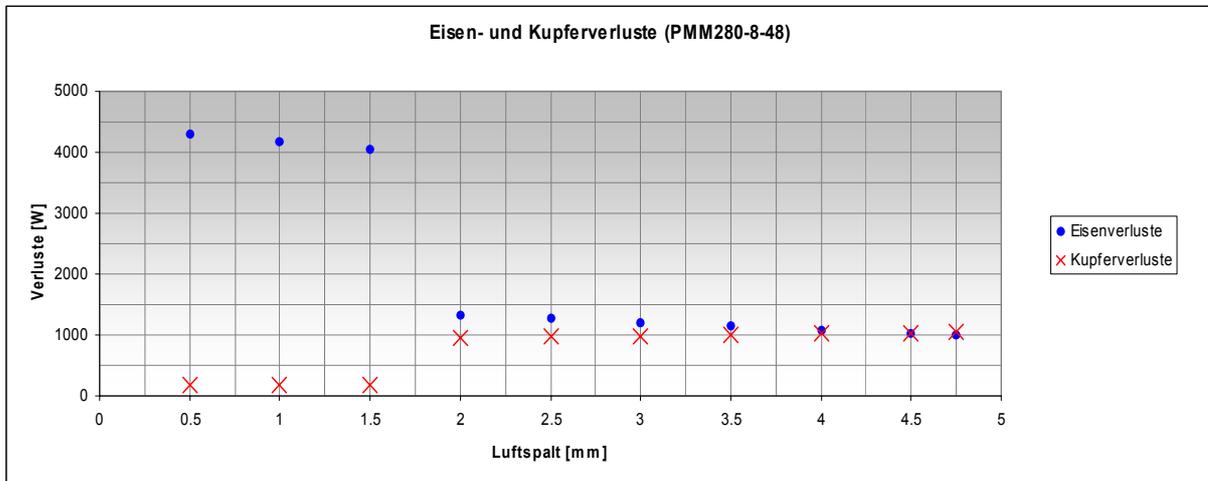


Abb. 111

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 4.65 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt, um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 112 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 4.65 mm und einem berechneten *Offset* von 29.656 mm.

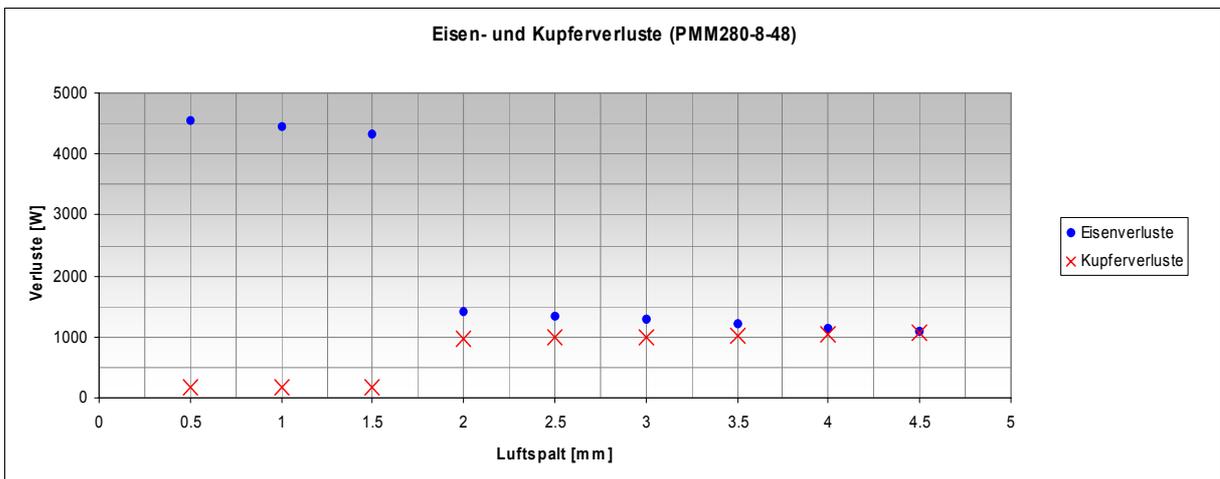


Abb. 112

Bei der in Abb. 112 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment nicht den normierten Wert dieser Leistungsklasse auf. Der Wirkungsgrad hingegen liegt um diesen Punkt stets bei 97.5%.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden ohne dabei den Wirkungsgrad allzu sehr zu schwächen. Die Abb. 113 und 114 zeigen diesen Sachverhalt deutlich.

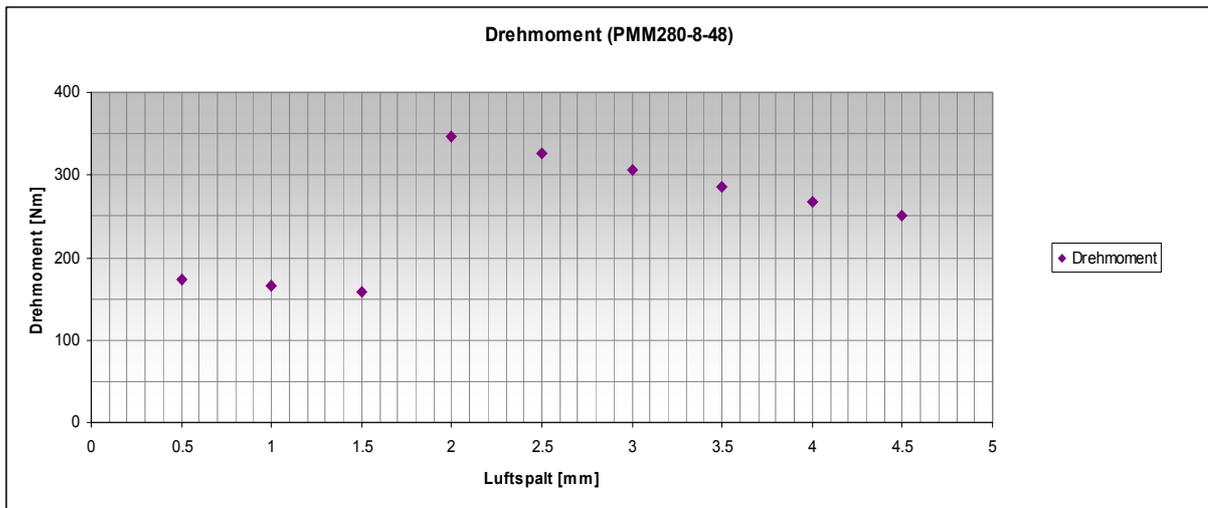


Abb. 113

Wie schon angewendet, beziehen wir die neue Luftspaltbreite auf das Moment, welches in dieser Leistungsklasse von einer ASM (EFF1) erzielt wird (287 Nm). Somit beträgt die neue Luftspaltbreite ca. 3.5 mm. Die Luftspaltbreite wird so angesetzt, dass die Kupferverluste stets kleiner sind als die Eisenverluste. Aus diesem Grund wird der Wert der neuen Luftspaltbreite nicht grösser gewählt.

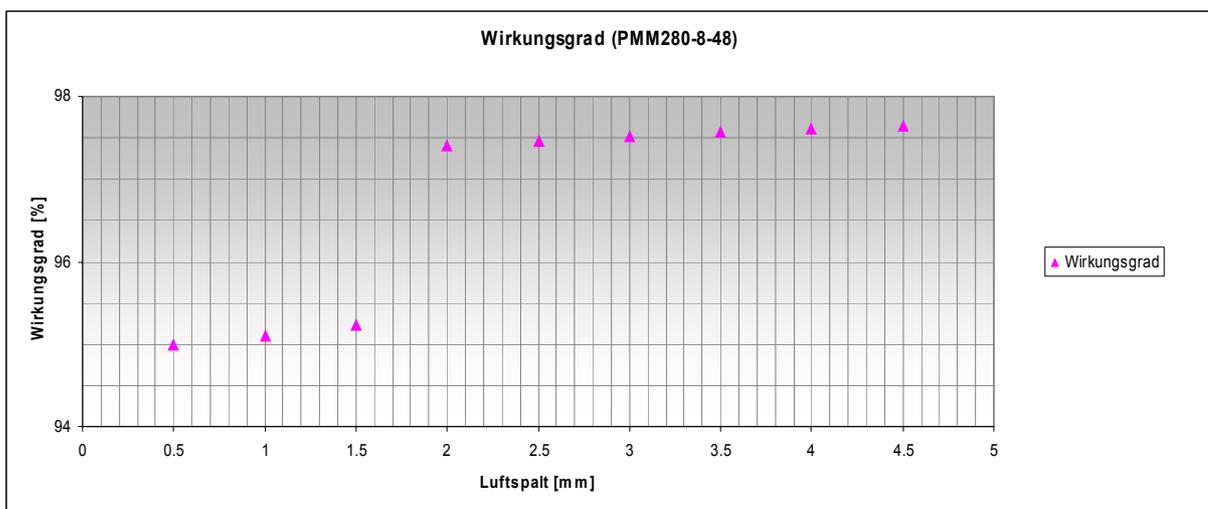


Abb. 114

Der Wirkungsgradverlauf aus Abb. 114 wird somit nicht zu sehr geschwächt und liegt immer noch bei 97.5%. Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **3.5 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 27.987 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 233 mm. Diese Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 115 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

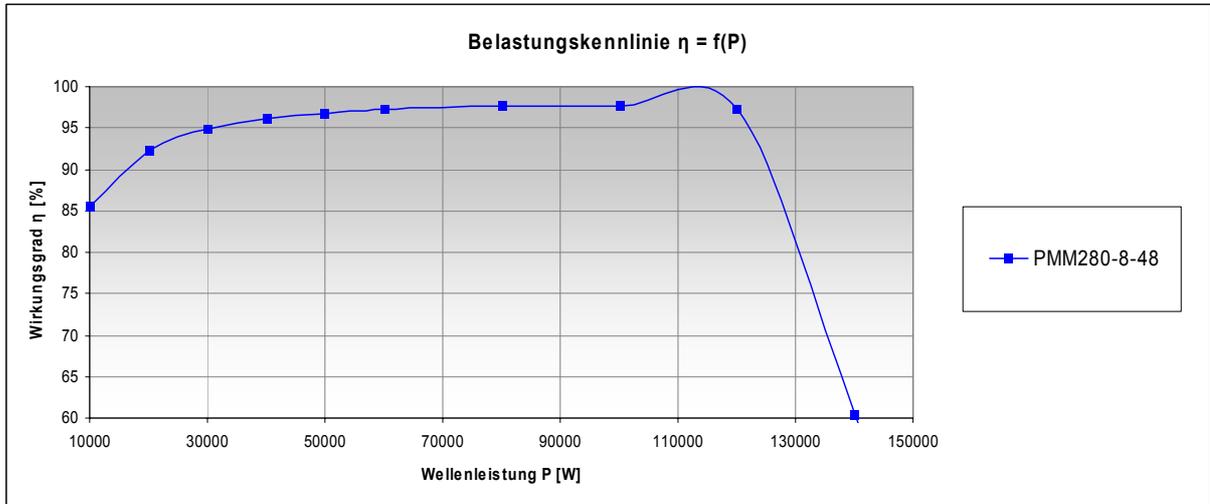


Abb. 115

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 116 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

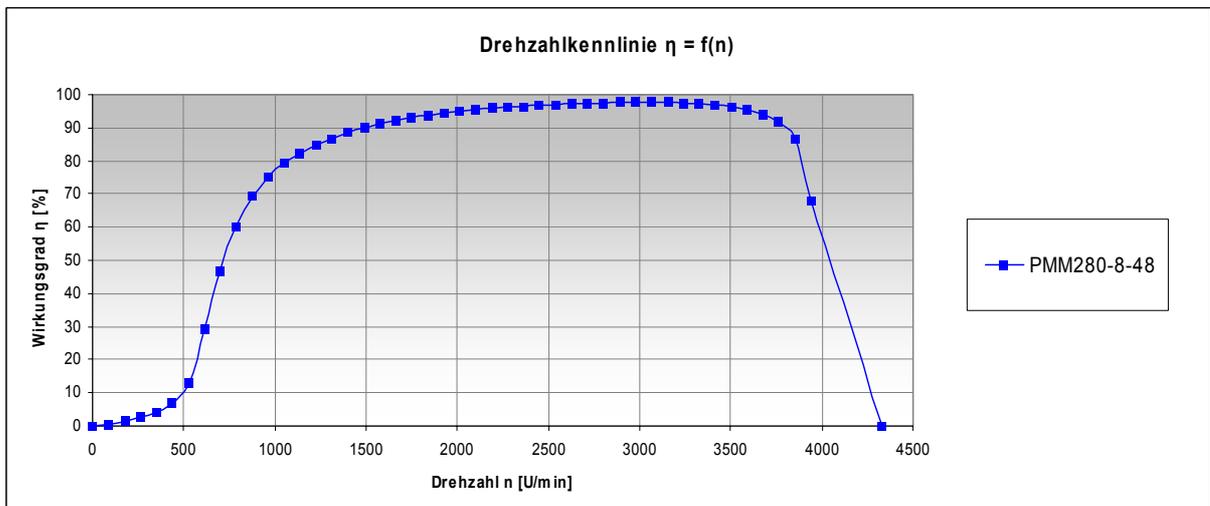


Abb. 116

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM280-8-48.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	90
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	8
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Number of Conductors per Slot:	4
Average Coil Pitch:	5
Wire Diameter (mm):	1.15

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	3.5
Width of Magnet (mm):	59.6518
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	19.9934
Permanent Magnet Weight (kg):	2.90516
Rotor Core Steel Weight (kg):	86.1287
Armature Core Steel Weight (kg):	165.177
Total Net Weight (kg):	274.204

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	230.57
Root-Mean-Square Armature Current (A):	247.121
Iron-Core Loss (W):	1206.35
Armature Copper Loss (W):	1020.46
Total Loss (W):	2226.81
Output Power (W):	90001.4
Input Power (W):	92228.2
Efficiency (%):	97.5855
Rated Speed (rpm):	2987.68
Rated Torque (N.m):	287.665

## PMM280-12-72

### Allgemeiner Aufbau

Für diese Maschine sind vom Statorblech her folgende Daten gegeben:

- Aussendurchmesser  $D_a = 420$  mm
- Innendurchmesser  $D_i = 305$  mm
- Anzahl Nuten = 72
- Typ-Nr.: IEC280/8.305

Daraus können die Parameter bestimmt werden, die für die Wicklungsverteilung ausschlaggebend sind:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 2 \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1 = 3 * 2 - 1 = 5$$

### Stator und Rotor

Der Stator hat durch die vordefinierten Abmessungen fixe Kenndaten, welche für die Simulation von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Nutenmasse. Für nähere Informationen verweisen wir auf den dazugehörigen *Kienle+Spiess [1]* Katalog (IEC Stator- und Rotorbleche).

- Statorinnendurchmesser  $D_i = 305$  mm
- Stator- / Rotorlänge  $l_{RS} = 300$  mm

Der Rotor hat keine Normmasse. Aus diesem Grunde können wir den Rotor, d.h. die Luftspaltbreite auf die Maschine spezifisch anpassen. Folgende Parameter setzen wir für die Simulation voraus.

- Magnetdicke  $d_M = 3$  mm
- Embrace = 0.666666

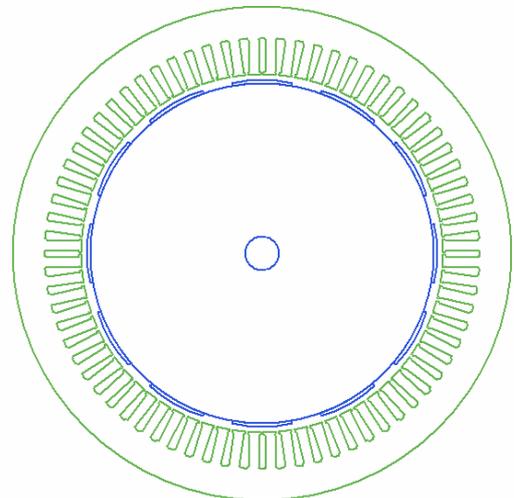


Abb. 117

## Simulation

Iterative Berechnung des optimalen Luftspaltes

Die Abb. 118 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 1 mm und einem berechneten *Offset* von 28.568 mm.

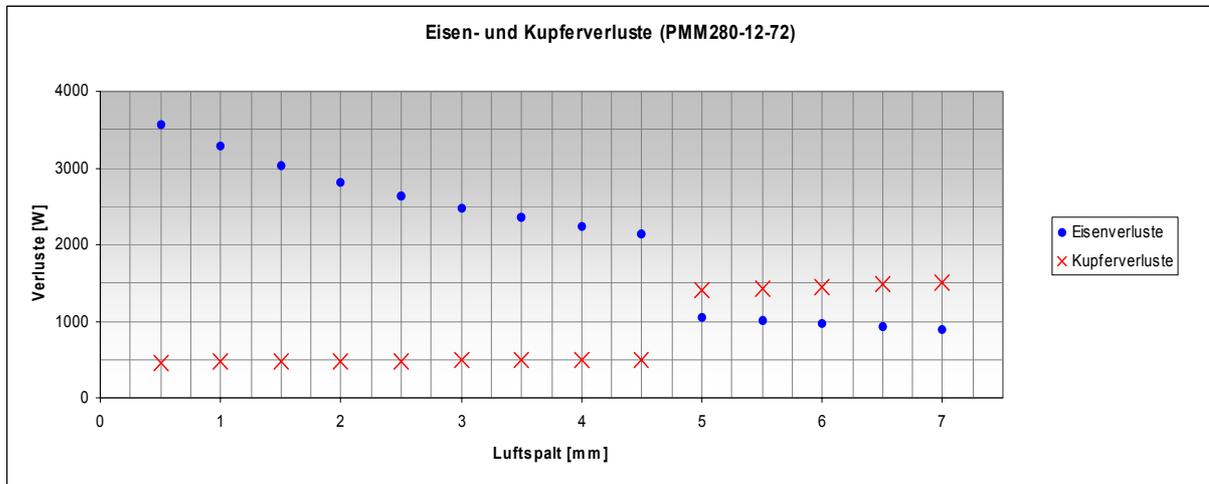


Abb. 118

Aus dem Diagramm kann eine maximale Luftspaltbreite von ca. 4.9 mm herausgelesen werden. Damit kann ein neuer *Offset* berechnet werden. Die Simulation wird im zweiten Iterationsschritt mit dem neu berechneten *Offset* durchgeführt um die passenden Parameter der Maschine zu erhalten.

Die Abb. 119 zeigt die Funktionsverläufe  $P_{Cu} = f(l_L)$  und  $P_{Fe} = f(l_L)$  bei einem Luftspalt von 4.9 mm und einem berechneten *Offset* von 42.165 mm.

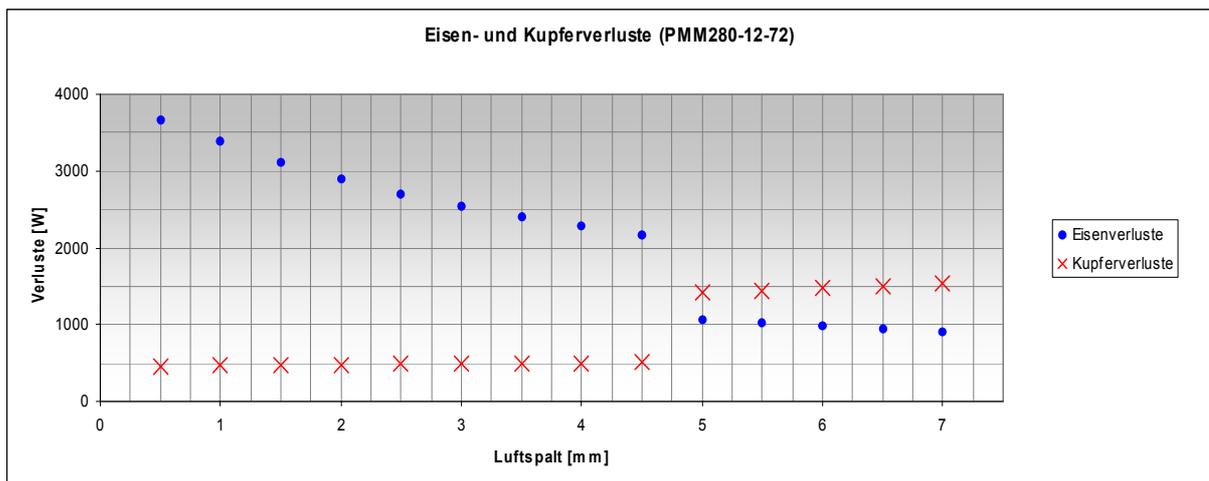


Abb. 119

Bei der in Abb. 119 definierten Luftspaltbreite weist das Drehmoment nicht den normierten Wert dieser Leistungsklasse auf. Der Wirkungsgrad hingegen liegt um diesen Punkt stets bei 97.3%.

Durch Verschieben der Luftspaltbreite kann das Drehmoment erhöht werden. Der Wirkungsgrad wird dabei auf 96.5% gesenkt. Die Abb. 120 und 121 zeigen diesen Sachverhalt deutlich.

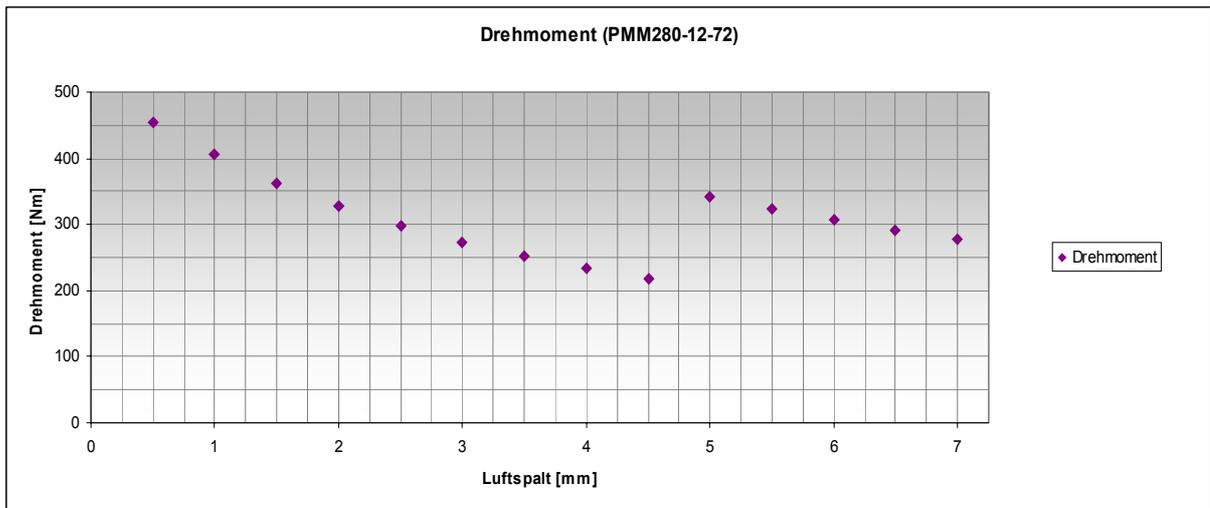


Abb. 120

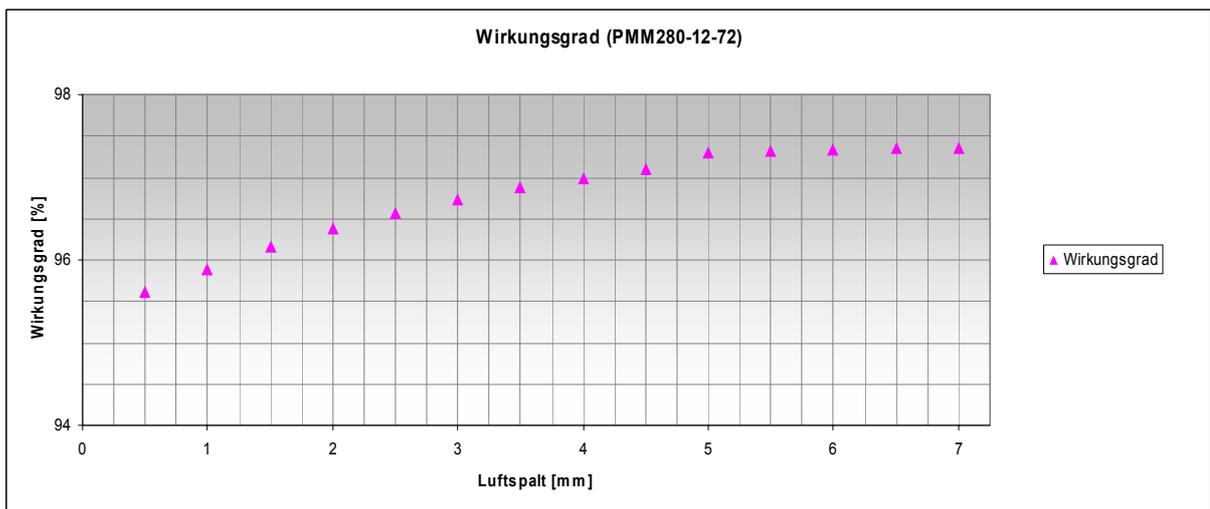


Abb. 121

Der optimale Luftspalt liegt jetzt neu bei ca. **2.65 mm**. Das ergibt einen *Offset* von 38.639 mm. Der Rotordurchmesser beträgt somit 299.7 mm. Die Daten gelten für die Simulation dieser Maschine.

