



# EFFIZIENZSTEIGERUNG EINES HOCHEFFIZIENTEN IEC 3kW PERMANENT-MAGNET-MOTORS INKLUSIV ENERGETISCHE MESSUNG ALS PUMPENANWENDUNG.

## Jahresbericht 2008

Autor und Koautoren	Markus Lindegger, Hans-Peter Biner, Dominique Salathé
beauftragte Institutionen	Circle Motor AG, Biral AG, Hochschulen Wallis & Luzern
Adresse	Tannackerstrasse 25, 3073 Gümligen BE
Telefon, E-mail, Internetadresse	031 952 52 52, <a href="mailto:info@circlemotor.ch">info@circlemotor.ch</a> , <a href="http://www.circlemotor.ch">www.circlemotor.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100915 / 153338
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	1.Juni 2008 bis 30.November 2009
Datum	30.November 2008

### ZUSAMMENFASSUNG

Mit den realisierten Arbeiten im 2008 liegt der berechnete Wirkungsgrad des hocheffizienten IEC 3kW Permanent-Magnet-Motors zusammen mit der Antriebssteuerung im Bereich von 90 - 92%. Das angestrebte Ziel, den Durchbruch über die 90% Wirkungsgrad Marke sollte somit im 2009 auch mit Messungen bestätigt werden.

Der höchste Wirkungsgrad zeigte sich bei der Auslegung nicht, wie erwartet beim brushless DC Motor, sondern beim Synchronmotor. Aus dieser Erkenntnis konzipierte die Hochschule Wallis eine Antriebssteuerung, die es ermöglicht beide Steuerungsverfahren, brushless DC und Synchron, umzusetzen. Die Auslegung des Motors durch die Hochschule Luzern führte zur Erkenntnis, das nicht der Einsatz des besten Magnetmaterials zur höchsten Effizienz führt, sondern das optimierte Zusammenspiel der erzeugten Kupferverluste der Wicklung mit den Verlusten des verwendeten Eisenblechs des Stators. Die Hochschule Wallis entwickelte den hocheffizienten Schaltregler nach der Green Mode Switch Technologie für die Spannungsversorgung der Leistungselektronik. Circle Motor konzipierte den Aufbau des Motors gemäss der IEC Norm, zeichnete den Steuerschrank und erarbeitete Ideen zur weiteren Effizienzsteigerung mittels geeigneter Wuchtmethode des Rotors, sowie zur Reduktion der Kupferverluste der Wicklung.

Im 2009 werden der hocheffiziente Permanent-Magnet-Motor und die Antriebselektronik mit dem zugehörigen Steuerschrank hergestellt, alle Komponenten in Betrieb genommen und ausgemessen, sowie energetische Messungen als Pumpenanwendung bei der Biral AG durchgeführt.

## Einleitung

Die BFE Studie „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“, [1] zeigte auf, dass der Wirkungsgrad bei den Permanent-Magnet-Motoren bis in den Leistungsbereich von 100kW, höher liegt, als bei vergleichbaren Asynchronmotoren (Normmotoren). In absehbarer Zeit werden Mindestwirkungsgrade bei Elektromotoren vorgeschrieben, die bis zur heutigen Premiumklasse reichen [2]. Circle Motor AG geht davon aus, dass Wirkungsgrade, entsprechend der Premiumklasse, technisch und wirtschaftlich gesehen, besser mit Permanent-Magnet-Motoren zu erreichen sind (im Leistungsbereich <22kW), als mit Asynchronmotoren. Dies begründet sich einerseits in den vermiedenen Stromwärme- und Ummagnetisierungsverlusten im Permanent-Magnet-Rotor und andererseits im signifikanten kleineren Bedarf an Rohstoffen (Kupfer, Elektroblech, Aluminium) für die Herstellung eines Permanent-Magnet-Motors. Eine Kostenrechnung [3] zeigt auf, dass der Permanent-Magnet-Motor mit dem Asynchronmotor in Konkurrenz treten kann, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. Hier liegt auch das grösste Energiesparpotenzial bei drehzahlverstellbaren Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren.

## Ausgangslage

Ein gebauter IEC 3kW Permanent-Magnet-Motor mit zugehöriger Steuerung [3] zur Drehzahlverstellung erreichte bei den Nenndaten einen Gesamtwirkungsgrad von 88%. Mit dem Vorteil des drehzahlvariablen Betriebs ist dieser Gesamtwirkungsgrad immer höher, als der eines gemessenen, direkt mit dem Netz verbundenen Asynchronmotors der Klasse EFF1. Der hergestellte Permanent-Magnet-Motor wiegt rund 10kg weniger als der gekaufte Asynchronmotor. Die Unterteilung des Wirkungsgrads zeigt 92% für den 3kW Permanent-Magnet-Motor und 96.5% für die zugehörige Steuerung.

Wirkungsgrad [%]