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Wellenleistung $\eta = f(P_w)$

Die Abb. 122 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung aufgezeigt.

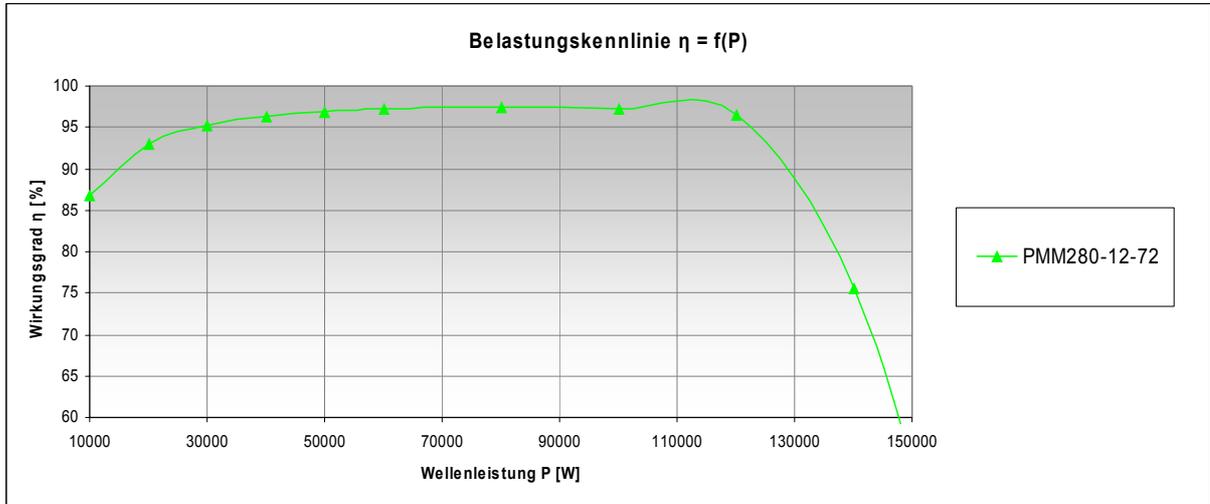


Abb. 122

### Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl $\eta = f(n)$

Die Abb. 123 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$ . Hier wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Drehzahl aufgezeigt.

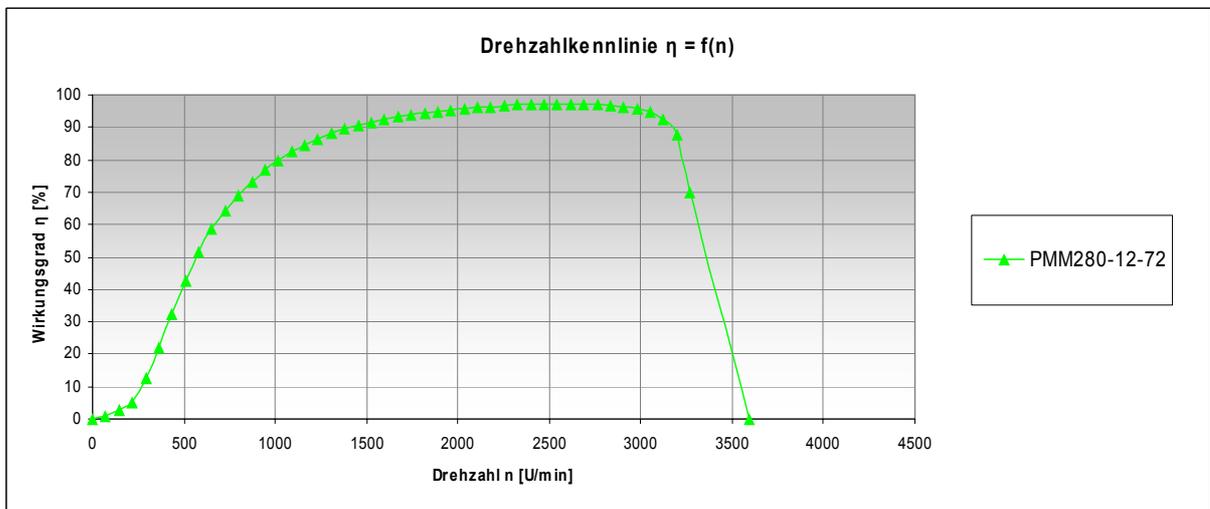


Abb. 123

## Auszug aus dem Datenblatt

Die folgenden Daten stammen aus dem Datenblatt, welches von der Simulation berechnet wird. Hier sind die wichtigsten Eckdaten der Maschine aufgelistet. Diese und noch weitere Daten finden Sie im Anhang unter der betreffenden Maschinenbezeichnung PMM280-12-72.

### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	90
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	12
Operating Temperature (C):	75

### STATOR DATA

Number of Conductors per Slot:	2
Average Coil Pitch:	5
Wire Diameter (mm):	1.024

### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	2.65
Width of Magnet (mm):	51.7676
Type of Magnet:	NdFe35

### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
--------------------------------	------

### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Weight (kg):	15.9929
Permanent Magnet Weight (kg):	3.97561
Armature Core Steel Weight (kg):	113.309
Rotor Core Steel Weight (kg):	145.212
Total Net Weight (kg):	278.489

### FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	232.779
Root-Mean-Square Armature Current (A):	215.072
Iron-Core Loss (W):	2633.24
Armature Copper Loss (W):	485.647
Total Loss (W):	3118.89
Output Power (W):	89992.6
Input Power (W):	93111.5
Efficiency (%):	96.6504
Rated Speed (rpm):	2954.99
Rated Torque (N.m):	290.818

## Auswertung und Beurteilung der Simulationsdaten

In diesen Abschnitt werden die Daten und Kurven aus der Simulation übereinander gelegt und können somit besser miteinander verglichen werden.

Die Abb. 124 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(P_w)$  der 3 simulierten PMM.

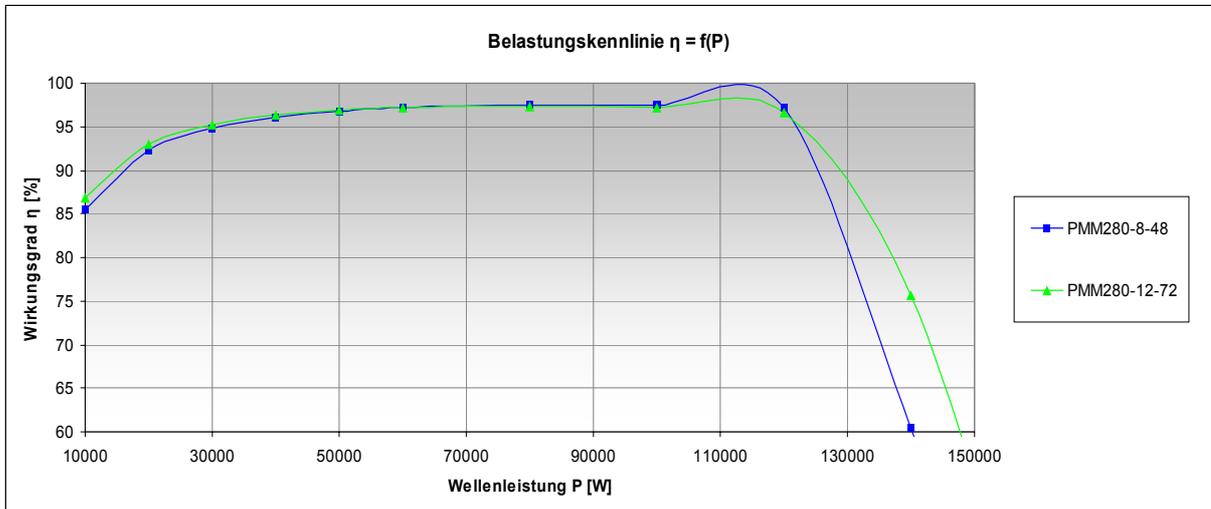


Abb. 124

Die 2 Maschinen weisen im Teillastbetrieb, bis etwa 110 kW Wellenleistung, beinahe identische Teillastcharakteristiken auf. Ab 110 kW bestimmt der Kupferanteil jeder Maschine den Verlauf der Kennlinie. Die 8-polige Maschine hat ca. 4 kg mehr Kupferanteil. Deshalb sinkt der Wirkungsgradverlauf bei höheren Belastungen stärker. Weil diese Maschine ein breiteres Statorjoch hat, können dadurch die Eisenverluste, ab einer bestimmten Luftspaltbreite, minimiert werden.

Ansonsten haben die Maschinen fast identische Eckdaten. Auffällig ist der grosse Belastungsbereich, in welchem der Wirkungsgrad deutlich über 90% liegt. Eine solche Charakteristik ist von keiner ASM bekannt. Diese erzielen zwar im Nennbetrieb fast die gleichen Wirkungsgrade, sind aber im Teillastbetrieb wesentlich schlechter.

Die Abb. 125 zeigt den Funktionsverlauf  $\eta = f(n)$  der 3 simulierten PMM.

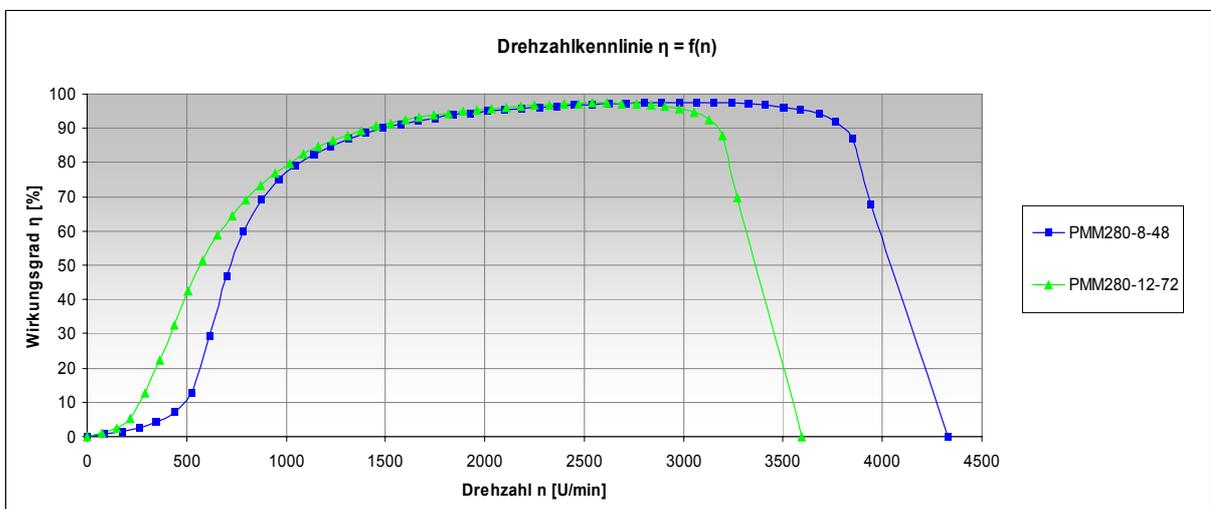


Abb. 125

Bei dieser Grafik fällt sofort auf, dass die Maschinen über einen grösseren Drehzahlbereich (1500 - 3200 U/min) einen Wirkungsgrad von über 90% aufweist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maschinen geordnet nach der Anzahl Pole (beginnend mit der höchsten) bei höheren Drehzahlen im Wirkungsgrad einbrechen. Höherpolige Maschinen produzieren bei steigender Drehzahl mehr Wirbelströme, d.h. Eisenverluste als Maschinen mit weniger Polen. Dieser Effekt ist der Grund für den beinahe parallelen Einbruch der Drehzahlkennlinie der 12- und 8-Polmaschine.

Zudem muss hier noch erwähnt werden, dass bei der Simulation der 12-poligen Maschine die Kupferverluste sehr hoch waren. Der Grund dafür liegt in der Bewicklung der Maschine. Wir haben uns am Anfang auf eine zweischichtige Ganzlochwicklung entschieden. Dieses Konzept ist von den Simulationsdaten her, nicht mehr die optimale Lösung für einen effizienten Permanentmagnet-Motor. Aus diesem Grund sind wir auf eine einschichtige Ganzlochwicklung ausgewichen, um die Kupferverluste zu minimieren. Man kann durch diese Massnahme zwar die Verluste verringern und dadurch den Wirkungsgrad anheben, aber die Maschine erzielt ungefähr 1% geringere Wirkungsgrade.

Dieser Sachverhalt liegt auch anhand der Analyse der Zahlen aus dem Datenblatt vor. Die wichtigsten Kenndaten finden Sie in den folgenden Tabellen.

Die Daten der Maschinen können je nach Setup der Simulation variieren. Bei der iterativen Berechnung wurde festgestellt, dass das Drehmoment je nach Luftspaltbreite auch variieren kann. Aus diesem Grund haben wir das Drehmoment auch berücksichtigt um die optimale Luftspaltbreite zu bestimmen. Die Luftspaltbreite wurde bei einem Drehmoment von ca. 290 Nm angesetzt, ohne den Wirkungsgrad stark negativ zu beeinflussen.

Die folgenden Tabellen zeigen den direkten Vergleich der PMM und ASM. Für den Vergleich diente einen Energiesparmotor nach der EFF1 Norm eines namhaften europäischen Herstellers.

	Wirkungsgrad $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
IEC280	95.1	289	2976

Die Wirkungsgradverläufe beinhalten nicht alle Verluste. Nach der Norm IEC 60034-2 können die Zusatzverluste bei Maschinen dieser Nennleistungen vernachlässigt werden.

	Wirkungsgrad <sup>7</sup> $\eta$ [%]	Drehmoment M [Nm]	Drehzahl n [U/min]
PMM280-8-48	97.6	287.6	2987.7
PMM280-12-72	96.6	290.8	2955

---

<sup>7</sup> Der Wert stammt aus der Simulation und beinhaltet deshalb keine Zusatzverluste

Ganz allgemein kann man festhalten, dass eine PMM280 in etwa folgende Daten aufweist.

- Wirkungsgrad  **$\eta = 97 \%$**
- Drehmoment  **$M = 290 \text{ Nm}$**

Dieser Wirkungsgrad liegt über der einer äquivalenten ASM. Zudem hat eine PMM im Teillastbereich eine wesentlich bessere Wirkungsgradcharakteristik. Eine PMM ist somit sicherlich geeigneter für den Teillast- und „Run and Stop“-Betrieb.

Zusätzlich kann man den Datenblatt der ASM entnehmen, dass diese ein Gewicht von 610 kg aufweist. Vergleicht man den Wert mit dem Gesamtgewicht der simulierten PMM von ca. 280 kg, so ist der Unterschied doch massiv. Somit kann bei der Produktion von solchen Maschinen erheblich viel Material eingespart werden. Bei der Simulation der PMM wurde jedoch das Gussgehäuse nicht mit einberechnet. Dieses ist aber sicherlich nicht der einzige Grund für die deutliche Gewichtsdivergenz.

Unsere PMM weisen eine minimal normierte Statorisenlänge auf. Durch diese Massnahme kann erheblich viel Material eingespart werden.

Dennoch kann man feststellen, dass aus weniger Volumen die gleiche Leistung wie bei einer ASM bezogen werden kann.

#### 4.1.4 Zusammenfassung

In dieser Schlussevaluation gilt es die Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Simulation festzuhalten und zu erläutern. Wie der vorliegende Bericht aufgezeigt hat, tragen die verschiedensten Faktoren dazu bei, einen energieeffizienten Permanentmagnet-Motor zu bauen. Der Bericht soll nicht zeigen, dass in der Praxis ein Motor genau so zu bauen ist, wie wir ihn simuliert haben. Er soll Trends und wichtigen Faktoren aufzeigen, auf welche man Rücksicht nehmen sollte. In der Praxis werden sicherlich noch andere Faktoren, wie z.B. die Zusatzverluste, den Wirkungsgrad beeinträchtigen. Die Simulationen zeigen aber, welche Wirkungsgrade möglich sind, wenn man diese Erkenntnisse beim Bau des Motors berücksichtigt und anwendet.

#### Erkenntnisse

Durch die Wahl des richtigen Blechschnitts für den Stator können schon viele Effekte, welche den Wirkungsgrad verschlechtern, reduziert oder sogar eliminiert werden.

Die gesamten Verluste, welche bei der Simulation berücksichtigt werden, werden im Stator verursacht. Sie setzen sich aus Eisen- und Kupferverlusten zusammen. Dabei sollten Anzahl Nuten, Zahnbreite und Blechrücken in einem bestimmten Verhältnis sein. Wird ein Blech mit viel Nuten und dadurch auch schmalen Zahnbreiten gewählt, resultieren höhere Verluste. Einerseits muss mehr Kupfer eingesetzt werden, welches mehr Kupferverluste produziert und andererseits entstehen höhere Flussdichten in den schmalen Zahnbreiten (kleinere Querschnitte), welche die Eisenverluste erhöhen. Ein breites Statorjoch kann diesen Effekt zwar ein wenig reduzieren, aber nie vollständig reduzieren. Aus den Simulationen haben sich diverse Konstellationen als vorteilhaft bewiesen.

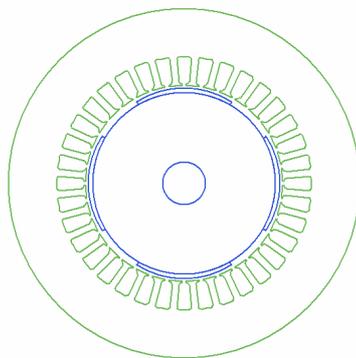


Abb. 126

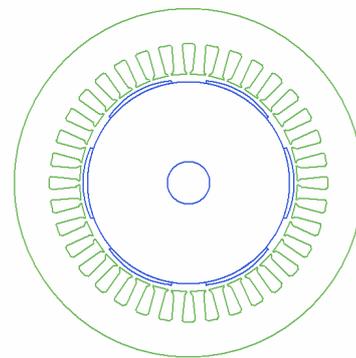


Abb. 127

Die Abb. 126 zeigt ein Statorblech mit einer kleinen Zahnbreite und einem breiten Statorjoch. Ein breites Joch wirkt sich immer positiv auf den Wirkungsgrad aus und sollte auch aus Kühlungsgründen gewählt werden. Dieser kann aber nicht die Verluste in den schmalen „Zähnen“ kompensieren. In Abb. 127 sind hingegen Statorjoch und Zahnbreite in einem sinnvolleren Verhältnis. Durch etwas breitere „Zähne“ kann relativ viel Eisen gegenüber dem Beispiel in Abb. 126 eingespart werden.

Das richtige Blech hat auch Einfluss auf die Kupferverluste. Wird ein Blech mit relativ vielen Nuten (z.B. eine PMM132 mit mehr als 48 Nuten) benutzt, hat dies automatisch einen höheren Kupferanteil zur Folge. Diese Tatsache wirkt sich gleich doppelt negativ aus. Einerseits werden zusätzliche Kupferverluste produziert und andererseits entstehen durch die hohen Kupferpreise auch mehr Produktionskosten.

Somit hat die Wahl des richtigen Blechschnitts des Stators auch einen wirtschaftlichen Aspekt. Generell kann man sagen, dass eine Maschine mit geringerer Anzahl Nuten und Pole technisch und wirtschaftlich die besseren Ergebnisse erzielt.

Ein weiterer zentraler Punkt ist die Wahl der optimalen Luftspaltbreite. Diese ist auf Grund der verschiedenen Motorenkonzepte immer spezifisch für einen Maschinentyp zu bestimmen. Wie erste Simulationsversuche gezeigt haben, hat auch dieser Parameter einen wichtigen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Durch Erhöhen der Luftspaltbreite wird die Flussdichte reduziert und damit auch die resultierenden Eisenverluste. Da bei dieser Simulationsreihe die Leistung an der Welle immer konstant gehalten wird, muss beim Erhöhen der Luftspaltbreite zwangsweise mehr Strom fließen um die gleiche Ausgangsleistung zu erzeugen. Dieser Stromanstieg verursacht zusätzliche Kupferverluste.

Somit gilt es ein Optimum zu finden, bei welchem beide Verlustanteile etwa gleich gross sind. Diesen Punkt definieren wir als optimale und zugleich maximale Luftspaltbreite. Bei diesem Punkt wirken sich beide Anteile gleich stark auf den Wirkungsgrad aus. Bei einer grösseren Luftspaltbreite würden die Kupferverluste dominieren. Da die Verlustleistung in Wärme umgesetzt wird, heizt die Wicklung mehr als das Eisen. Um die Maschine kühlen zu können, muss die Wärme zuerst auf das Eisen übertragen werden und kann erst dann an die Umgebung abgegeben werden.

In dieser Situation kann der Motor nur bei tieferen Betriebstemperaturen betrieben werden, weil die Wicklung rasch an ihre thermischen Grenzen stösst und zudem ein beschleunigter Alterungsprozess eintritt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Erfahrungswerte der Luftspaltbreiten aus der Simulation aufgelistet. Die Werte (in mm) sind noch nach der Anzahl Nuten unterteilt.

		Anzahl Pole auf dem Rotor			
		4	6	8	12
IEC Statorblech	PMM132	1.3 (36)	1.3 (48)	1.95 (36)	
	PMM160	0.7 (36)	2.5 (48)	2.25 (36)	
	PMM250	2 (48)		1.3 (36)	1.7 (48)
	PMM280			3.8 (54)	3.5 (48)

Grundsätzlich kann man aus der Tabelle festhalten, dass bei höherpoligen Maschinen der Luftspalt grösser werden muss.

Im Verlaufe der Simulationen stellte sich heraus, dass grössere Maschinen mit wenigen Polen, d.h. 4 Pole, unbrauchbar sind für einen energieeffizienten Motor. Deshalb mussten bei grösseren Maschinen auch die Anzahl Pole erhöht werden.

Ein Grund dafür ist der *Coilpitch*. Werden mehr Pole auf dem Rotor angeordnet, ist der *Coilpitch* klein. Die folgenden Formeln zeigen diesen Sachverhalt.

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \text{Anzahl} \frac{\text{Nuten}}{\text{Pol \& Phase}}$$

$$\text{CoilPitch} = 3 * q - 1$$

Somit kann für die gleiche Maschine, aber mit unterschiedlicher Anzahl Polen, enorm viel Kupfer einspart werden. Dieser Versuch wurde für die 55 kW-Leistungsklasse bei einer 4-poligen und einer 8-poligen Ausführung gemacht .

Ein anderer Grund ist, dass mit weniger Polen die resultierende Fläche der Magnete, wenn man alle Flächen addiert, grösser ist als diejenige mit mehr Polen. Dies erklärt sich dadurch, weil eine *Embrace* von 0.66 als optimal definiert wird. Es ergeben sich so mehr Zwischenräume zwischen den Magneten, was sich auf die Gesamtfläche auswirkt.

Ein weiterer Punkt ist die so genannte Abflachung der Magnete, wie sie näher untersucht wurde. Diese hat ebenso einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz eines Permanent-Magnet-Motors. Durch die so genannte Abflachung können die Eisenverluste zusätzlich minimiert werden. Nun stehen zwei Parameter für die Variation der Eisenverluste zur Verfügung. Einerseits können mit der Luftspaltbreite und andererseits mit der Abflachung der Magnete die Eisenverluste beeinflusst werden. Für die Bestimmung dieser Werte haben wir ein Iterationsverfahren festgelegt. Dieses wurde bei jedem Simulationsversuch angewendet.

Zudem kann durch die Polteilung oder in *RMxrt* durch den Parameter *Embrace* der Wirkungsgrad weiter verbessert werden. Die Theorie dazu wurde aus dem Buch „*Konstruktion elektrischer Maschinen II. Synchronmaschine*, R. Oberholzer [2]“ genommen. Eine Polteilung von 0.66 gilt als optimal. Die Simulation zeigt, dass sich diese Polteilung positiv auswirkt. Dies ist aus dem Kapitel 4 dargestellt.

Aber auch der Magnetwerkstoff an sich kann einen Einfluss auf das Gesamtkonzept oder die Gesamtlösung haben. Aus diesem Grund sei hier noch ein Blick auf die wesentlichsten Punkte aus dem „*Anhang : Magnetwerkstoff-Technologie*“ 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 Permanentmagnet-Motoren sind. 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. Aber sei jedoch erwähnt, dass die herkömmlichen AlNiCo-Magnete auch sehr stabil sind gegen Temperatureinflüsse. 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. Als weiterer Nachteil kann sich der hohe Preis, welcher für diese Magnete auf dem Markt bezahlt werden muss, auswirken.

Über die erwähnten Fakten ist auch im „*Anhang: Magnetwerkstoff-Technologie*“ sehr viel Information vorhanden. In unseren Simulationen haben wir uns für den Magnetwerkstoff NdFeB35 auf dem Rotor entschieden, weil dieser die besten magnetischen Eigenschaften aufweist und dadurch zu hohen Wirkungsgraden der Motoren führt.

## Ergebnisse

In der unten aufgeführten Tabelle 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. Permanentmagnet-Motoren weisen sehr hohe Wirkungsgrade auf. Im Vergleich zu der ASM, in der gleichen Leistungsklasse, sind diese im Schnitt um 2% höher. Bei zunehmender Leistung nimmt die Wirkungsgraddifferenz zur äquivalenten ASM ab. Der Schnittpunkt ist noch nicht erreicht, aber die Tendenz zeigt hier, dass im höheren Leistungsbereich die PMM nicht mehr im Vorteil ist. Im Leistungsbereich unter 100 kW ist die PMM aber energieeffizienter.

Diese haben die gleichen Drehmomentwerte wie die unten aufgeführten Werte unserer Permanentmagnet-Motoren. Somit kann ein genauerer Vergleich zwischen den beiden Motorentypen gemacht werden.

IEC Statorblech				
	PMM132	PMM160	PMM250	PMM280
Wirkungsgrad	91%	94%	96.5%	97%
Drehmoment	18Nm	50Nm	180Nm	290Nm

IEC Statorblech				
	ASM132	ASM160	ASM250	ASM280
Wirkungsgrad	88.6%	91.3%	94.2%	95.1%
Drehmoment	18Nm	49Nm	177Nm	289Nm

## Wirkungsgradvergleich

Abb. 108 soll den Sachverhalt der Energieeffizienz bei Motoren aufzeigen. Darin sind die drei Bereiche farblich markiert, welche in EFF-Klassen eingeteilt sind. Zuerst soll hier erklärt werden, was EFF oder die Effizienzklasse bedeutet.

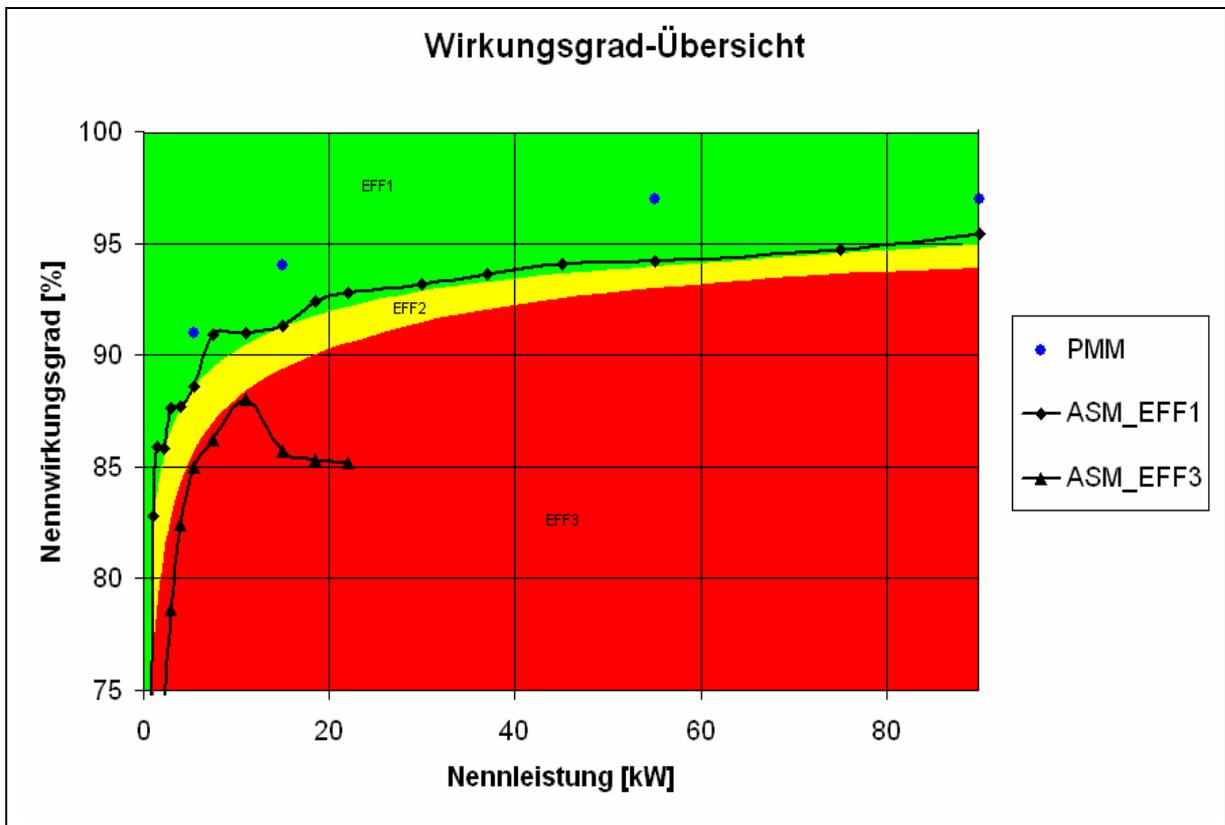


Abb. 128

In der Grafik sind zwei schwarze Kurven eingezeichnet, welche die EFF1 AS-Motoren mit einer Drehzahl von 3000 U/min und die EFF3 AS-Motoren mit 3000 U/min widerspiegeln. Darin sind weiter 4 Punkte ersichtlich, welche die Wirkungsgrade unserer simulierten PMM Motoren belegen. Man sieht deutlich, dass die Wirkungsgrade der PM-Motoren zur Klasse EFF1 gehören und die PM-Motoren deshalb als Höchstwirkungsgradmotoren bezeichnet werden dürfen. Des Weiteren sind diese Wirkungsgrade deutlich über denen der EFF1 ASM. Somit kann man den Permanentmagnet-Motoren eine gute Zukunft voraussagen.

## Offene Fragen und Problemstellungen

Bei der Analyse der Simulationsdaten sind wir beim Funktionsverlauf  $M=F(l_L)$  auf offene Fragen gestossen. Der Funktionsverlauf (siehe Abb. 109) weist über den Luftspaltbreitenbereich, je nach Leistungsklasse, Sprünge auf. Diese können jeweils bei **allen** Maschinen und Baugrössen beobachtet werden.

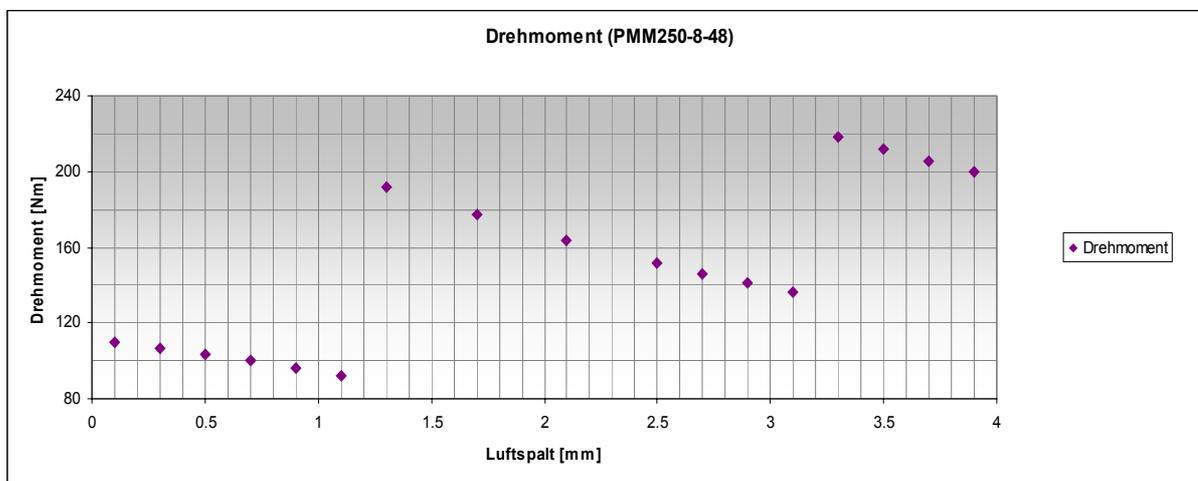


Abb. 129

Diese Unstetigkeit des Drehmomentverlaufs wirft automatisch Fragen auf, da bei einer Luftspaltbreitenänderung von einem Zehntel Millimeter das Drehmoment enorm ansteigt. Der Effekt konnten wir nicht auf Anhieb erklären und haben deshalb zusätzliche Recherchen gemacht. Dabei sind wir auf die folgenden 2 möglichen Begründungen gestossen:

- Es ist bekannt, dass bei modularen PM-Maschinen bei geringer Änderung der Rotorgeometrie Drehmomentsprünge auftreten können. Da dieses Motorenkonzept bis anhin nur für kleinere Leistungsklassen (bis 1 kW) kennen und hier die Änderung einige Newtonmeter beträgt, stellt sich nun die Frage, wie stark sich dieser Effekt auf grössere Maschinen (bis 100 kW) auswirkt.
- Ein weiterer Argumentationspunkt kann ein Fehler oder eine „Unschönheit“ der Software sein. Dies mit dem Entwickler zu klären, würde den Zeitrahmen der Arbeit bei weitem sprengen.

Um diesen Effekt genauer zu erklären, müsste unser Projekts erweitert werden. Dies wäre Gegenstand weiterer Recherchen und Messungen.

## 4.2 Praktischer Teil. Erarbeitet durch die Fachhochschule Wallis

An der Hochschule Wallis HEVs wurde der praktische Teil dieser Studie mit den Messungen durchgeführt.

Die gemessenen Maschinen lagen im Leistungsbereich von 3kW mit der Nenndrehzahl von 3000U/min (Maschinen mit einem Polpaar).

Die Ziele der Messungen waren die folgenden:

- Vergleich der Leerlaufverluste bei Netzbetrieb oder mit Frequenzumrichter
- Wirkungsgrad bei Nenndrehzahl und verschiedenen Belastungen
- Für die Synchronmaschinen: Aufstarten und Netzbetrieb

Mit einer an der HEVs entwickelten langsamdrehenden Permanentmagnet-Mehrpolmaschine (60U/min) wurde ebenfalls die Tauglichkeit eines Netzbetriebes überprüft (HGA [5]).

### 4.2.1 Verwendete Maschinen

Die Hochschule Wallis verfügt für dieses Projekt über 3 verschiedene Asynchronmaschinen, eine Permanentmagnet-Synchronmaschine mit trapezförmigen Spannungen (bürstenlose DC Maschine) und zwei Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit sinusförmigen Spannungen. Die Tabelle auf der folgenden Seite zeigt die Angaben der Typenschilder. Die Referenzen der Figuren und Messungen auf den folgenden Seiten beziehen sich auf die zu Beginn einer Kolonne eingeführten Maschinennamen. Dabei bezeichnet die erste Buchstabenfolge den Maschinentyp: Asynchronmaschine ASM, Permanentmagnet-Synchronmaschine mit trapezförmigen Spannungen (brushless DC) BLDC, Permanentmagnet-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 » kann zum Hochfahren in einer Stern-Dreieckschaltung Y-D bei 400V eingesetzt werden, sie kann aber auch in Sternschaltung Y bei 660V betrieben werden.
- Die Maschine « ETR DN100 » wurde nach dem Prinzip von Dahlander [4] gewickelt, zur Polumschaltung (Umschaltung von 2 Polpaaren auf ein Polpaar). Für beide Fälle beträgt ihre Versorgungsspannung 400V. Die Maschine wird bei 3000U/min gestestet und befindet sich daher in der Doppelsternschaltung YY für die Spannung von 400V.
- Die Maschine « ABB M3AA » wurde für den Frequenzumrichterbetrieb in Sternschaltung Y bei 400V vorgesehen, sie kann ebenfalls in Dreieckschaltung D bei 230V betrieben werden.

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

Für die Permanentmagnetmaschinen muss die Speisespannung in der Größenordnung der induzierten Spannung gewählt werden. Die Maschinen « **EMB DM-SNP** » und « **PMSM Lange** » können wegen ihrer Polschaltung und induzierten Spannung nur mit Hilfe eines Variacs unterhalb ihrer Nennleistung mit dem Netz betrieben werden.

Um die Asynchronmaschinen mit der Maschine **BLDC « EMB DM-SNP »** vergleichen zu können, wurden ihre Speisungen der induzierten Spannung der PM-Maschine angepasst (250V für die Messungen mit Belastung und 200V für die Messung der Verluste durch die hochfrequente Stromwelligkeit beim Wechselrichterbetrieb).

## Typenschilder / 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 <sup>-1</sup>	Mechanische Drehzahl	2880	2850 YY / 1430 D	2920	3000	1500	60
cos $\varphi$	-	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. 130 : Typenschilder der Maschinen

## Asynchronmaschine : Parameter und Ersatzschaltung

Ersatzschaltung der Asynchronmaschine

Anstelle der üblichen T- Ersatzschaltung wird die Schaltung nach Abb. 131, welche die Bestimmung aller Parameter durch Messungen erlaubt.

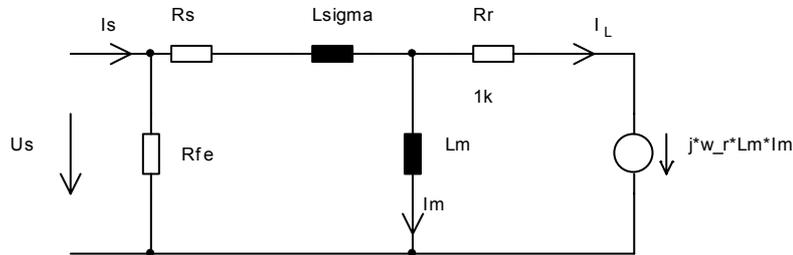


Abb. 131 :Ersatzschaltung der Asynchronmaschine

## Gemessene Parameter der Asynchronmaschinen

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

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

Abb. 132: Parameter des Asynchronmaschine

Die bei verschiedenen Spannungen gemessenen Leerlaufverluste werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

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

Abb. 133: Leerlaufverluste der Asynchronmaschine

### Synchronmaschine : Parameter und Ersatzschaltung

Ersatzschaltung der Permanentmagnet-Synchronmaschine

Die Abb. 134 zeigt die Ersatzschaltung der Permanentmagnet-Synchronmaschine, die für Maschinen mit sinusförmigen oder trapezförmigen Spannungen gilt.

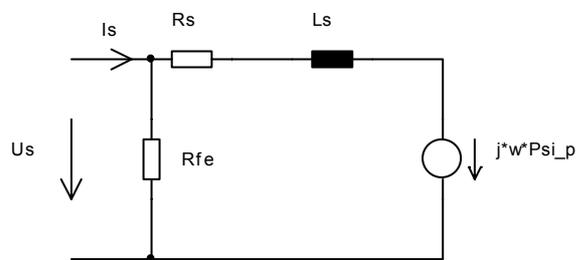


Abb. 134: Ersatzschaltung der Synchronmaschine

## Gemessene Parameter der Synchronmaschinen

Die folgende Tabelle zeigt die elektrischen Kennwerte der vorhandenen Maschinen, die mit Hilfe verschiedener Methoden gemessen wurden (DC, Leerlauf, blockierter Rotor)

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC DM-SNP	PMSM Lange	PMSM HGA
$R_s$	$\Omega$	$I = I_n$	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
$\Psi_p$	Vs		Permanentmagnetfluss	0.1582	0.231	1.875

Abb. 135: Parameter der Synchronmaschine

Die bei verschiedenen Spannungen gemessenen Leerlaufverluste werden in der folgenden Tabelle 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. 136: Leerlaufverluste der Synchronmaschine

## 4.2.2 Netzbetrieb einer PMSM

Die Möglichkeiten eines Netzbetriebs der Permanentmagnet-Synchronmaschine PMSM sind wegen der Energieeinsparungen von besonderem Interesse. Dazu wurden 2 Versuche unternommen: Aufstarten der Maschine am Netz ohne Synchronisation, mit Hilfe eines Variacs und Netzbetrieb mit konstanter Last.

Die Versuche wurden mit 2 vorhandenen PMSM durchgeführt (« **PMSM Lange** », « **PMSM HGA** »).

### Aufstarten am Netz

Bei einer fremderregten Synchronmaschine ist ein Aufstarten am Netz in einem asynchronen Betriebsfall möglich, der durch Kurzschliessen der Erregerwicklung erreicht werden kann. Dieser Betriebsfall kann mit einer PM-Maschine natürlich nicht realisiert werden, ausser für den Fall, dass man beim Rotor noch eine Kurzschlusswicklung hinzufügt. Ist ein Aufstarten trotzdem möglich? Ein Versuch wurde mit der Maschine « **PMSM Lange** » durchgeführt, die eine sinusförmig induzierte Spannung aufweist, mit der Erregung durch Ferritmagnete. Sie wurde mit Hilfe eines Variacs mit dem Netz verbunden: Selbst bei geringen Spannungen steigen die Ströme schnell über den Nennwert an, ohne dass die Maschine zu drehen beginnt. Beim Rotor entstehen Vibrationen die jedoch nicht genügend grosse Auslenkung erzeugen, um die Maschine zu synchronisieren.

**Aus diesem ersten Versuch kann damit gefolgert werden, dass eine Permanentmagnet-Synchronmaschine ohne Hilfelektronik nicht mit dem Netz synchronisiert werden kann.**

### Netzbetrieb mit Belastung

Das Ziel dieses Abschnitts liegt in der Untersuchung des Betriebsverhaltens einer PM-Synchronmaschine am Netz, die durch eine Hilfsvorrichtung angefahren und synchronisiert wurde. Auch wurde der Einfluss der Netzspannungsänderung untersucht, die ja um  $\pm 10\%$  ihres Nennwertes differieren kann. Die Maschine « **PMSM Lange** » wurde für einen quantitativen und einen qualitativen Test verwendet.

Analyse des Einflusses der Netzspannungsänderung

Bei einer Permanentmagnet-Synchronmaschine kann die induzierte Spannung nicht geregelt werden, da der Fluss konstant ist. Die Netzspannung, die um  $\pm 10\%$  des Nennwertes schwanken kann, wird daher mit der konstanten induzierten Spannung Stromänderungen und Blindleistung erzeugen, die den Wirkungsgrad der Maschine verringern kann. Ein vereinfachtes Maschinenmodell (ohne Kupferwiderstand), das aus den Nenndaten der Maschine « **PMSM Lange** » hergeleitet wurde, erläutert den Einfluss der Änderung der auf den Nennwert normierten Spannung auf den Maschinenstrom und den Leistungsfaktor.

Die linke Seite der Abb. 137 die Stromzunahme mit konstanter Leistung beim Abweichen der Spannung von ihrem Normwert. Für den untersuchten Leistungsbereich scheint eine Statorinduktivität von 5mH nicht ausreichend zu sein, um den Strom zu begrenzen.

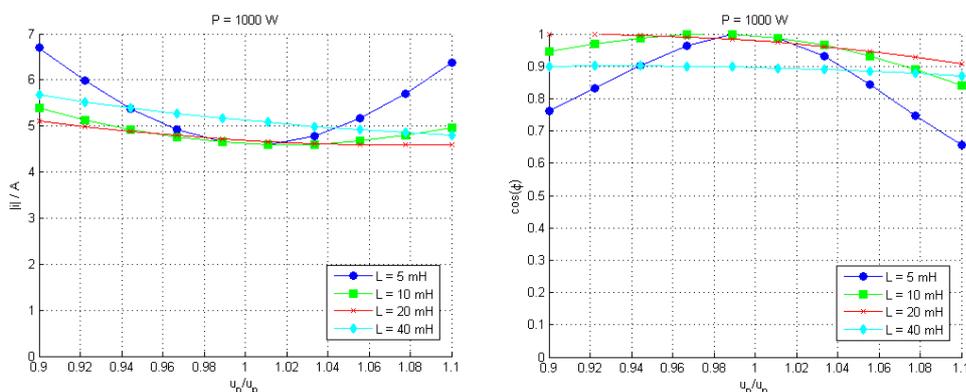


Abb. 137: Maschinenstrom und  $\cos\phi$  bei Änderung der Netzspannung

Die rechte Seite der Abb. 137 zeigt die Abnahme des Leistungsfaktors mit konstanter Leistung beim Abweichen der Spannung von ihrem Normwert. Eine zu grosse Statorinduktivität verringert den maximalen Leistungsfaktor.

Um in der untersuchten Leistungsklasse einen Netzbetrieb mit einem Leistungsfaktor  $>0.9$  zu erreichen, muss die Statorinduktivität der PM-Synchronmaschine ca. 20mH betragen.

#### Qualitativer Versuch des Netzbetriebs mit Belastung

Dieser Versuch erlaubt die Untersuchung des Betriebsverhaltens der belasteten Maschine am Netz. Von besonderem Interesse sind eventuelle Pendelschwingungen im stationären Betrieb. Dazu wurde die Maschine « **PMSM Lange** » mit Hilfe einer Gleichstrommaschine aufgestartet, mit dem Netz synchronisiert, und anschliessend mit einer weiteren, mit Widerständen verbundenen, Synchronmaschine belastet. Die Maschine zeigt keinerlei Anzeichen einer Instabilität im stationären Betrieb, nur bei Laständerung entsteht eine nach wenigen Perioden abklingende Schwingung, und der neue stabile Betriebspunkt wird schnell wieder erreicht.

**Dieser Versuch hat gezeigt, dass es möglich ist, eine Permanentmagnet-Synchronmaschine mit sinusförmiger induzierter Spannung am Netz zu betreiben.**

#### Quantitativer Versuch des Netzbetriebs mit Belastung

Für diesen Versuch wurde wiederum die Maschine « **PMSM Lange** » verwendet, weil ihre Statorinduktivität ungefähr dem gefundenen optimalen Wert entspricht ( $L_d = 15.8\text{mH} / L_q = 20.1\text{mH}$ ). Die Wellenleistung wird im Motorbetrieb in Funktion der Speisespannung gemessen, mit einem konstanten Stromwert als Parameter. Eine stromrichter-gespeiste Gleichstrommaschine dient zum Hochfahren und Bremsen der « **PMSM Lange** ». Zwischen beiden Maschinen wurde eine Schwungmasse eingefügt, für die mechanische Montage der Drehmomentmessung.

Die linke Seite der Abb. 138 zeigt die mechanische Leistung in Funktion der Speisespannung, mit einem konstanten Stromwert als Parameter: In diesem Fall wurde aus Gründen des Messaufbaus der Strom konstant gehalten, und nicht die Leistung. Bei einem Wert der Speisespannung ausserhalb des idealen Bereichs der induzierten Spannung sinkt die verfügbare Wellenleistung.

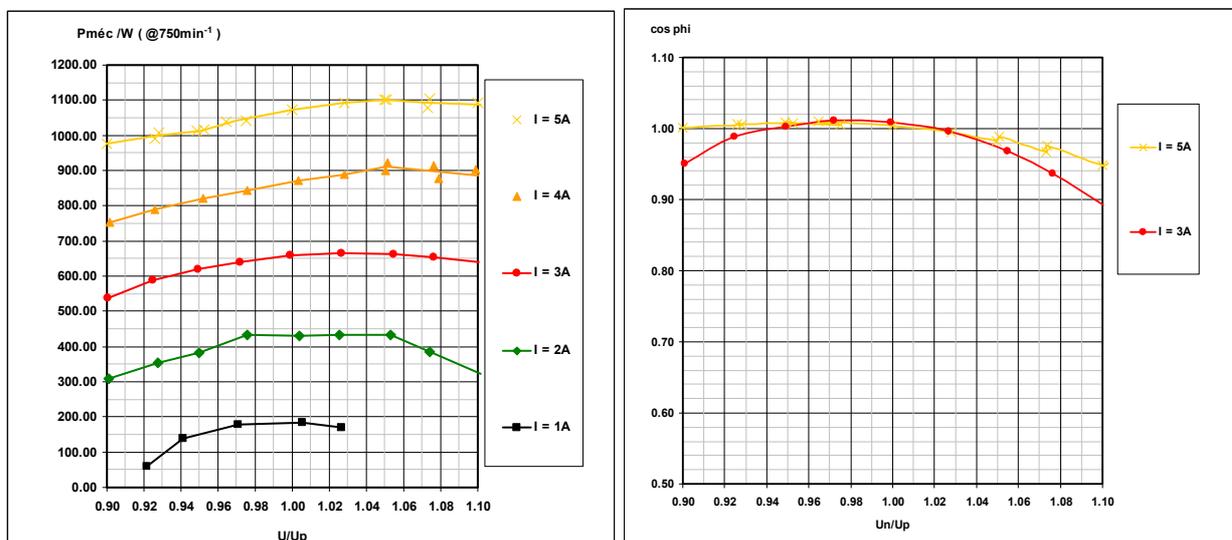


Abb. 138: Wellenleistung und  $\cos \varphi$  in Funktion der Netzspannung « PMSM Lange »

Die rechte Seite der Abb. 138 zeigt den Einfluss der Netzspannung auf den Leistungsfaktor der Maschine. Dieser Leistungsfaktor wurde anhand der Messungen rückgerechnet (Spannung, Strom und Leistung) und ohne Korrektur in der Figur dargestellt: Mit der Messgenauigkeit der vorhandenen Geräte ergibt sich ein Leistungsfaktor grösser als 1, und damit ist dieses Resultat nicht Nobelpreis würdig. Der Blindstromanteil wird durch die Spannungsdifferenz zwischen Netzspannung und induzierter Spannung bestimmt. Bei einer bestimmten Spannung bleibt also dieser Blindanteil konstant, und damit ist der Leistungsfaktor bei hoher Wirkleistung in diesem Arbeitspunkt besser als bei geringer Wirkleistung. Im Vergleich zur Asynchronmaschine kann dieser Blindanteil im Netzbetrieb den Vorteil der PM Maschine mit einem guten Wirkungsgrad im Teillastbereich wieder zunichte machen.

Bei einem konstanten Strom von 5A ändert sich die gemessene Wellenleistung im Bereich von 11%. Der Vergleich zu den mit  $L=20\text{mH}$  simulierten Werten der Abb. 137 zeigt, dass diese Werte nahe bei einander liegen.

Für den Netzbetrieb bildet also die Statorinduktivität den bestimmenden Anteil bei der Dimensionierung einer Permanentmagnet Synchronmaschine: Sie bestimmt die Stromänderungen und den Leistungsfaktor.

### Anfahrhilfe für die PM Maschine im Netzbetrieb

Um eine Permanentmagnet Synchronmaschine am Netz betreiben zu können, müssen 2 Probleme gelöst werden: Das Anfahren der Maschine und den Betrieb im Toleranzbereich der Netzspannung. Für den Toleranzbereich der Netzspannung reicht eventuell die geeignete Wahl der Statorinduktivität, das Anfahren der Maschine jedoch sollte möglichst kostengünstig mit einer einfachen Elektronik ermöglicht werden: Die elektronische Schaltung ist nur beim Anfahren aktiv und wird nach der Synchronisierung überbrückt. Als Schaltung ist ein Aufbau mit Thyristoren oder AC-Schaltern denkbar, neben der bekannten Frequenzumrichterschaltung. Abb. 139 erläutert den Vorschlag mit AC-Schaltern.

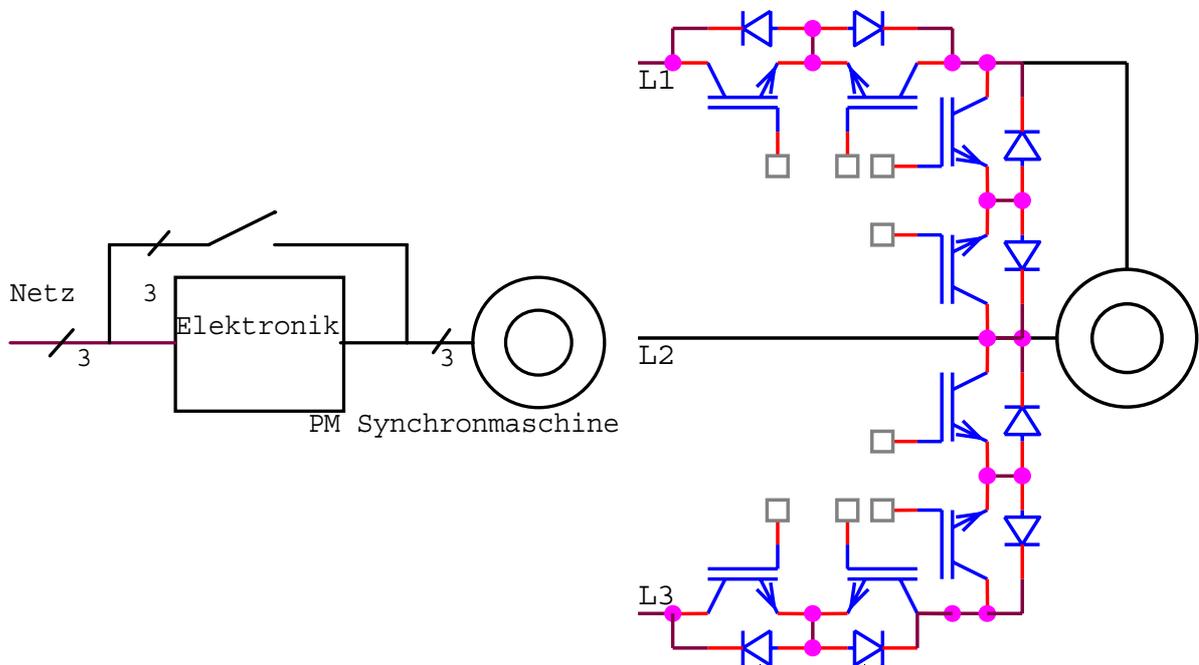


Abb. 139: Prinzip der Anfahrhilfe für PM-Maschinen am Netz

### 4.2.3 Drehzahlregelung einer Synchronmaschine

Verschiedene Regelstrategien sind zu untersuchen. Die einfachste Methode, die Frequenz-Spannungsmethode  $f/U$ , wird nicht empfohlen, weil ohne Kenntnis der Rotorposition die zuverlässige Funktion der Maschine schwierig zu realisieren ist (siehe nächster „Abschnitt: Sinusmodulation“)

Die Messung der Rotorposition erlaubt einen zuverlässigen Betrieb des Antriebssystems. Zwei Messmethoden sind möglich: Messung mit Hilfe eines Winkelgebers, der die Position kontinuierlich bestimmt, oder Messung mit Hallsonden an bestimmten Stellen.

Die Art der Positionsmessung bestimmt den Modulationstypen. Mit dem Winkelgeber wird die Sinusmodulation möglich, die meistens bei Maschinen mit sinusförmiger induzierte Spannung angewendet wird (PMSM Permanentmagnet Synchronmaschine). Mit den Hallsonden ergibt sich die Blockmodulation, die vor allem bei Maschinen mit trapezförmig induzierter Spannung verwendet wird (BLDC brushless direct current). Es ist jedoch möglich, die Sinusmodulation bei einer BLDC und die Blockmodulation bei einer PMSM zu verwenden.

Die Messung von mindestens zwei Phasenströmen bei der Sinusmodulation und des Zwischenkreisstromes bei der Blockmodulation erlaubt die Kontrolle des Drehmoments. Die « **BLDC DM-SNP** »-Maschine wurde daher im Betrieb mit einer Drehmomentregelung ausgemessen, um einen stabilen Arbeitspunkt und zuverlässige Messungen zu erhalten.

Die Abb.140 erläutert diese beiden Modulationsmethoden mit Drehmomentregelung der « **BLDC DM-SNP** »-Maschine bei einer Wellenleistung von 2kW. Die Signale wurden mit einem Tiefpassfilter von 4kHz Bandbreite gefiltert um die Lesbarkeit zu verbessern und die Schaltfrequenz von 10kHz zu unterdrücken.

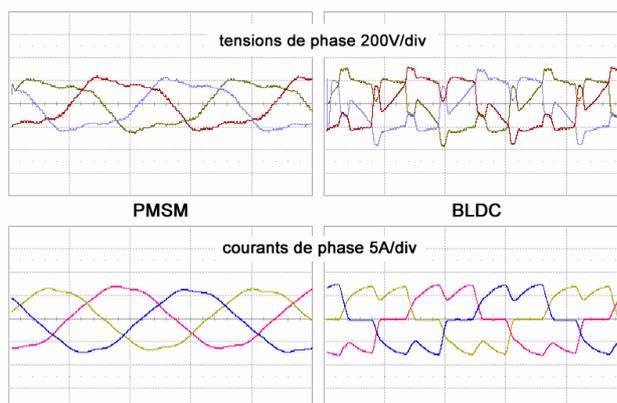


Abb. 140: Sinusmodulation und Blockmodulation der « **BLDC DM-SNP** »-Maschine

Die Drehzahl ist nun einfach zu regeln: Es genügt einen überlagerten PI-Regler zu entwerfen, der den Sollwert des Drehmomentreglers liefert um die gewünschte Drehzahl zu erreichen.

Die Drehmomentregelung verteuert das System, weil mindestens eine Strommessung für die Blockmodulation und zwei Strommessungen für die Sinusmodulation benötigt werden.

In den beiden nächsten Kapiteln wird gezeigt, wie die vorhandenen Synchronmaschinen ohne Strommessung getestet werden können. Mit einer Geschwindigkeitsregelung kann die Drehzahl festgelegt werden.

### 4.2.3.1 Sinusmodulation

Die Abb.141 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.

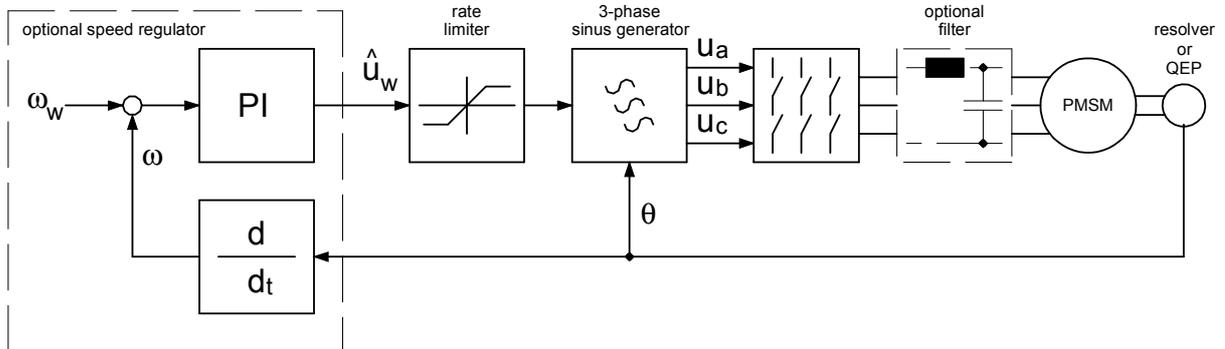


Abb. 141: Sinusmodulation : Prinzipschema

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.

Die Abb. 142 zeigt die Geschwindigkeitsänderung dieser Maschine. Die Nenndrehzahl der « **PMSM HGA** »-Maschine beträgt 60U/min. Diese Drehzahl kann nicht erreicht werden, weil der Strom den zulässigen Wert überschreitet.

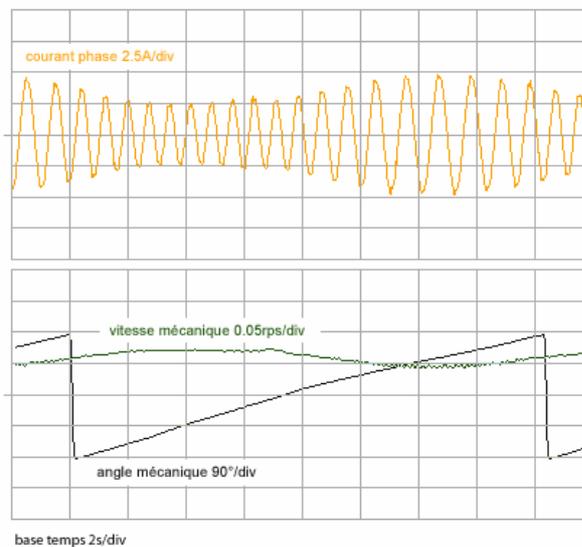


Abb. 142: f/U Steuerung der « PMSM HGA »-Maschine

Die konzentrischen Wicklungen der « **PMSM HGA** »-Maschine ergeben ein Reluktanzmoment: Jedes mal wenn ein Pol dieses Moments erreicht wird, beschleunigt oder bremst die Maschine. Damit variiert die induzierte Spannung und erzeugt eine bedeutende Strom- respektive Drehmomentänderung, die der Geschwindigkeitsänderung entgegenwirkt. Dieses Phänomen wiederholt sich bei jeder Umdrehung und erzeugt Schwingungen im System.

Mit der Belastung der Maschine wird der Mittelwert des Moments grösser als das Reluktanzmoment, und mit dem Trägheitsmoment wird die Drehzahl stabilisiert (eine Simulation ergab: Leerlaufmoment  $\approx 15$  Nm, Polspitzen des Reluktanzmoments  $-3\text{Nm} \rightarrow +6\text{Nm}$ ).

### 4.2.3.2 Blockmodulation

Die Abb. 143 zeigt das Prinzip einer solchen Modulation ohne Drehmomentregelung. Eventuell kann ein Geschwindigkeitsregler überlagert werden.

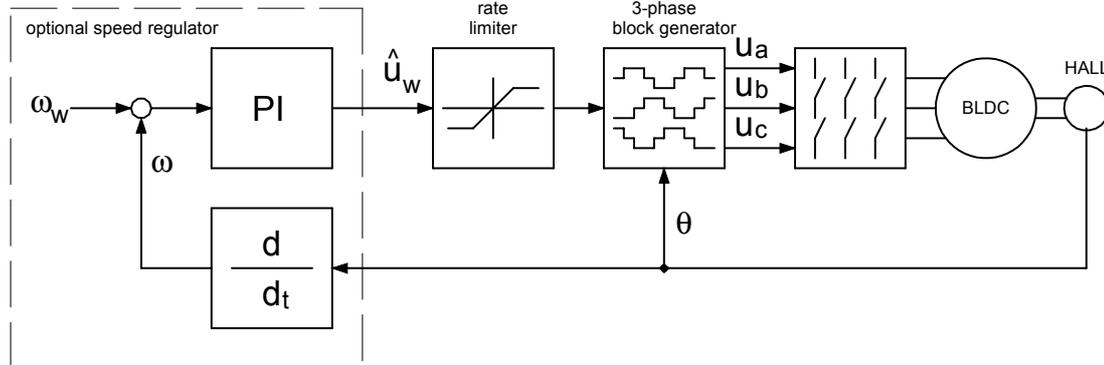


Abb. 143: Prinzipschema der Blockmodulation

Die « **BLDC DM-SNP** »-Maschine wurde mit dieser Modulationsart getestet. Oberhalb einer Minimaldrehzahl (100U/min) funktioniert das System einwandfrei, unterhalb dieser Drehzahl entstehen Stromspitzen durch die Begrenzung der minimalen Leitdauer der Schalter.

### 4.2.4 Messgeräte: Prinzip der Messungen und Genauigkeit

In diesem Kapitel soll erläutert werden, wie die Wirkungsgradmessungen durchgeführt wurden. Der erste Abschnitt beschreibt die mechanisch-elektrische Kopplung der Maschinen, der zweite erläutert die Messmethode der Drehmomentmessung an der Welle, der dritte zeigt die Messmethode der Leistungsmessung bei den Maschinen und der vierte listet die Messgenauigkeit der verwendeten Geräte auf.

#### Mechanisch-elektrische Kopplung der Maschinen

Mit Ausnahme der « **PMSM HGA** »-Maschine, die wegen ihrer geringen Drehzahl von 60U/min nicht belastet werden konnte (die Hochschule Wallis verfügt über keine solche Lastmaschine) wurden alle Maschinen mit den laborüblichen Montagedreiecken aufgebaut und im Leerlauf, mit blockiertem Rotor und mit Lastmaschine getestet.

Für die Lastmessungen wurde jede Asynchronmaschine mit der **BLDC**-Maschine gekoppelt. Zwischen den Wellen wurde ein Drehmoment-Messgerät (Torquemaster TM 208B) mit Hilfe von Aluminiumkupplungen eingefügt, die jeweils einen Freiheitsgrad erlauben. Damit kompensieren sich die Fehler der Ausrichtung. Die Abb. 144 zeigt die Testbank und die Kopplung der « **ASM ABB M3AA** »-Maschine mit der « **BLDC DM-SNP** »-Maschine.



Abb. 144: Mechanische Kopplung der Maschinen ASM ↔ BLDC

Die Messung der elektrischen Größen erfolgte mit einem Wattmeter für den Netzbetrieb oder den Wechselrichterbetrieb mit Ausgangsfilter, im anderen Fall mit einem 4-Kanal Oszilloskop mit hoher Abtastrate für den Wechselrichterbetrieb der Maschinen ohne Ausgangsfilter. Dabei wurde in beiden Fällen die Aaron-Schaltung verwendet.

Die Abb. 145 zeigt das Blockscha der Systemmessung am Beispiel der Wirkungsgradmessung der Asynchronmaschine und der Wirkungsgradmessung des Frequenzumrichters.

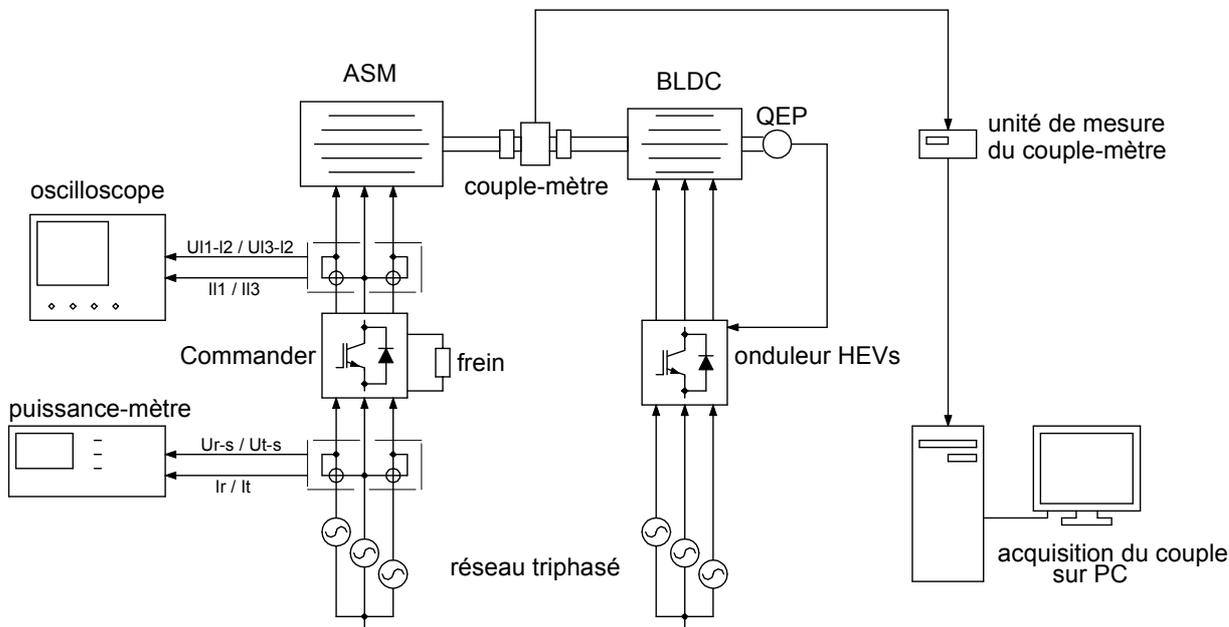


Abb. 145: Blockscha des gesamten Messaufbaus

### Drehmomentmessmethode an der Welle

Die Messelektronik des Drehmomentmessgerätes wird über die serielle Schnittstelle mit einem PC verbunden. Die Momentanwerte der Geschwindigkeit und des Drehmoments werden mit einer Abtastperiode von 5ms zum PC übertragen, dies erfolgt während der gleichen Messerfassungsdauer der elektrischen Werte für jeden Arbeitspunkt jeder Maschine. Die abgetasteten Werte werden gespeichert und die Mittelwerte der Geschwindigkeit und des Drehmoments werden berechnet. Es werden 15000 Abtastungen verwendet.

### Messmethode der elektrischen Leistung

Die an der Hochschule Wallis verfügbaren Power- Analyzer und Wattmeter erlauben keine genaue Messungen mit den gepulsten Ausgangsspannungen der Wechselrichter: Deshalb wurde ein Oszilloskop mit hoher Abtastrate verwendet. Um einen relativen Vergleich zwischen den Messungen aller Maschinen durchführen zu können, wurde immer dasselbe Oszilloskop mit den selben Sonden verwendet. Die Abtastdauer entsprach bei den Asynchronmaschinen und der brushless DC-Maschine BLDC einer mechanischen Periode, synchronisiert durch den Index des an der BLDC montierten Encoders, also 20ms. Diese Periode entspricht einer oder drei elektrischen Perioden je nach gemessener Maschine (ASM oder BLDC). In dieser Zeit wurden 2 Millionen Abtastungen durchgeführt, was einer Abtastperiode von 10ns entspricht. Die momentane Leistung wurde aus den Messungen von Strom und Spannung berechnet.

32 Messwerte wurden in jedem Arbeitspunkt aufgenommen. Die Mittelwerte der Spannungen, Ströme und der momentanen Leistungen wurden mit dem Oszilloskop berechnet und angezeigt. Die Messwertaufnahme erfolgte simultan zu den Messwerten des Drehmoments. Die Abb.146 zeigt eine solche Messaufnahme.

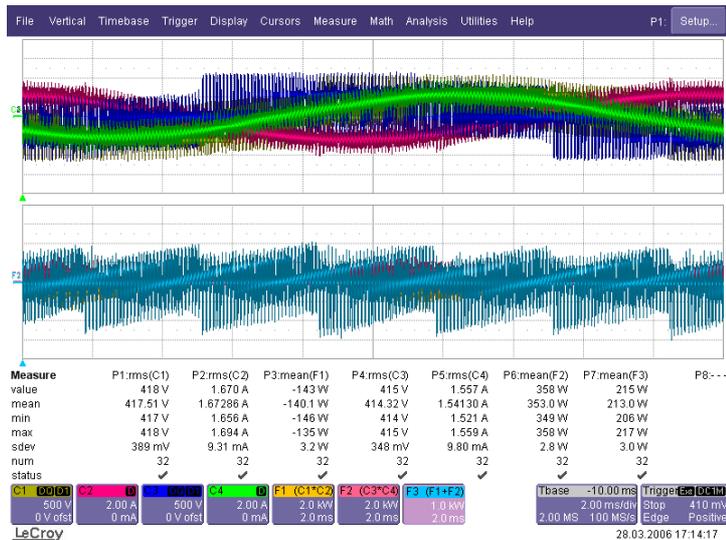


Abb. 146: Messwertaufnahme mit dem Oszilloskop

Um die Messmethode zu überprüfen, wurden die Leerlauf- und Lastmessungen der Asynchronmaschinen im Netzbetrieb parallel mit dem Power-Analyzer durchgeführt, dessen Genauigkeit als Referenz für die Oszilloskopmessungen diente. Die relative Genauigkeit der Oszilloskopmessungen war sehr gut (repetitive Messungen ergaben kleine Abweichungen). Dagegen ergaben sich stärkere Abweichungen der absoluten Genauigkeit vor allem bei geringen Leistungen (Auflösung der AD-Wandler des Oszilloskops). Um eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen zu erreichen, wurden Spannungs- und Strombereich des Oszilloskops nicht kontinuierlich der Signalamplitude nachgeführt (500V/div und 2A/div für die Leerlaufmessungen und 500V/div und 5A/div für die Lastmessungen). Die Abb.147 zeigt diese Abweichungen.

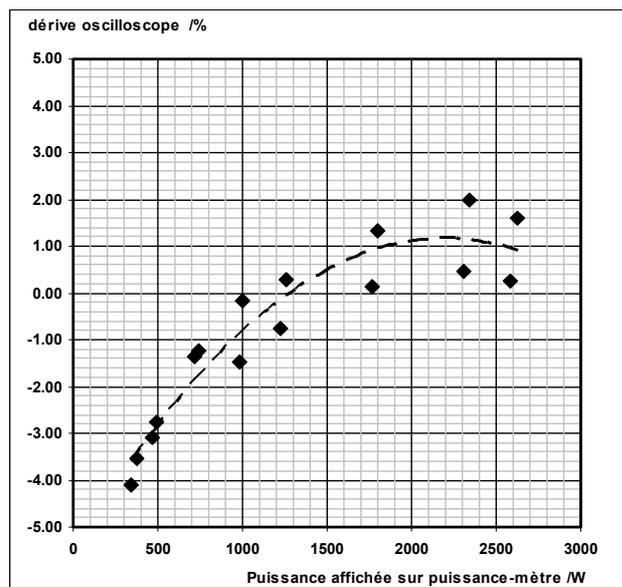


Abb. 147: Abweichung der Oszilloskopmessung im Vergleich zur Wattmetermessung

## Messgeräte: Prinzip der Messungen und Genauigkeit

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

Drehmomentmessung	Lieferant	Typ	Gemessene Signale / Einheiten	Gesamter maximaler Fehler
Drehmoment/ Geschwindigkeit Messeinheit	Vibro-Meter SA, CH-Fribourg	TM 208B	T /Nm	$\leq \pm 0.15\%$
Drehmoment/ Geschwindigkeit Erfassungseinheit	Vibro-Meter SA, CH-Fribourg	Magtrol 3400	U /V	$\leq \pm 0.01\%$
<b>Totaler Fehler der mechanischen Leistung</b>				<b><math>\leq 0.16\%</math></b>

Abb. 148: Drehmomentmessung

Wattmeter	Lieferant	Typ	Gemessene Signale / Einheiten	Gesamter maximaler Fehler
	AVPower Ltd, UK-Berkshire	PA4400A	U /V ■ I /A	$\leq 0.82\% \blacksquare 0.17\%$
<b>Totaler Fehler der elektrischen Leistung</b>				<b><math>\leq 0.99\%</math></b>

Abb 149: Leistungsmessung mit Wattmeter

Oszilloskop	Lieferant	Typ	Gemessene Signale / Einheiten	Gesamter maximaler Fehler
Oszilloskop	Lecroy SA, CH-Genève	WaveRunner 6050A	U /V	$\leq \pm 1.5\%$
Stromsonden	Lecroy SA, CH-Genève	AP015	I /A	$\leq \pm 1\%$
Differentielle Spannungssonden	Pewatron, CH-Wallisellen	si-9110	U /V	$\leq \pm 2.1\%$
<b>Totaler Fehler der elektrischen Leistung</b>			P /W	<b><math>\leq 4.6 \%</math></b>

Abb. 150: Leistungsmessung mit Oszilloskop

## 4.2.5 Leerlaufmessungen

Bei den vorhandenen Maschinen wurden verschiedenen Tests und Messungen durchgeführt um die Leerlaufverluste zu bestimmen und die mechanischen Verluste von den Eisenverlusten zu unterscheiden. Die Messung der Leerlaufverluste erlaubt ebenfalls die Bestimmung des Einflusses der Wechselrichterspeisung auf die Eisenverluste.

### 4.2.5.1 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 natürlich 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 weggefiltert.

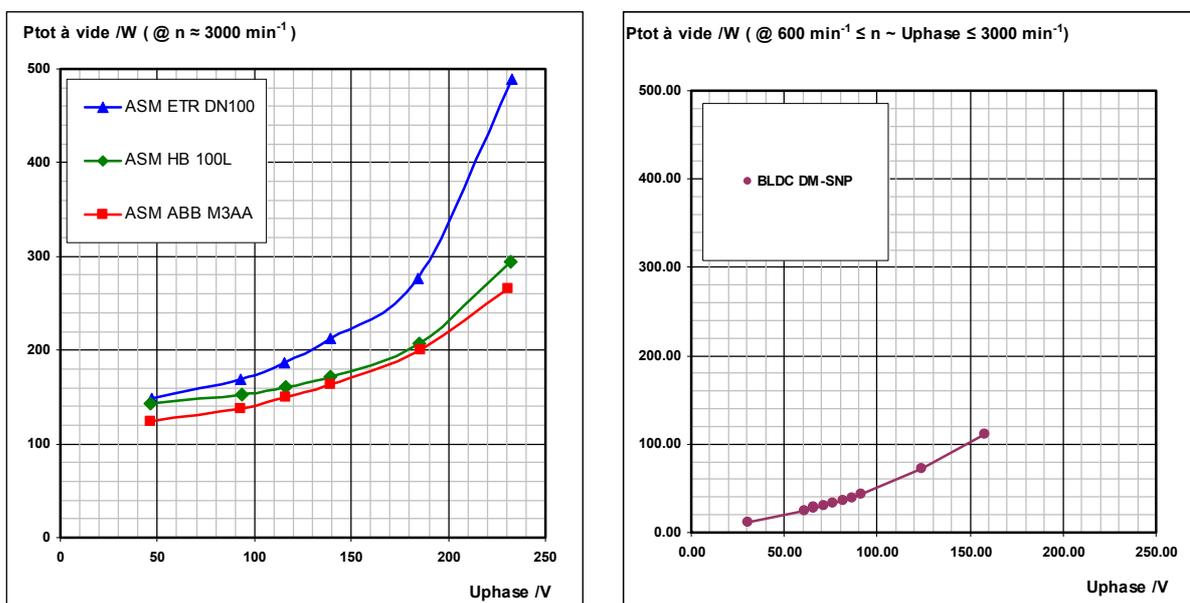


Abb. 151: Verlauf der Verluste in Funktion der Phasenspannung

Der linke Teil der Abb. 151 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. Die Verluste der Maschine « **ASM ETR DN100** » steigen besonders stark an mit der Erhöhung der Speisespannung. Bei den Maschinen « **ASM ABB M3AA** » und « **ASM HB 100L** » sind die Verluste vergleichbar. Mit diesen Messungen konnten die Kupferverluste, die mechanischen Verluste und die Eisenverluste bestimmt werden. Die Kupferverluste wurden mit Hilfe der Strommessungen bestimmt. Die verbleibenden Verluste können in die mechanischen Verluste und in Eisenverluste aufgeteilt werden (mechanische Verluste bilden einen konstanten Anteil, die Eisenverluste steigen mit dem Quadrat des Spannungswertes)

Der rechte Teil der Abb. 151 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). Dazu muss noch berücksichtigt werden, dass die induzierte Spannung der Synchronmaschine kleiner war als berechnet (160V gegenüber 230V bei den Asynchron-Maschinen), wobei die Frequenz bei der SM jedoch höher war (150Hz gegenüber 50Hz bei den Asynchronmaschinen). Auf Grund dieser Messungen wurden die Verluste wiederum 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 und verstehen sich dadurch, dass mit der Drehzeigerregelung der Synchronmaschine nur soviel Strom floss wie zur Kompensierung der Verluste benötigt wurde (1A gegenüber mehr als 3A bei den Asynchronmaschinen).

Die Eisenverluste der **BLDC « DM-SNP »** werden auf 69W geschätzt, also auf etwas mehr als die Hälfte der Maschinen **ASM « HB 100L »** und **« ABB M3AA »**.

#### 4.2.5.2 HF-Verluste in Funktion der Schaltfrequenz im Leerlauf

Um die verschiedenen Messungen vergleichen zu können, wurden die Verluste der Asynchronmaschinen bei einer verketteten Spannung von 320V bestimmt, während dieser Wert bei der Synchronmaschine **« DM-SNP »** 200V betrug: Dies sowohl mit Netzspeisung (oder Wechselrichterspeisung mit HF-Filter für die DM-SNP) als auch mit der Speisung durch den Wechselrichter ohne HF-Filter. Die Abb. 152 zeigt die Verluste der Maschinen in Funktion der Schaltfrequenz. Die Verluste bei der Schaltfrequenz  $f=0\text{kHz}$  entsprechen dem Netzbetrieb, respektive dem Wechselrichterbetrieb mit HF-Filter für die Synchronmaschine.

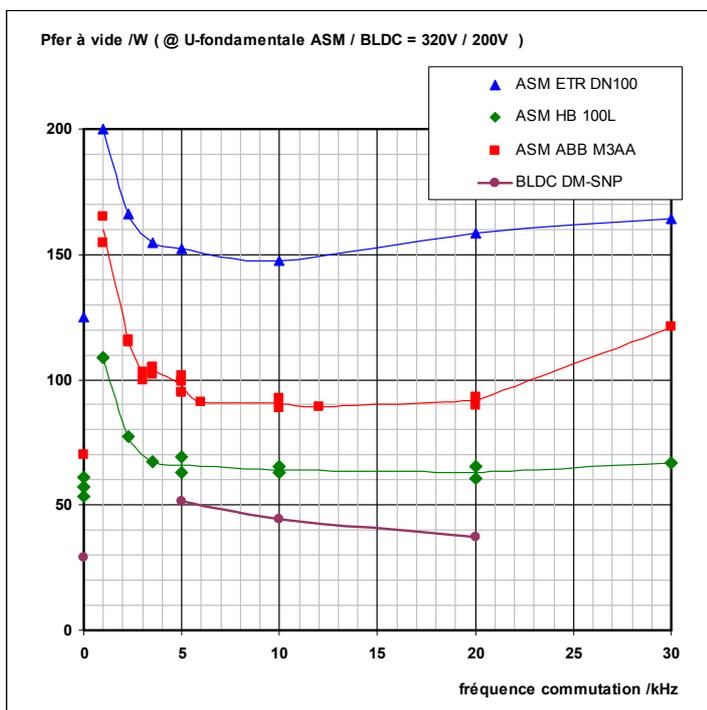


Abb. 152: Verluste in Funktion der Schaltfrequenz

Beim Wechselrichterbetrieb der Maschinen sollte die Schaltfrequenz genügend hoch gewählt werden, um die Verluste durch die Stromwelligkeit gering zu halten. Allgemein kann bemerkt werden, dass bei den gemessenen Asynchronmaschinen minimale Verluste zwischen 5kHz und 12kHz resultieren.

Die Abb. 153 erläutert dieses Verhalten. Die Bildschirmanzeigen des Oszilloskops wurden für die Maschine **« ASM ABB M3AA »** unter gleichen Bedingungen bei den folgenden Frequenzen ausgedruckt: Von oben links nach unten rechts: 1kHz– 2.25kHz – 3.5kHz - 5kHz - 10kHz - 20kHz. Die obere Hälfte der Teilbilder zeigt die Leiterströme während einer Periode (2A/div / 2.00ms/div). Der untere Teil ist ein vergrößerter Ausschnitt der oberen Hälfte (2A/div / 500µs/div).

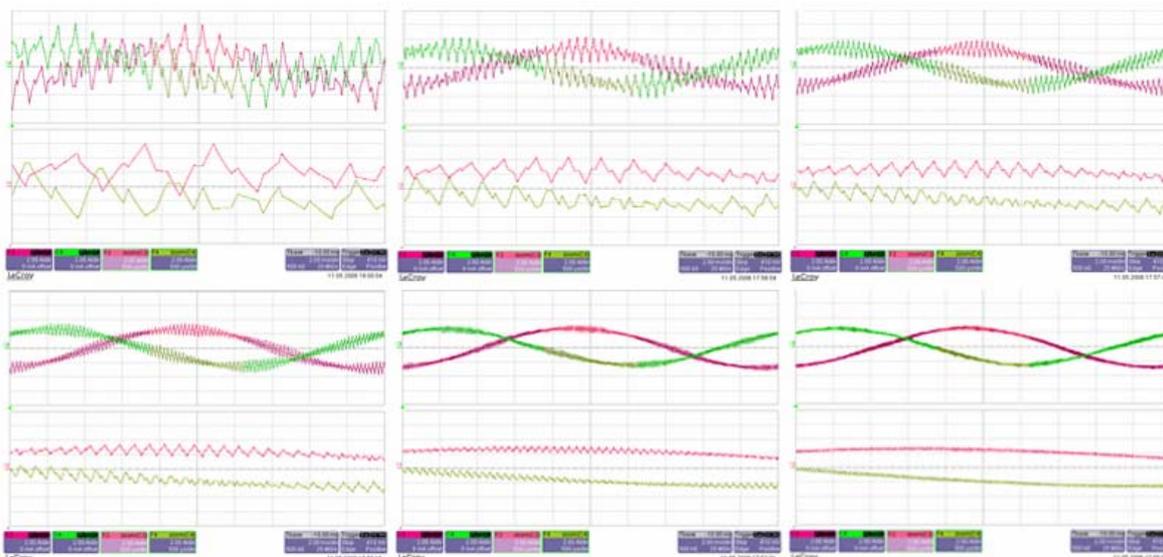


Abb. 153: ASM ABB M3AA

Bei der Schaltfrequenz von 1kHz erreicht die Stromwelligkeit 7App. Ein vernünftiger Wert der Stromwelligkeit scheint 1.7App zu sein, also 10% der Nennamplitude. Diese Welligkeit wird für Schaltfrequenzen grösser als 5kHz erreicht.

#### 4.2.6 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 Permanentmagnet 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 PM 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 Frequenzumrichter gesteuert, dessen Zwischenkreisspannung vom gleichgerichteten Netz geliefert wird (560Vdc). Ein Wechselrichter regelt das Drehmoment der Synchronmaschine. Ein negatives Moment belastet die Asynchronmaschine, die damit motorisch arbeitet, während ein positives Moment die Asynchronmaschine in den Generatorbetrieb versetzt.

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 Totzeitkompensation 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. Im Kapitel „Messgeräte: Prinzip der Messungen und Genauigkeit“ werden die verwendeten Messgeräte näher erläutert.

#### 4.2.6.1 Wirkungsgrad im Netzbetrieb

Die Asynchronmaschinen werden direkt mit dem Netz verbunden. Da die PM-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.

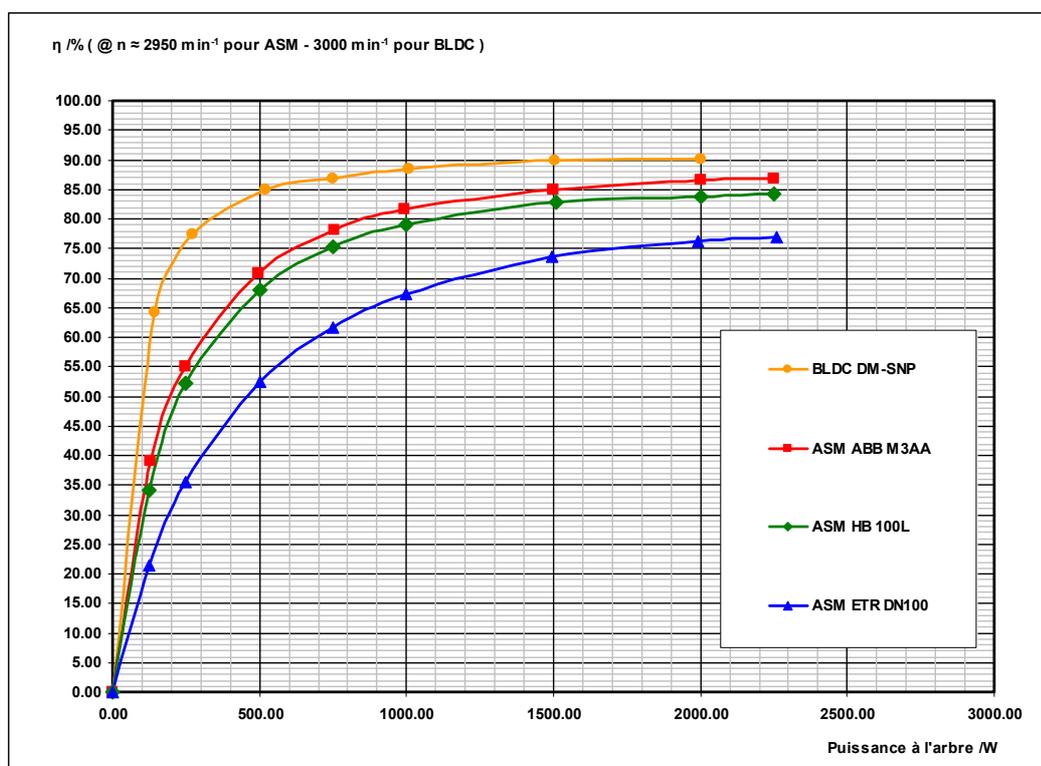


Abb. 154: Wirkungsgradvergleich BLDC ↔ ASM

Aus dieser Figur ist der höhere Wirkungsgrad der PM-Maschine « **BLDC DM-SNP** » klar ersichtlich. Dies wird durch die Art der Regelung noch verstärkt, vor allem im Teillastbereich. Im dq- Betriebsfall wird nur derjenige Strom geliefert, der zur Erzeugung des Moments notwendig ist. Damit ergeben sich bei einer Wellenleistung von 500W 1.6 A bei der PM-Maschine « **BLDC DM-SNP** », 3.3 A bei der hocheffizienten Maschine « **ASM ABBM3AA** » und 3.8 A bei der schlechtesten der getesteten Maschinen, der « **ASM ETR DN100** ». 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.

#### 4.2.6.2 Einfluss der Schaltfrequenz auf den Wirkungsgrad

Die Asynchronmaschinen werden entweder direkt durch das Netz gespeist oder durch einen f/U gesteuerten Wechselrichter mit der Schaltfrequenz von 12kHz. Die PM-Synchronmaschine « **BLDC DM-SNP** » wird entweder von einem Sinuswechselrichter mit 20kHz Schaltfrequenz und Ausgangsfilter oder mit 10kHz ohne Filter angesteuert. Die Kennlinie der « **ASM HB 100L** » liegt nahe bei der Kennlinie der « **ASM ABB M3AA** ». Um die Figur nicht zu überlasten, wurde auf die Wiedergabe der « **ASM HB 100L** » –Kennlinie verzichtet.

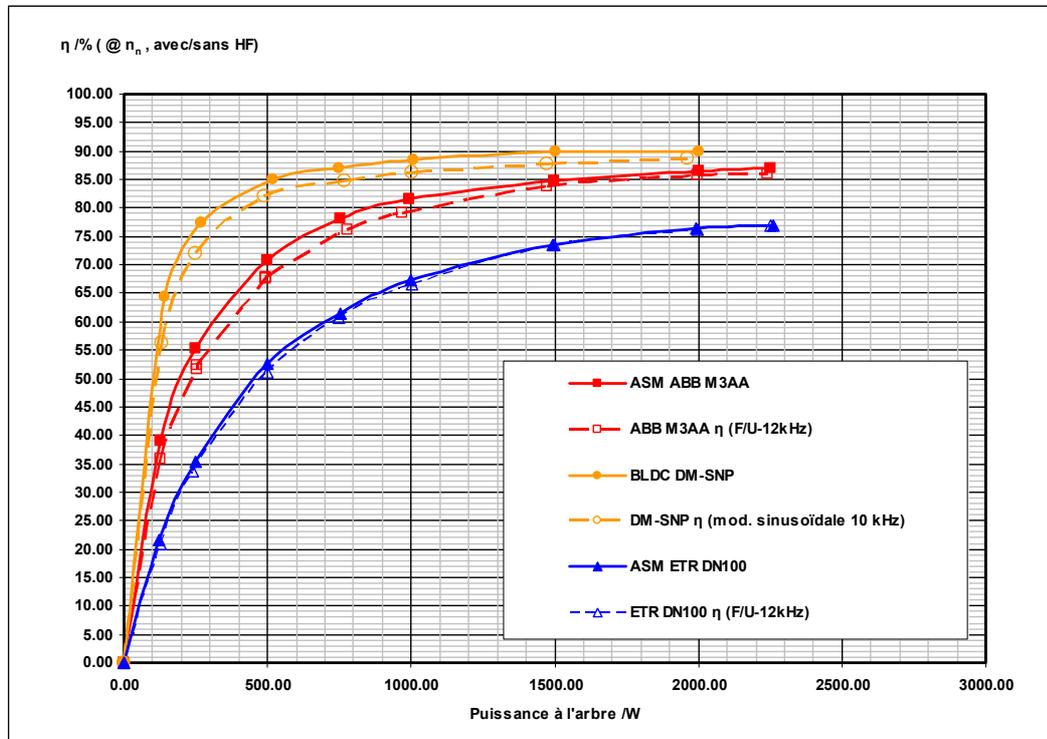


Abb. 155: Wirkungsgradvergleich ohne HF ⇔ mit HF

Der Wirkungsgrad dieser Maschinen bei den Schaltfrequenzen von 6kHz(ASM) respektive 5kHz(PMSM) ist praktisch identisch mit den Kennlinien bei 12kHz(ASM) respektive 10kHz(PMSM). Dies erhärtet damit die Resultate des Kapitels „HF-Verluste in Funktion der Schaltfrequenz im Leerlauf“. Aus diesem Grunde wurden die Kennlinien bei 5kHz/6kHz nicht dargestellt, um die Figur nicht zu überlasten.

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.

#### 4.2.6.3 Einfluss der Modulationsart Sinus ⇔ Block

Der Aufbau einer Permanentmagnetmaschine kann derart erfolgen, dass entweder eine sinus- oder trapezförmige induzierte Spannung resultiert. Diese induzierte Spannung bestimmt im Prinzip die Art der Modulation. Es ist jedoch durchaus möglich, eine sinusförmig modulierte Spannung an eine « brushless DC » (BLDC) Maschine anzulegen, wie es umgekehrt auch möglich ist, eine Blockmodulation bei einer Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM) durchzuführen.

Die Maschine wurde also unter denselben Bedingungen bei diesen beiden Modulationsverfahren belastet. In beiden Fällen wurde ein Stromregler eingeführt, um das Moment der Maschine zu steuern.

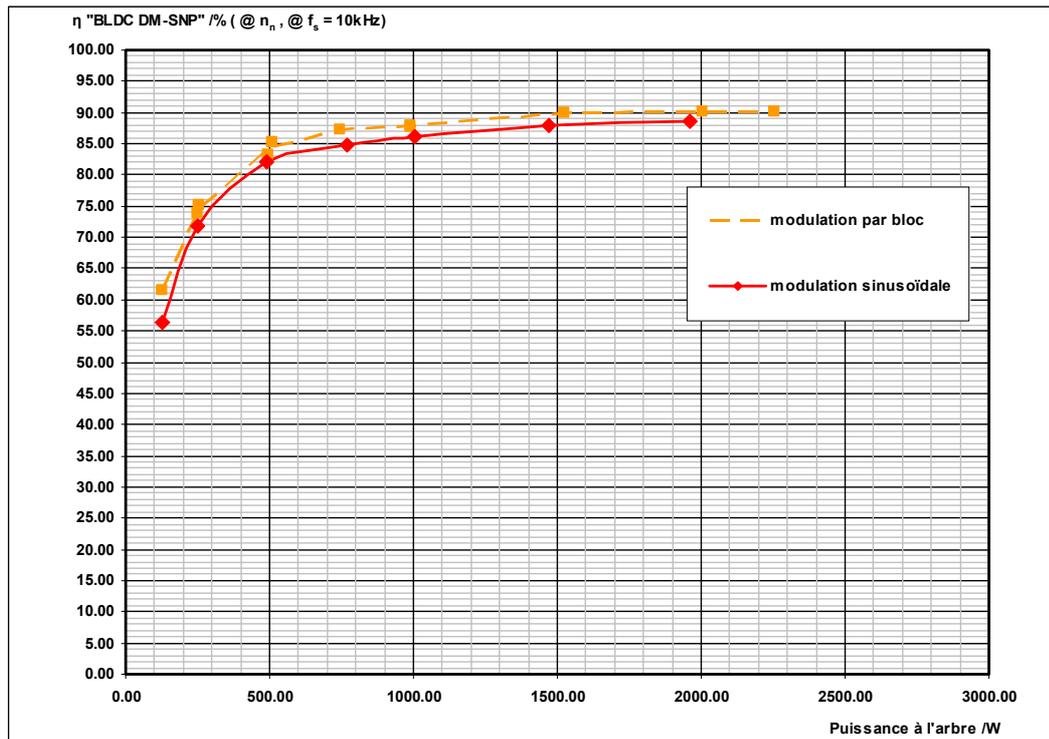


Abb. 156: Wirkungsgradvergleich Sinusmodulation ↔ Blockmodulation

Aus der Abb. 156 ist ersichtlich, dass mit der Blockmodulation ein höherer Wirkungsgrad resultiert. Die verwendete Maschine ist ein « brushless DC » (BLDC) Typ. Zusätzlich ist jede Phase während einem Drittel der elektrischen Periode vom Wechselrichter getrennt, was zur Verringerung der HF-Verluste führt.

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

#### 4.2.6.4 Bemerkungen zu gepulsten elektronischen Stellern

Da für viele Anwendungen eine variable Drehzahl gefordert wird, ist es sinnvoll, den Wirkungsgrad des Frequenzumrichters zu bestimmen, um damit den gesamten Wirkungsgrad des Antriebssystems zu kennen. Der Wirkungsgrad des verwendeten, handelsüblichen Frequenzumrichters

« Commander SE23400220 » wurde also gleichzeitig mit dem Wirkungsgrad der Maschinen bestimmt, bei den Schaltfrequenzen 6kHz und 12kHz. Allgemein kann bemerkt werden, dass der Lärmpegel bei 12kHz als unangenehmer empfunden wird, im Vergleich zu 6kHz.

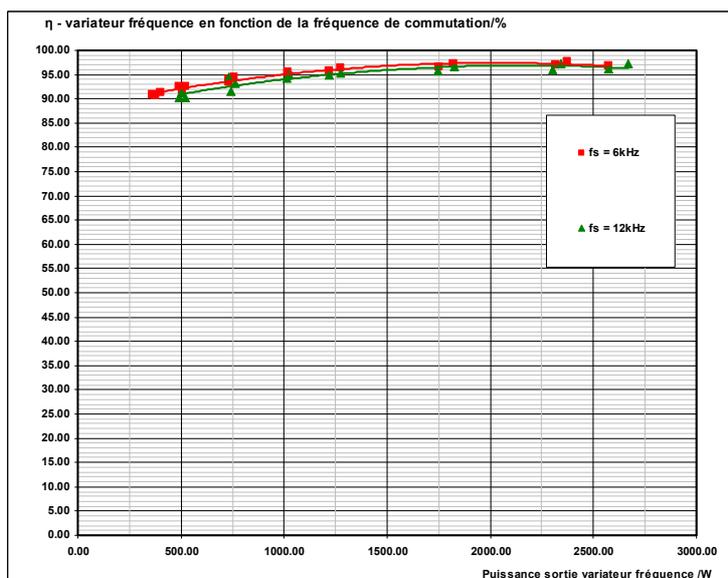


Abb. 157: Wirkungsgrad des Frequenzumrichters « Commander SE23400220 »

Aus der Abb. 157 ist eine Verringerung des Wirkungsgrades bei der höheren Schaltfrequenz ersichtlich (ca. 1%). Diese Verringerung ist bei Nennlast schwer messbar. Allgemein kann bemerkt werden, dass durch die Einfügung des Frequenzumrichters der Wirkungsgrad des Antriebssystems um ca. 5% verringert wird (Verluste des Frequenzumrichters und Maschinenverluste durch die Stromwelligkeit). Diese Verringerung wird in der Abb. 158 illustriert.

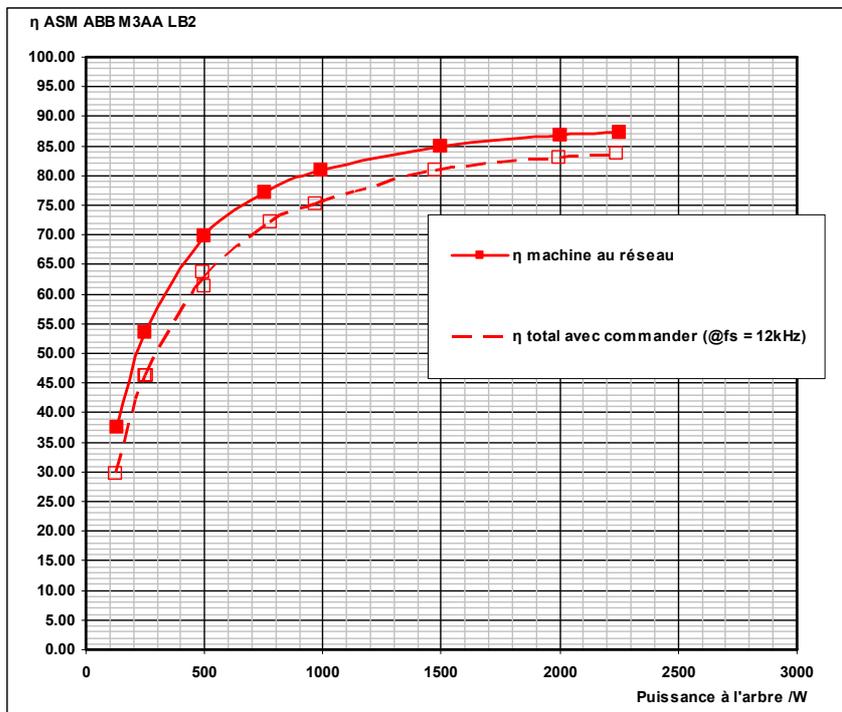


Abb. 158: Gesamtwirkungsgrad Frequenzumrichter – ASM « ABB M3AA LB 2 »

Die Leistungsaufnahme des « Commander SE23400220 » wurde ebenfalls in 2 speziellen Betriebspunkten untersucht: Im „Stand-By“ Betrieb und bei stillstehender Maschine und eingeschaltetem Frequenzumrichter.

Beschreibung	fs = 6kHz	fs = 12kHz
Leistungsaufnahme im « Stand-By » Betrieb	14.6W	15.3W
Leistungsaufnahme bei aktiver Ausgangsstufe und stillstehender Maschine, $\Omega = 0 \text{ min}^{-1}$	107W	123W

Abb. 159: Verluste des Frequenzumrichter im Stand-By und Stillstand

#### 4.2.7 Zusammenfassung

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 Frequenzrichter-Speisung. Diese Werte wurden verglichen mit den Resultaten der gleichen Tests mit einer Permanentmagnet-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 PM-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) (*Kapitel Leerlaufmessungen*). Ebenfalls ergaben die Messungen der Maschinen im Leerlauf mit ungefiltertem Frequenzrichterbetrieb weniger Verluste bei der PM 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 PM Maschine nicht die spezifizierte induzierte Spannung erreichte. Im Netzbetrieb übersteigt der Wirkungsgrad der PM 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%.

Die beim Wechselrichterbetrieb durch die gepulste Spannung erzeugte Stromwelligkeit vermindert den Wirkungsgrad vor allem im Teillastbereich um ca 3%. Bei höherer Leistung steigt der Modulationsgrad, und die damit verbundene Abnahme der Stromwelligkeit lässt die Wirkungsgradverminderung auf <1% absinken. Beim verwendeten Frequenzrichter vom Typ Commander SE23400220 der Firma Control Techniques wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 96% gemessen. Allgemein kann bemerkt werden, dass durch die Einfügung eines Frequenzrichters der Wirkungsgrad des Antriebssystems im oberen Leistungsbereich um ca 5% abnimmt.

Bei der PM 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.

Das Verhalten einer Permanentmagnet Maschine bei Netzbetrieb ist von besonderem Interesse, da durch den hohen Wirkungsgrad viel Energie eingespart werden kann. Die für die beschriebenen Versuche verwendete brushless-DC-Maschine kann wegen ihrer trapezförmigen induzierten Spannung nicht am Netz betrieben werden. Mit einer an der Hochschule Wallis HEVs entwickelten 2kW PM-Synchronmaschine (Ferritmagnete, PMSM Lange) wurden Anfahr- und Lastversuche durchgeführt. Ohne Hilfsmittel ist ein Anfahren mit Netzsynchronisierung nicht möglich. Am Netz synchronisiert jedoch funktioniert die Maschine einwandfrei bei Nennspannung. Bei Abweichung von der Netzspannung entsteht ein Blindstrom, der den Wirkungsgrad verringert. Ein weiterer an der HEVs entwickelter langsam drehender Permanentmagnet Synchrongenerator (60U/min, PMSM HGA) wurde im f/U Betrieb auf die Netzbetrieb Tauglichkeit untersucht. Wegen dem hohen Reluktanzmoment ist ein Netzbetrieb mit dieser Maschine nicht möglich.



### 5.1.1 Wirkungsgradklassifizierung

Die Wirkungsgradklassifizierung EU/CEMEP – European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics- teilt 2- und 4 polige 50 Hz Käfigläufermotoren 1,1 bis 90 KW in drei Wirkungsgradklassen: EFF1 für hocheffiziente, EFF2 für Wirkungsgrad verbesserte und EFF3 für Standardmotoren, ein. Auf dem Typenschild des Motors ist die Angabe des Wirkungsgrads bei  $\frac{3}{4}$  und Nennlast erforderlich. Von der Klassifizierung ausgenommen sind Getriebemotoren. Die europaweite Klassifizierung basiert auf einer freiwilligen Verpflichtung.

Der nordamerikanische Markt schreibt effiziente Motoren per Gesetz vor. Erfasst sind 2, 4 und 6 polige Käfigläufermotoren für den Betrieb bei 60 Hz im Leistungsbereich 750W bis 150 kW. Getriebemotoren sind in den USA nicht betroffen. In Kanada sind Getriebemotoren in der Norm erfasst.

Ebenfalls in Brasilien, Australien, Neuseeland gibt es eine gesetzlich vorgeschriebene Grundlage für die Effizienz von Elektromotoren mit der Einbindung der Getriebemotoren.

Für Elektromotoren wird hauptsächlich von den europäischen Herstellern die Norm IEC 60034 angewandt. Die Bestimmung des Wirkungsgrads erfolgt hier nicht aus der direkten Messung von mech. Wellenleistung dividiert durch die el. Eingangsleistung. Die Norm IEC 60034 – 2 bestimmt den Wirkungsgrad mit einem indirekten Verfahren, abgeleitet aus der aufgenommenen el. Eingangsleistung und den messtechnisch erfassten Verlusten. Weitere Zusatzverluste werden pauschal mit 0.5% der Eingangsleistung einbezogen.

### 5.1.2 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.

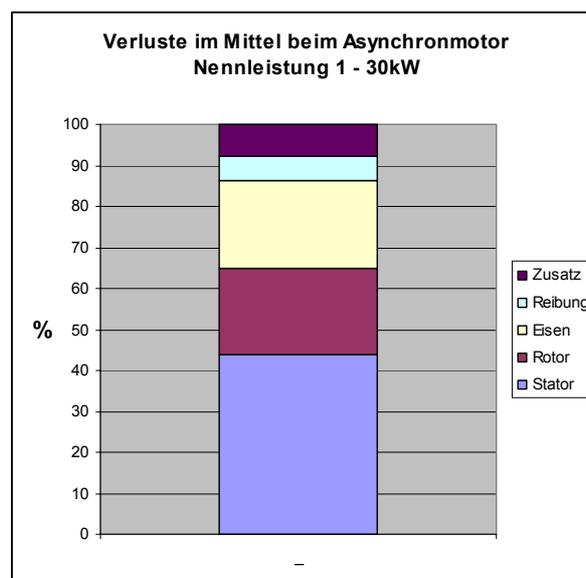


Abb. 162: zeigt die prozentualen Verluste von Asynchronmotoren, gemittelt im Bereich 1 – 30 KW.

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 EFF1 Normmotoren schwerer als EFF2 oder EFF3 Motoren. Abhängig von der Stufung der IEC Normreihe wird für einen EFF1 Normmotor sogar der Wechsel zur nächst höheren IEC Baugrösse nötig. Nachteilig ist auch, das damit verbundene höhere Massenträgheitsmoment des Rotors. Werden solche Wirkungsgrad – optimierten Asynchronmotoren häufig angefahren und abgebremst, steigt durch das grössere Massenträgheitsmoment, die Anlaufenergie. Bei Start - Stopp Anwendungen verbraucht ein EFF1 Normmotor mehr Energie als ein Standardmotor!



**Abb. 163: Mit dem Wechsel des Kurzschlussläufers zu einem Permanent – Magnet – Rotor lassen sich elegant Verluste umgehen !!!**

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 PM Maschine, bei vergleichbaren Leistungsdaten, kompakter gebaut ist als die Asynchronmaschine. Unter diesem Aspekt lassen sich zwei Aussagen ableiten:

- Einsparung von Rohstoffen und Gewicht.
- Kleinere Anlaufenergie durch reduziertes Massenträgheitsmoment des Rotors ( siehe 5.3 )

## 5. 2 Einsparung von Rohstoffen und Gewicht

Die steigenden Energiepreise wirken sich einerseits direkt auf die Kosten der verbrauchten Elektrizität für den Antrieb von el. Motoren aus, andererseits aber auch auf Rohstoffe mit hohem Energieeintrag bei der Herstellung. Kritisch sind Aluminium und Kupfer.

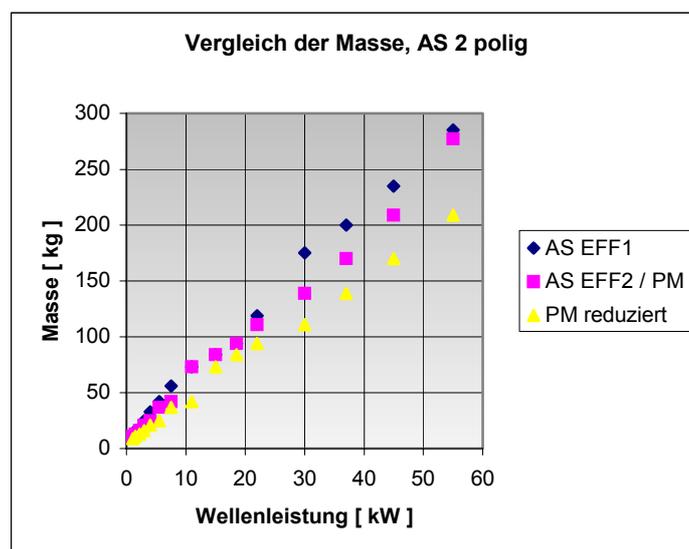
So hat ein bedeutender Hersteller von AS Motoren die Preise in der Schweiz im 2006 um ganze 8% angehoben. Hier ein Auszug aus der schriftlichen Mitteilung zum Teuerungszuschlag:

*Seit Monaten vernehmen wir in allen Medien die Nachricht von steigenden Rohstoffpreisen. Kupfer, Aluminium und Öl haben historische Werte erreicht. Wir haben durch geeignete Massnahmen versucht dieser Entwicklung entgegen zu wirken. Aber seit Anfang dieses Jahres dreht sich die Preisspirale deutlich schneller und ein Ende ist nicht abzusehen. Wir sind nicht mehr in der Lage, diese Teuerung abzufangen.*

**Diese Entwicklung fördert die preisliche Akzeptanz von effizienten PM Motoren am Markt.** Ungünstig verhält sich dieser Trend beim EFF1 Asynchronmotor, der seine höhere Effizienz durch Mehraufwand beim Gewicht, erkauft. Diese Aussage gilt in einem weiten Leistungsbereich.

- Der gemessene Permanent-Magnet-Motor BLDC-DM-SNP: 3kW Wellenleistung, 3000 U/min, Wirkungsgrad 90% wiegt 12.7kg ( ohne Lüfter ), die Baugrösse ist IEC 90.
- Der gemessene EFF1 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.

**Im Bereich von einigen 100 kW nähern sich die Wirkungsgrade der beiden Motorenarten einander an. Der Materialaufwand ist zu Gunsten der PM Maschine bedeutend geringer. Die Baugrösse differiert im angegebenen Beispiel sogar um zwei IEC Stufen.**



**Abb. 164:** zeigt die Zunahme der Masse im Vergleich zur Wellenleistung vom 2 poligen Normmotoren und Permanent-Magnet-Motoren.

Bei den 2 poligen EFF1 Normmotoren ist das grössere Gewicht deutlich erkennbar ( blaue Punkte in Abb. 164 ).

Die roten Punkte geben das Gewicht von EFF2 Normmotoren an. Die Berechnungen der PM-Motoren zeigten, dass diese einen signifikant grösserem Wirkungsgrad erhalten ( siehe Abb. 164 ), wenn der Materialaufwand bei den PM-Motoren und den EFF2 Asynchronmaschinen gleich gewählt ist. ( Gleich

sind, der Aussendurchmesser, Länge und Blechschnitt des Statorpakets und das IEC Aluminiumgehäuse).

Der gemessene 3kW PM Motor BLDC-DM-SNP ist in der Baugrösse IEC 90 ausgeführt. Die 2 poligen 3kW Normmotoren EFF1 und EFF2 benötigen bereits eine Baugrösse IEC 100. Trotz reduzierter IEC Baugrösse ergibt sich im Vergleich zum EFF1 Normmotor ein um 2%, beim EFF2 ein um 4% höherer Wirkungsgrad bei Nennlast zu Gunsten des PM Motors. Die gelben Punkte im Kennlinienfeld (Abb. 164 ) geben das Gewicht von PM Motoren, gebaut in der nächst kleineren IEC Baugrösse, an.

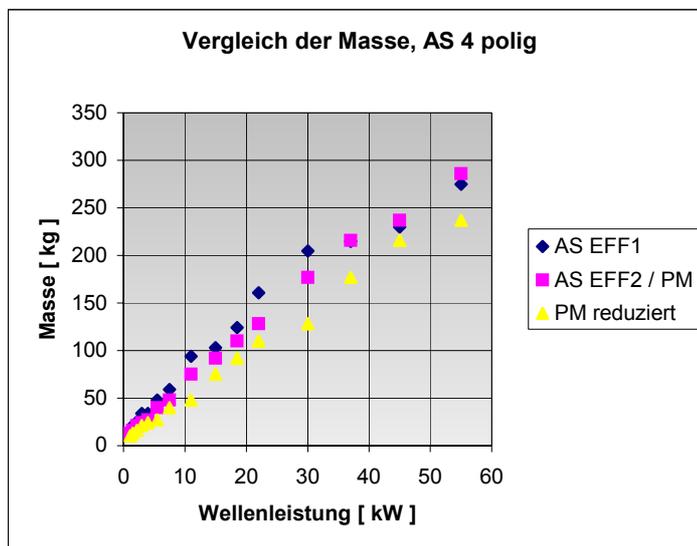


Abb. 165: zeigt die Zunahme der Masse im Vergleich zur Wellenleistung vom 4 poligen Normmotoren und Permanent-Magnet-Motoren.

2 polige Normmotoren im Alugehäuse, EFF2				Permanent Magnet Motor gebaut in der nächst kleineren IEC Baugrösse, Betrachtung zum Magnetmaterial		
Wellenleistung [ kW ]	IEC Baugrösse	Gewicht Normmotor [ kg ]	Gewichtsdifferenz zur nächst kleineren Stufe [ kg ]	Kosten des eingesparten Materials für Investition in Permanent Magnete [ CHF ]	kostenbezogen max. Menge [ kg ] Permanentmagnete für PM Motor ausgeführt in nächst kleinerer IEC Baugrösse	Benötigtes Magnetmaterial für die berechneten PM Motoren [ kg ]
0.09	56A	3.2		1	0.04	
0.12	56B	3.4	0.2	2.5	0.1	
0.18	63A	3.9	0.5	2.5	0.1	0.06
0.25	63B	4.4	0.5	5.5	0.22	
0.37	71A	5.5	1.1	5	0.2	
0.55	71B	6.5	1	12.5	0.5	
0.75	80A	9	2.5	10	0.4	
1.1	80B	11	2	10	0.4	
1.5	90S	13	2	15	0.6	
2.2	90L	16	3	25	1	0.3
3	100L	21	5	20	0.8	
4	112M	25	4	60	2.4	0.5
5.5	132SA	37	12	25	1	
7.5	132SB	42	5	155	6.2	
11	160MA	73	31	55	2.2	1.1
15	160M	84	11	50	2	
18.5	160L	94	10	85	3.4	
22	180M	111	17	140	5.6	
30	200LA	139	28	155	6.2	
37	200L	170	31	195	7.8	
45	225M	209	39	340	13.6	2.5
55	250M	277	68			

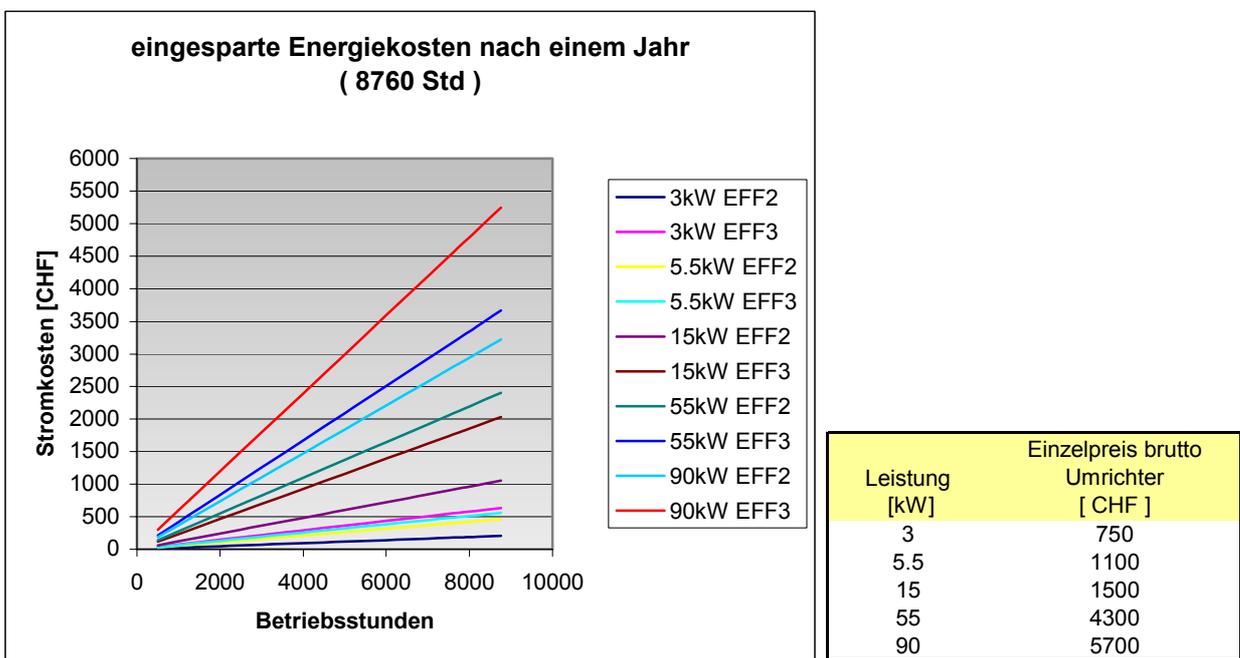
Abb. 166 zeigt die Investition, der eingesparten Materialkosten beim Normmotor, in das Magnetmaterial für einen PM Motor, gebaut in der nächst kleineren IEC Baugrösse.

Der Preis für das Magnetmaterial NdFeB blieb im vergangenen Zeitraum etwa konstant und beträgt aktuell, gemäss Anfrage bei einem Magnethersteller 20.- bis 30.- CHF pro kg. Die Tabelle *Abb.166* rechnet mit einem Magnetpreis von 25 CHF/kg und einem gemischten Preis von 5.- CHF/kg für das gesparte Kupfer, Aluminium und Eisen. Kosten pro Tonne am 15.6.06 gemäss Londoner Metall Börse LME Aluminium 2325\$ [7], Kupfer 6881\$ [8], 1\$ = 1.29 CHF.

**Die Kosten der eingesparten Rohstoffe beim schwereren EFF2 Normmotor bezahlen den Mehraufwand an Magnetmaterial beim leichteren Permanent – Magnet – Motor.**

Besonders materialsparend für den PM-Motor sind die Sprünge in der IEC Baureihe, bei denen der Normmotor ein grösseres Gehäuse benötigt und der PM Motor, bei gleicher Nennleistung und besserem Wirkungsgrad noch ins Gehäuse mit kleinerem Aussendurchmesser passt. IEC 63 ->IEC71 ->IEC80, IEC90 ->IEC100 IEC112 ->IEC132->IEC160.

**Bemerkenswert ist ein Resultat der Forschungsarbeit der *Fachhochschule Luzern*, die zu einer Magnetform führte, die den Wirkungsgrad bei der PM Maschine um ca. 2% erhöht und bezogen auf eine Rotor-Polteilung rund 1/3 weniger Magnetmaterial benötigt.** Der Bedarf des Magnetmaterials bei den berechneten PM Motoren liegt bei 1-3% im Bezug zur Masse des Rotors und Stators.



In Abb. 167 sind der Vergleich der Energiekosten in Funktion der Betriebszeit und die Preise von Umrichtern aufgeführt

Die Abbildung 167 zeigt die Differenz der Energiekosten von EFF2 und EFF3 Normmotoren minus den Energiekosten des gemessenen 3KW und der berechneten 5.5 / 15 / 55 / 90 kW PM-Motoren in Funktion der Betriebszeit. Die Daten zum Wirkungsgrad der Normmotoren sind Katalogen von namhaften Herstellern entnommen und entsprechen den gleichen Daten, wie in der Tabelle 174. In Abstimmung mit der Tabelle 166 wird rasch klar, dass das Potential für die Einsparung von Energiekosten sogar ein stärkeres Argument für den Wechsel von EFF2 und EFF3 Normmotoren hin zu effizienten PM-Motoren ist, als die materialbezogenen Untersuchungen.

Ebenfalls wird klar, dass die Differenz der Energiekosten EFF2 EFF3 – PM nach 1 bis 2 Jahren im Kostenbereich von Umformern liegen, wenn die Motoren mit fester Nenndrehzahl arbeiten. Der andauernde Betrieb bei Nenndrehzahl ist bei der bedeutendsten motorischen Verbrauchergruppe, den Strömungsmaschinen oft nicht nötig. Mit einer Antriebselektronik für Drehzahlregelung und einem Interface zur optimalen Auslegung der Betriebsprozesse können zusätzlich ca 20% an Energie eingespart werden [9]. Das ist genau der Grund, weshalb sich hoch effiziente Motoren mit elektronischer Drehzahlverstellung so schnell amortisieren. [10]

### 5.3 Kleinere Anlaufenergie durch reduziertes Massenträgheitsmoment des Rotors

Das Massenträgheitsmoment der PM-Motoren ist deutlich kleiner. Im Bezug zu einem EFF1 Normmotor spart der Permanent – Magnet – Motor deutlich an Anlaufenergie. Die Permanentmagnete sind oft aussen auf dem Rotor angebracht (Abb. 161) . Im Rotor findet sich noch genügend Platz für Aussparungen, welche das Massenträgheitsmoment des Rotors nochmals senken.

**Bei häufigem Start – Stopp Betrieb sind effiziente PM Motoren einzusetzen.**

Das Massenträgheitsmoment bei einem:

- berechneten Permanent - Magnet – Motor, 3kW Wellenleistung, 3000 U/min, Baugrösse IEC 90, liegt bei  $0.0019 \text{ kgm}^2$
- EFF1 Normmotor, gemäss Katalogangaben, 3kW Wellenleistung, 2910 U/min, Baugrösse IEC 100, liegt bei  $0.005 \text{ kgm}^2$ .
- Permanent Magnet Motor, gemäss Katalogangaben, 290kW Wellenleistung, 750 U/min, Baugrösse IEC 315, liegt bei  $9.8 \text{ kgm}^2$ .
- Normmotor, gemäss Katalogangaben, 315kW Wellenleistung, 743 U/min, Baugrösse IEC 400, liegt bei  $19 \text{ kgm}^2$ .

**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.

### 5.4 Höhere Differenz der Wirkungsgrade bei kleineren Leistungen

**Die Differenz der Wirkungsgrade zwischen PM-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 PM 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 dem Elektrizitätsverbrauch 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 ). [11]

### 5.5 Getriebemotoren

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 ihrer Getriebe 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.

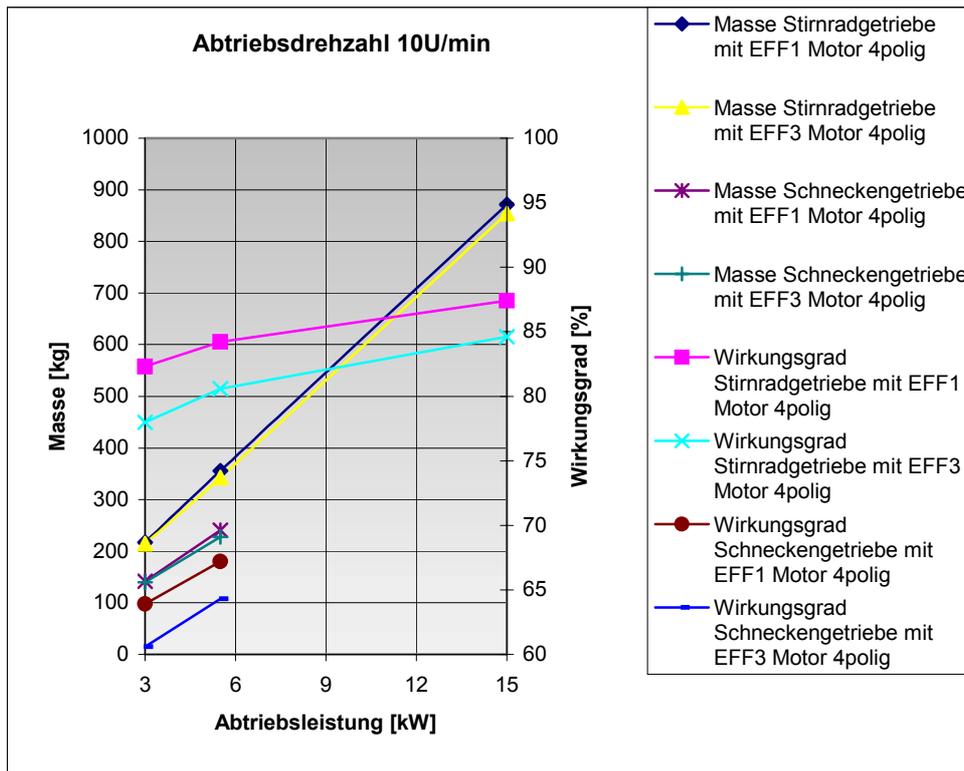


Abb.168: Wirkungsgrad und Masse der Getriebemotoren bei einer Abtriebsdrehzahl = 10U/min

Bei der relativ grossen Untersetzung auf 10U/min überwiegt das Gewicht der Getriebe im Vergleich zu den Antriebsmotoren. Die Schneckengetriebe sind leichter und werden vom betrachteten Hersteller nicht bis zu einer Leistung von 45kW angeboten. Die schwereren Stirnradgetriebe erreichen einen höheren Wirkungsgrad als die Schneckengetriebe. Es ist anzunehmen, dass in diesem Drehzahlbereich die Direktantriebe zu schwer würden und die, bei gutem Wirkungsgrad arbeitenden Stirnradgetrieben, kaum zu ersetzen wären. Bemerkenswert ist aber der sichtbare Unterschied der Effizienz, auch bei den weniger effizienten Schneckengetrieben, beim Wechseln der Antriebsmotoren von EFF3 auf EFF1.

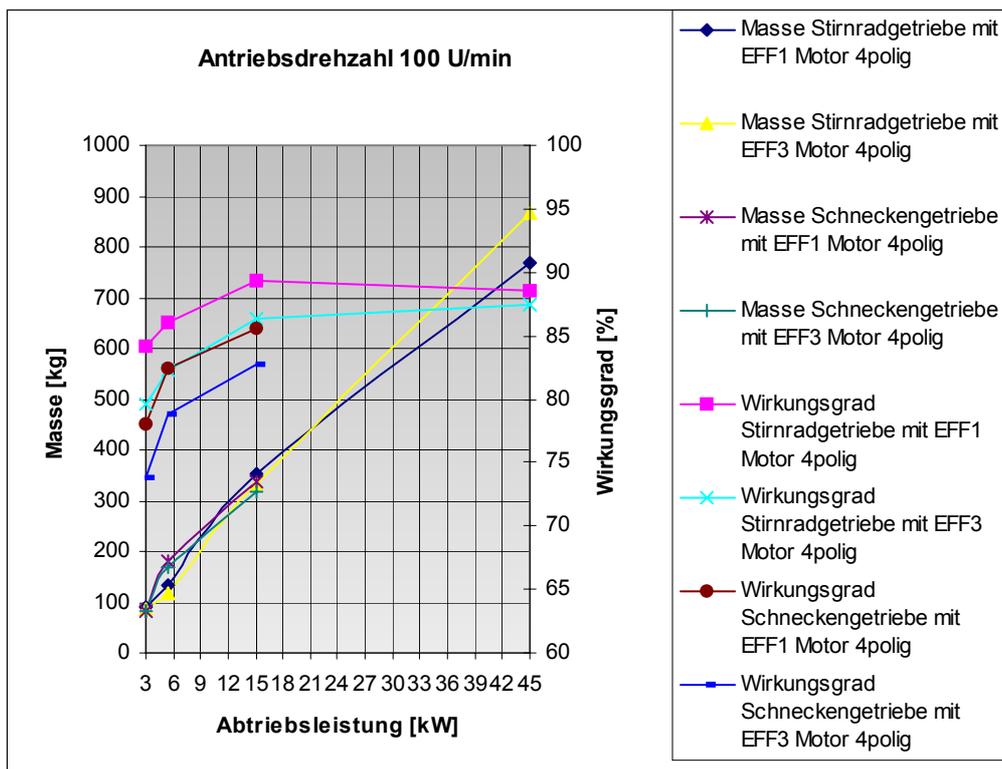


Abb.169: Wirkungsgrad und Masse der Getriebemotoren bei einer Abtriebsdrehzahl = 100U/min

Das Diagramm 169 zeigt den Vergleich der verschiedenen Motoren – Getriebe – Kombinationen bei 100 U/min Abtriebsdrehzahl. Überraschend ist das höhere Gewicht des EFF3 Motors beim Stirnradgetriebe im Vergleich zum EFF1 Motor bei 45kW. Der gewählte Hersteller der Getriebe Motoren bietet für diese Leistung keine EFF1 Motoren mehr an, sodass bei 45kW die Daten eines anderen Motorenherstellers aufgeführt sind. Die Gewichte der Motoren sind oft zwischen verschiedenen Herstellern und Baureihen unterschiedlich, auch bedingt durch den Wechsel vom leichteren Aluminium - Gehäuse, zu schweren Stahl- oder Gussgehäuse bei unterschiedlichen Leistungsgrössen.

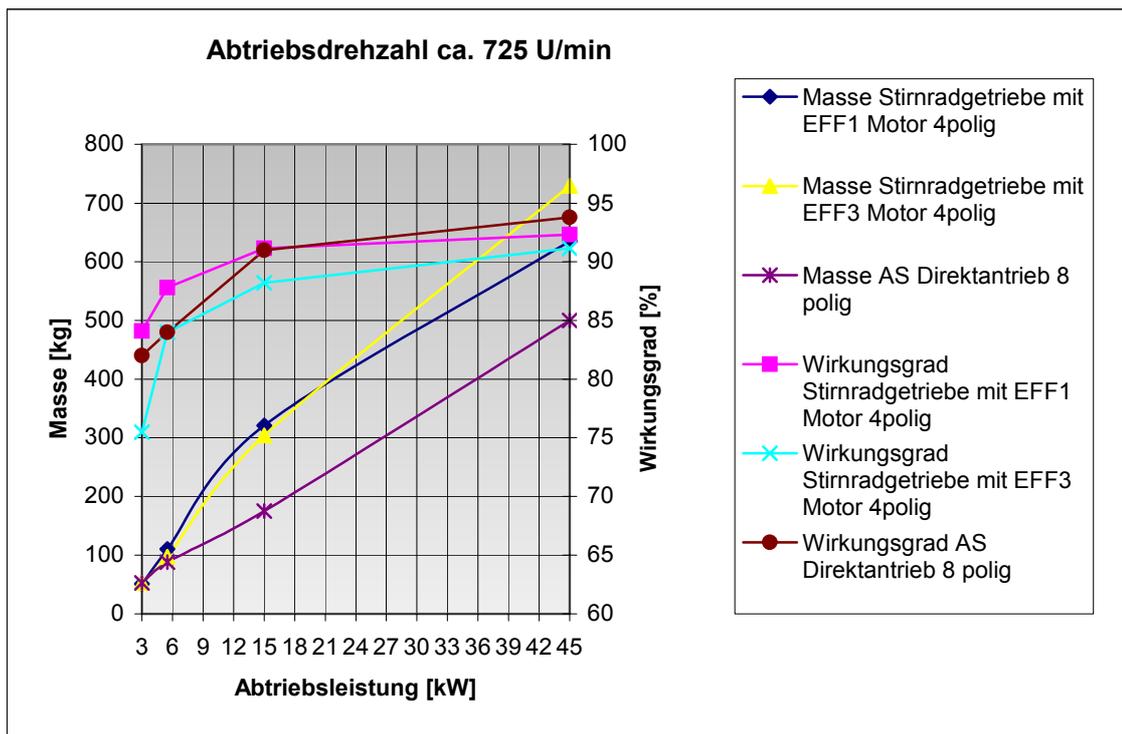


Abb.170: Wirkungsgrad und Masse der Getriebemotoren bei einer Abtriebsdrehzahl = 725U/min

Im Diagramm 170 sind zum Vergleich 8 polige Normmotoren stellvertretend für Direktantriebe, mit einer Wellendrehzahl von ca. 725 U/min, aufgenommen. Der Direktantrieb erreicht im oberen Leistungssegment einen höheren Wirkungsgrad bei geringerem Gewicht, als die Stirnradkombination.

**Diese Untersuchungen zeigen, dass sich mit dem Einsatz von effizienten Motoren bei hohen Getriebeuntersetzungen der Gesamtwirkungsgrad, sowohl bei Stirnrad-, wie auch bei den untersuchten Schneckengetrieben signifikant vergrössern lässt. Bei kleinen Getriebeuntersetzungen und Leistungen ab einigen kW kann die Frage „ Direktantriebe kontra Getriebemotoren „ gestellt werden.** Alle Aussagen zu den Getriebemotoren leiten sich aus Herstellerquellen ab. Eine weiterführende Untersuchung „ Permanent – Magnet – Motoren contra Getriebemotoren „ mit Kostenrechnungen würde den Rahmen der aktuellen Studie sprengen.

## 5.6 Betriebsverhalten

### 5.6.1. PM-Motor direkt am Drehstromnetz.

Der Asynchronmotor hat den Vorteil, dass er bei direktem Anschluss an das Netz automatisch anläuft und auf seine Nenndrehzahl hochfährt.

**Die Untersuchung der Fachhochschule Wallis hat ergeben, dass auch ein geeigneter PM-Motor nach dem Synchronisieren stabil am Netz läuft.**

Die Synchronisierung, also das Hochfahren aus dem Stillstand und das Zusammenschalten mit dem Netz bei Gleichlauf, erfolgt auf zwei Arten.

- Mit einer einfachen Elektronik, wie bereits beschrieben ( siehe Abb. 139 )
- Durch eine zusätzliche Kurzschlusswicklung auf dem PM-Rotor. Mit der Kurzschlusswicklung läuft der Motor asynchron an und beschleunigt auf die Nenndrehzahl. Bei Gleichlauf mit dem Netz synchronisieren die Permanentmagnete den Betriebszustand.

Mit diesen einfachen und preiswerten Möglichkeiten öffnen sich für die PM-Motoren neue Anwendungen, bei denen sich eine komplexe Elektronik für Drehzahlverstellung, aus Kostengründen, nicht eignet.

Eine sehr geeignete Anwendung aus dieser Sparte sind motorisch betriebene Kompressoren für Kältegeräte, wie Kühlschränke und Tiefkühler. Diese Geräte arbeiten im kleineren Leistungsbereich. Aus dem BFE Projekt *Energiesparmotor* [12] ist bekannt, dass für eine Wellenleistung von 250W zwischen einem effizienten PM-Motor und einem Normmotor ein Unterschied von 60W in der Aufnahmeleistung besteht. Nach den Berechnungen an der Fachhochschule Luzern, benötigt der effiziente PM Motor 60 Gramm Magnetmaterial mit einem Materialpreis von  $0.06\text{kg} \cdot 25 \text{ CHF/kg} = 1.5 \text{ CHF}$ . Der Aufwand des Magnetmaterials amortisiert sich bereits nach rund 200 Betriebsstunden, gerechnet mit einem mittleren Strompreis von 15 Rp [13] .

**Diese Effizienz und Kosten bezogene Untersuchung zu direkt am Netz betriebenen PM-Motoren macht die aufgezeigte Perspektive der Fachhochschule Wallis noch interessanter!**

### 5.6.2 Betrieb der Motoren mit Drehzahlverstellung

Untersuchungen [14] 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. [14] ( 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 Massestroms anpassen, bedeutend Energie. Die höheren Investitionskosten für die Elektronik zur Drehzahlregelung, können sich bereits nach wenigen Monaten amortisieren. Mit der Software SinaSave™ [10] lässt sich das Sparpotential und die Amortisationszeit einfach berechnen.

Das Potential der Energieeinsparung durch Drehzahlregelung und Änderung der Betriebsprozesse wurde schon früh erkannt und mehrfach publiziert. [9] [10] Verschiedene Studien zeigen auf, dass sich durch Drehzahlregelung ca. 10% der el. Energie einsparen lässt.

**Zum Energiesparen sind deshalb die PM-Motoren die bevorzugten Antriebe für Strömungsmaschinen, weil:**

- Ein echter Bedarf für Drehzahlverstellung vorliegt.
- Ein grosses Potential 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 el. Umformer mit Kostenfolge braucht.
- Der Wirkungsgrad beim PM-Motor höher liegt als beim ( EFF1 - 3 ) Normmotor. ( bei Leistungen unter 100kW )

Der Aufwand an Bauteilen eines Umformers für einen Normmotor ist vergleichbar mit dem Aufwand einer Antriebselektronik mit Drehzahlverstellung für einen PM-Motor.



Abb 171 zeigt die Elektronik eines 370W Umformers für Normmotoren.

Allgemein kann bemerkt werden, dass durch die Einfügung eines Umrichters der Wirkungsgrad des Antriebssystems im oberen Leistungsbereich um ca 5% abnimmt.

Bei der PM 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.

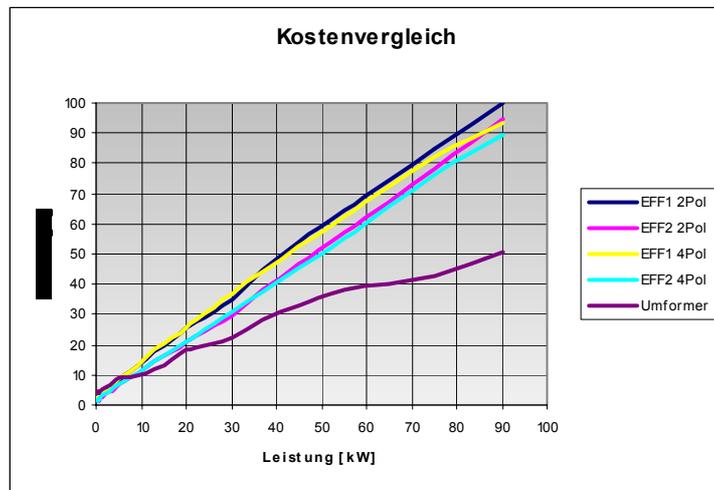


Abb.172 zeigt die Kosten von Normmotoren und Umformern mit zunehmender Leistung. Dabei nehmen die Kosten der Antriebselektronik in Relation zu den Motoren mit zunehmender Leistung ab.

## 5.7 Wo sind effiziente PM Motoren nicht einzusetzen.

- 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, EFF3 Normmotoren, kostenbezogen, besser geeignet. Typische Beispiele sind: Küchengeräte, Heimwerkergeräte, Staubsauger.etc.
- Bei direktem Netzanschluss und langen Betriebszeiten, vorzugsweise bei Nennlast, ist der EFF1 Asynchronmotor nach heutigem Stand der Technik besser geeignet.

Andere Anwendungen, die grundsätzlich gegen die PM 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.
- Fahrzeuge mit getriebelosen Radnaben-Motoren in Permanent-Magnet-Technik, können bei Wicklungsschluss oder kurzgeschlossenen defekten Halbleitern, durch die starke generatorische Bremswirkung, nicht mehr abgeschleppt werden. ( Bei Aufzugsmotoren in PM-Technik ist dies jedoch ein Vorteil )
- Asynchronmotoren für Anwendungen mit direkten Netzanschluss benötigen keine Elektronik und sind somit robuster.
- Im Gegensatz zur Asynchronmaschine kann der PM-Motor nicht polumschaltbar ausgeführt werden.

## 6. Potential zur Einsparung von el. Energie mit effizienten PM-Motoren in der Schweiz.

Die Grundlage für die Aussage zum Energiesparpotential in der Schweiz mit effizienten PM-Motoren basiert auf den gemessenen und berechneten PM-Maschinen. Es liegen in dieser Studie die Leistungsgrößen 3 / 5.5 / 15 / 55 und 90 kW vor. Diese PM-Motoren werden in den Bezug zu 2 poligen Normmotoren der Klassen EFF1 – 3 gesetzt. Die Daten zum Wirkungsgrad der Normmotoren sind Katalogen von namhaften Herstellern entnommen.

Leistung der Motoren [ kW ]	3	5.5	15	55	90
Wirkungsgrad PM [ % ]	90	91	94	96.5	97
Wirkungsgrad EFF1 [ % ]	87.5	88.6	91.3	94.2	95.4
Wirkungsgrad EFF2 [ % ]	86	86	89.5	93.5	94.5
Wirkungsgrad EFF3 [ % ]	78.6	85	85.7	92	93
Differenz der Aufnahmeleistung in % im Bezug zum PM Motor ( 100% entspricht der Aufnahmeleistung des Normmotors )					
EFF1	2.8	2.6	2.9	2.4	1.6
EFF2	4.4	5.5	4.8	3.1	2.6
EFF3	12.7	6.6	8.8	4.7	4.1
Durchschnittswert der Energieeinsparung in % bei folgender Verteilung der Normmotoren am Markt von 13% EFF1 43.5% EFF2 43.5% EFF3					
	7.8	5.6	6.3	3.7	3.1
<b>Ermittelter Durchschnittswert der Energieeinsparung über die 5 Leistungsgrößen</b>					<b>5.3%</b>

Abb 173 zeigt die Ermittlung der durchschnittlich möglichen Einsparung von el. Energie mit effizienten PM-Motoren in der Schweiz.

Der genormte Bereich der Wirkungsgradklassifizierung 1 – 90kW kann mit den 5 Leistungsgrössen dieser Studie recht gut abgeschätzt werden. Für den Bereich > 1kW und < 100kW wird die Annahme getroffen, dass die Einsparung ebenfalls rund 5% beträgt, wenn die beiden Bereiche gemittelt werden. Bei > 1kW Leistung ist die Anzahl Normmotoren am Markt sehr hoch, die Wirkungsgraddifferenz zum PM-Motor ist signifikant höher und die benötigte Leistung klein. Im Bereich < 100kW ist es genau umgekehrt. Zu bemerken ist, dass auch die eingesparte Energie im Teillastbereich etwa konstant bleibt. Die Begründung liegt in der höheren Differenz der Wirkungsgrade im tieferen Teillastbereich und der grösseren absoluten Leistung bei Nennlast, bei noch vorhandener Differenz der Wirkungsgrade. Gemäss der Vereinbarung mit der Industrie [9] sind heute 13% EFF1 Normmotoren in Betrieb. Es wird angenommen, dass sich die EFF2 und EFF3 in gleiche Teile zu 43.5% am Markt aufteilen.

Der Elektrizitätsverbrauch in der Schweiz [15] beträgt 57.3 Mrd.kWh. Strömungsmaschinen sind die bevorzugten Antriebe für PM-Motoren. Der Anteil der Strömungsmaschinen am Stromverbrauch in der Schweiz [14] liegt bei 30 %, also bei rund 17 Mrd.kWh.

#### **Das Potential der Einsparung mit effizienten PM Motoren in der Schweiz beträgt somit:**

17 Mrd.kWh x 5% = **850 Mio.kWh** oder einer Generatorleistung von rund **100 MW** im Dauerbetrieb.

**Gelingt den effizienten PM Motoren in Zukunft, durch den Kostenvorteil des geringeren Materialbedarfs, eine massgebende Marktdurchdringung, so können die effizienzbezogenen Vorteile der Drehzahlverstellung und verbesserter Betriebsprozesse voll genutzt werden.**

Drehzahlregelung mit optimierten Betriebsprozessen bringen zusätzlich 20% Energieeinsparung [9]

#### **Das zusätzliche Potential der Einsparung mit effizienten drehzahlgeregelten PM Motoren mit optimierten Betriebsprozessen in der Schweiz beträgt somit:**

( 17 Mrd.kWh - 850 Mio.kWh ) x 20% = **3.2 Mrd.kWh** oder einer Generatorleistung von rund **370 MW** im Dauerbetrieb.

Der **Stromtransport** vom Elektrizitätswerk bis zum Endverbraucher bringt Verluste bis zu 10% mit sich ( 2% bei der Übertragung, 8% bei der Verteilung ) [11]. Rechnet man mit durchschnittlich 5% so werden die el. Verteilanlagen mit rund 4 Mrd.kWh x 5% = **200 Mio.kWh** entlastet. Die Generatorleistung in den Elektrizitätswerken reduziert sich um **23 MW**.

Diese Berechnungen berücksichtigen, die bereits heute am Markt arbeitenden effizienten Antriebe in PM-Technologie, nicht. Lobenswert ist die Entwicklung der PM-Technologie bei den Umwälzpumpen. Effiziente drehzahlgeregelte PM-Umwälzpumpen mit optimierten Betriebsprozessen konnten den Wirkungsgrad um das drei- bis vierfache steigern. [16]

Diese Berechnungen des Energiesparpotentials berücksichtigen nur die Strömungsmaschinen mit einem Anteil von 30% am Stromverbrauch. Der Verbrauch aller el. motorischen Anwendungen in der Schweiz beträgt aber 45% [14].

## **7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen**

Der überwiegende Anteil der Asynchronmotoren, im Bereich 1-90kW sind als Normmotoren ausgeführt. Der grosse Anteil der im Markt betriebenen Motoren betreffen den Leistungsbereich 1kW bis 22kW [9]. Die Wirkungsgradklassifizierung teilt 2 und 4 polige Normmotoren in die drei Klassen EFF1 bis 3 ein. Diese Studie vergleicht deshalb Normmotoren mit PM-Motoren.

**Im Bereich von einigen 100 kW nähern sich die Wirkungsgrade der beiden Motorenarten einander an. Unterhalb von 100kW ist der PM-Motor effizienter.**

**Bis zu einigen 100KW sind herstellungsbezogen für effiziente PM-Motoren keine Grenzen ersichtlich.**

**Das Herstellungsverfahren der Seltenerdsmagneten NdFeB kommt ohne hochintensive Energieprozesse aus**, wie diese z.B. bei der Elektrolyse des Aluminiums oder beim Ziehen von Siliziumkristallen für monokristalline Solarzellen, bekannt sind. **Bemerkenswert ist ein Resultat der Forschungsarbeit der Fachhochschule Luzern, die zu einer Magnetform führte, die den Wirkungsgrad bei der PM Maschine um ca. 2% erhöht und bezogen auf eine Rotor-Polteilung rund 1/3 weniger Magnetmaterial benötigt.** Der Bedarf des Magnetmaterials bei den berechneten PM Motoren liegt bei 1-3% im Bezug zur Masse des Rotors und Stators.

Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme wäre ein **massgebender Austausch von EFF3 Normmotoren, über die genormte Wellen-Flanschverbindung, mit effizienten PM-Motoren**. Nun ist es aber so, dass die wenigen Hersteller von genormten PM-Motoren, sogar mit den modernen Informationsmitteln, schwer zu finden sind. Deshalb kann eine unmittelbare Empfehlung für eine Vereinbarung mit der Industrie, bezüglich effizienten PM-Motoren noch nicht empfohlen werden. So hat als Beispiel die Biral AG, anlässlich des Workshops „Effiziente Elektroantriebe 2005“ die Frage gestellt, „Warum keine Normmotoren in dieser Technologie ? [16] „.

Diese Studie zeigt auch, dass effiziente PM-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. Das Magnetmaterial NdFeB blieb preislich etwa konstant. Im interessanten Marktbereich bis zu einer Leistungsgrösse von 22kW, wo die hohen Stückzahlen am Markt vorkommen, ist die Effizienz der PM-Motoren sogar grösser als EFF1, wobei das Gewicht der PM-Motoren deutlich geringer ausfällt.

Gemäss der Vereinbarung [9] mit der schweizerischen Industrie beträgt der Anteil von EFF1 Normmotoren heute 13% und soll bis ins 2009 auf 19% gesteigert werden. Rund 80% der Normmotoren arbeiten dann aber immer noch in der Effizienzklasse EFF2 und EFF3. Zu beachten ist auch, dass sich die stark gestiegenen Rohstoffpreise für die Ausbreitung des EFF1 Asynchronmotors am Markt ungünstig auswirken werden, da der EFF1 Typ seine höhere Effizienz durch Mehraufwand beim Kupfer, Aluminium und höher legiertem Elektroblech, erkauft.

**Darin liegt nun aber die grosse Chance des PM-Motors den Anteil an hocheffizienten Elektromotoren, durch verdrängen der EFF2 und EFF3 Typen am Markt, markant zu steigern.**

### Industriennahe Empfehlung

*Als Sofortmassnahme wird deshalb vorgeschlagen einen 3 kW PM-Motor mit den Effizienzbezogenen Erkenntnissen, hervorgegangen aus den Untersuchungen der Fachhochschule Luzern zu realisieren. (Die Sonderanfertigung des gekauften 3kW PM-Motor wies leider einige Mängel auf). Der neue PM-Motor ist mechanisch für den Einbau in ein IEC Normgehäuse zu konstruieren, im Maxwell Programm auf möglichst hohe Effizienz zu optimieren, aufzubauen und auf dem Prüfstand der Fachhochschule Wallis auszumessen. Für den PM-Motor und die Steuerung zur Drehzahlverstellung ist eine möglichst seriennahe Kostenrechnung (Herstellungspreis und Kosten der eingesparten Energie, Amortisationszeit) zu erstellen. Ebenfalls soll die Möglichkeit eines Aufbaus als Integralmotor geprüft werden. Bestätigen sich die erwarteten Resultate, bezüglich Effizienz und Kosten, soll die vorgeschlagene PM-Technik unter Einbezug der Industrie, in weiterführenden Schritten bis zu einer Leistungsgrösse von 22 kW ausgeweitet werden.*

**Zu beachten ist, dass PM-Motoren die bevorzugten Antriebe für Strömungsmaschinen sind, weil:**

- Ein grosses Potential zum Sparen von el. Energie durch lange Laufzeiten der Motoren gegeben ist. **Der Antrieb von Strömungsmaschinen benötigt rund 30% des schweizerischen Stromverbrauchs.** [14] ( Pumpen, Lüftern, Kompressoren ).
- Ein echter Bedarf für Drehzahlverstellung vorliegt. Drehzahlverstellung spart rund 10% Energie [9].
- Die eingesparte Energie die Investitionen für die Drehzahlregelung schnell amortisiert.[10]
- **Bei Drehzahlverstellung auch der Normmotor einen el. Umformer mit Kostenfolge braucht.**
- Der Wirkungsgrad beim PM-Motor höher liegt als beim ( EFF1 - 3 ) Normmotor. ( bei Leistungen unter 100kW )

**Wichtig:** Bei Strömungsmaschinen mit Drehzahlverstellung **spart** die PM-Lösung bereits **ab Inbetriebnahme Energie und Kosten**. Der Wirkungsgrad ist höher als EFF1. Auch der Normmotor benötigt hier einen el. Umformer mit Kostenfolge .

**Hinweis:** Ab 2007 können aus den BFE Projekten *Integral Sparmotor < 1kW* und *Druckluftspeichersystem*, Generatoren und Motoren in PM Technik bis 1kW Leistung angeboten werden. [17] [18]

## Angewandte Forschung

Die Untersuchung der Fachhochschule Wallis zeigte, dass ein geeigneter PM-Motor nach dem synchronisieren stabil am Netz läuft. Mit den vorgeschlagenen einfachen und preiswerten Möglichkeiten öffnen sich für die PM-Motoren **neue Anwendungen im Bereich der serienmässig hergestellten Elektrogeräte**, bei denen sich eine komplexe Elektronik für Drehzahlverstellung, aus Kostengründen, nicht eignet. **Eine sehr geeignete Anwendung aus dieser Sparte sind motorisch betriebene Kompressoren für Kältegeräte**. Der durchschnittliche Jahresverbrauch pro Haushalt für einen Kühlschrank oder eines Tiefkühlers beträgt 450 kWh und ist gleich viel wie bei einem Elektroherd mit Backofen. [15]. Deshalb wird folgende weiterführende Forschungsarbeit vorgeschlagen:

*Als erster Schritt soll eine Übersicht über die verschiedenen technischen Prinzipien zur Kälteerzeugung und deren Häufigkeit am Markt, erstellt werden. An Hand dieser Übersicht soll die Motorenleistung bestimmt werden, welche die grösste Energieeinsparung in der Kältetechnik verspricht. In dieser Leistungsgrösse sollen nun zwei PM Motoren im Maxwell-Programm berechnet, konstruiert und gebaut werden. Die Auslegung des ersten PM-Motors erfolgt mit einer optimierten Statorinduktivität und einer einfachen bereits vorgeschlagenen Elektronik. Der zweite Motor wird mit einer Anlaufwicklung in Kombination mit Permanentmagneten realisiert. Vorteilhaft bei dieser Lösung ist das Fehlen von elektronischen Komponenten. Für beide Möglichkeiten ist die Funktionsweise zu testen und zu dokumentieren. Im Bezug zu den Messresultaten soll eine erste Schätzung zum Sparpotential von el. Energie und den zu erwarteten Kosten für die Herstellung angegeben werden.*

Die Untersuchung zu den Getriebemotoren zeigen, dass sich mit dem Einsatz von effizienten Motoren bei hohen Getriebeübersetzungen der Gesamtwirkungsgrad, sowohl bei Stirnrad-, wie auch bei den untersuchten Schneckengetrieben signifikant vergrössern lässt. Bei kleinen Getriebeübersetzungen und Leistungen **ab einigen kW ist davon auszugehen, dass PM-Direktantriebe effizienzbezogen den Getriebemotoren überlegen sind**. In einer weiterführenden Arbeit, zusammen mit einem Industriepartner, sollen für PM-Direktantriebe die geeigneten effizienten Betriebsbedingungen ( Leistungs- und Drehzahlbereiche ) in Relation zu den Getriebemotoren ermittelt werden. Im Interesse des Industriepartners ist auf weitere Vorteile der PM-Direktantriebe einzugehen. Der Wunsch Industriepartner wäre ein Hersteller von Aufzügen und/oder automatischen Türen.

*Das Maxwell-Programm ist sehr geeignet um zeitsparend eine Berechnungsreihe von verschiedenen PM-Direktantrieben zu erhalten. Die Berechnungsreihe soll die Ausführung als Aussen- und Innenläufer beinhalten, wobei jeweils der Wirkungsgrad, das Drehmoment und die Drehzahl in Abhängigkeit mit der Baugrösse ( Durchmesser und Länge ) zu verfolgen ist. An Hand der Resultate sind die Kriterien Effizienz, Energieeinsparung, Herstellungskosten, Amortisation, Gewicht und geeigneter Leistungs- und Drehzahlbereich, für PM-Direktantriebe abzuleiten. Diese Kriterien sollen in Relation zu Getriebemotoren gebracht werden. Das Massenträgheitsmoment von PM Motoren ist bedeutend geringer als bei vergleichbaren Asynchronmotoren ( siehe Abb 161 ). Bei den Untersuchungen bezüglich Effizienz ist deshalb auch auf den Start-Stopp Betrieb einzugehen. Die Berechnungsreihe gibt auch Aufschluss, ob ein getriebeloser Türmotor als PM-Direktantrieb, evtl mit integrierter Antriebselektronik kostenbezogen möglich ist. In einem weiterführenden Schritt kann eine ausgesuchte Baugrösse eines geeigneten PM-Direktantriebs im Maxwell-Programm optimiert, konstruiert und aufgebaut werden. Eine zugehörige Antriebssteuerung soll auf möglichst geringe Standby Leistung ausgelegt werden. Bei einem realisierten PM-Direktantrieb kann geprüft werden, ob die generatorische Bremsleistung, durch kurzschliessen der Wicklungen, als zusätzliche Massnahme in einem Bremskreis, sicherheitstechnische Vorteile zeigt. Im Gegensatz zum unbestromten Asynchronmotor wird sich der PM-Direktantrieb sehr gedämpft aus der Ruhelage bewegen.*

## Energieeinsparung in der Schweiz

**Das Potential der Einsparung mit effizienten drehzahlgeregelten PM Motoren mit optimierten Betriebsprozessen in der Schweiz beträgt rund 4 Mrd.kWh oder einer Generatorleistung von rund 500 MW im Dauerbetrieb.**

Das ist mehr als die Leistung des kleineren AKW's in der Schweiz [15] . 4 Mrd.kWh jährlich eingesparte Energie lässt sich in ein Äquivalent von 2.4 Mio.Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr umrechnen [19] .**Mit der aufflammenden Diskussion um Gaskraftwerke in der Schweiz bekommt die CO<sub>2</sub>Thematik nun einen realen Bezug zu effizienten Motoren. Es ist leicht einzusehen, dass zuerst alle Massnahmen getroffen werden sollten, um einer Belastung der Atmosphäre in dieser Grössenordnung mit effizienten Motoren entgegen zu treten.**

Mit dieser Studie „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten PM–Motoren“ erarbeiteten sich die *Fachhochschulen Luzern und Wallis*, sowie *Circle Motor AG* ein vertieftes Wissen in dieser Materie. Die *Fachhochschule Wallis* erweiterte zudem den Prüfstand für PM-Motoren. **Die Projektpartner dieser Studie würde es sehr freuen, wenn sie die erworbene Kompetenz in weiteren Aufgaben anwenden dürften!**

## Symbolverzeichnis, Definitionen

Die Bezeichnung Asynchron-, Norm-, Käfigläufermotor, ASM ist in dieser Studie gleich bedeutend.

Die Schreibweise Permanent-Magnet-Motor wird mit PM-Motor, PMM abgekürzt.

Die im Bericht aufgeführten Synchronmaschinen sind Permanent- Magnet erregt.

Neodym-Eisen-Bor ist mit NdFeB abgekürzt.

Kostenbezogene Aussagen beim PM-Motor beziehen sich auf Fertigungsseries mit hohen Stückzahlen.

Die Berechnungen und Messungen in dieser Studie basiert beim Vergleich der Normmotoren mit den PM-Motoren auf folgenden, durch die Projektmitglieder bestimmten Definitionen:

- Die gewählten IEC Leistungsstufen für die Berechnungen der PM Maschinen sind / 5.5 / 15 / 55 / 90kW. Pro Leistungsstufe ist, der Aussendurchmesser, die Länge und der Blechschnitt des Stators etwa gleich, wie für einen Normmotor mit Effizienzklasse EFF2. Die Datenquelle dafür ist der Kienle + Spiess Katalog „ Spitzentechnologie und Know-how für den Bau elektrischer Maschinen“. [1]
- Da umfangreiches Datenmaterial von namhaften Firmen zu den Normmotoren vorliegt, wird dieses Datenmaterial verwendet und auf Berechnungen zur Asynchronmaschine verzichtet.
- Bei den gemessenen Maschinen liegt die Nennleistung bei 3 kW und die synchrone Nenn-drehzahl bei 3000 U/min. Die Maschinen werden wie folgt abgekürzt.

BLDC DM-SNP	PM-Motor
PMSM HGA	PM-Motor hochpolig
PMSM Lange	PM-Motor für Messungen direkt am Netz
ASM ABB M2AA	Asynchronmotor EFF1
ASM HB 100 L	Asynchronmotor EFF2
ASM ETR DN100	Asynchronmotor EFF3

- Die berechneten PM-Motoren erhalten folgende Bezeichnung:  
**Allgemein:** genormte IEC Baugrösse - Anzahl Pole - Anzahl Nuten  
**Beispiel:** Permanentmagnet-Motor mit 4 Polen, 36 Nuten  
Die Bezeichnung lautet: **PMM132-4-36**  
Permanentmagnet-Motor mit 6 Polen, 72 Nuten  
Die Bezeichnung lautet: **PMM300-6-72**

## Referenzen

- [1] Kienle + Spiess Katalog : Spitzentechnologie und Know-how für den Bau elektrischer Maschinen
- [2] Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer
- [3] Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen / Nguyen Phung Quang, Jörg-Andreas Dittrich. - 2., neubearb. Aufl. - Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1999
- [4] Elektrische Maschinen / Rolf Fischer. - 7. überarb. Aufl. – München; Wien : Hanser, 1989
- [5] Hocheffizienter, getriebeloser Antrieb, BFE Projekt N° 45815 / Vivatec GmbH, Gebrüder Meier AG, Hochschule Wallis, 2004
- [6] Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal / Juan W. Dixon – Iván A. Leal - IEEE transactions on power electronics, vol. 17, No 2, march 2002
- [7] [www.igora.ch](http://www.igora.ch) für aktuellen Aluminiumpreis LME
- [8] [www.thecopperlink.com](http://www.thecopperlink.com) für aktuellen Kupferpreis LME
- [9] Workshop „Effiziente Elektroantriebe“ bei Swissmem 20.1.05 – Projekte und Aktivitäten des BFE im Bereich el. Antriebe R. Brüniger AG, Seite 5 / 6 / 11
- [10] [www.siemens.de/energiesparprogramm](http://www.siemens.de/energiesparprogramm) für das Programm SinaSave™
- [11] Grünbuch über Energieeffizienz, Kommission der europäischen Gemeinschaft KOM(2005) DE 265 Seite 28
- [12] BFE Projekt Nr 45 397 „Energiesparmotor“ Circle Motor AG, Markus Lindegger 10.2002 Seite 3 [www.circlemotor.com](http://www.circlemotor.com)
- [13] **Mittlerer Strompreis** Für die Amortisationsrechnung muss der Strompreis bekannt sein. Auf der Internetseite [www.strompreise.preisueberwacher.ch](http://www.strompreise.preisueberwacher.ch) finden sich die durchschnittlichen Strompreise für die Schweiz. Der Preis versteht sich per kWh, ohne Mwst aber inkl. den fixen Gebühren, Zählermiete und den konsumabhängigen Energiegebühren. Je nach Art des Verbrauchers, Privat, KMU, Grossbetrieb und dem Energieverbrauch pro Jahr sind unterschiedliche Berechnungsrubriken vorhanden. Über 10 Rubriken, vom Einfamilienhaus bis zum Grossbetrieb beträgt der mittlere Preis pro kWh rund 15 Rappen. Als kleinste Rubrik ist das Einfamilienhaus gewählt, da hier mindestens ein signifikanter Antriebsmotor, z.B. für eine Umwälzpumpe, angenommen werden kann. Die Preise auf der Internetseite beziehen sich auf Ende 2004.
- [14] Workshop „Effiziente Elektroantriebe“ bei Swissmem 20.1.05/ Das Motor Challenge Programm Jürg Nipkow, ARENA S.1
- [15] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2005 des BFE [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)
- [16] Workshop „Effiziente Elektroantriebe“ bei Swissmem 20.1.05/ Spezialantriebe mit komplexen Rahmenbedingungen BIRAL AG, Wolfram Mayer Seite 2 und 5
- [17] Energie-Forschung 2005 / BFE / Überblicksbericht der Programmleiter / Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1kW Seite 38 [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)
- [18] Forschung 2005 / BFE / Überblicksbericht der Programmleiter / Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP- B Seite 38 Seite 35 und 36 [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)
- [19] Energiesparen mit elektrischen Antrieben, ZVEI 8.1999 Seite 5, Energiemix 0.59 kg CO<sub>2</sub> -> 1kWh
- [20] <http://de.wikipedia.org/wiki/Neodym> im Anhang Information zum Magnetgrundstoff

## Quellen der Abbildungen

Hochschule Luzern: Konstruktion elektrischer Maschinen, II. Synchronmaschine, R. Oberholzer	Abb. 2-5,7,14,18,20-23,33,34,36,38, 40-129
Aus Software Maxwell 3D, RMxprt	Abb. 1,6,8-13,15,19
Hochschule Wallis	Abb. 130 - 159
Circle Motor AG	Abb. 160 - 173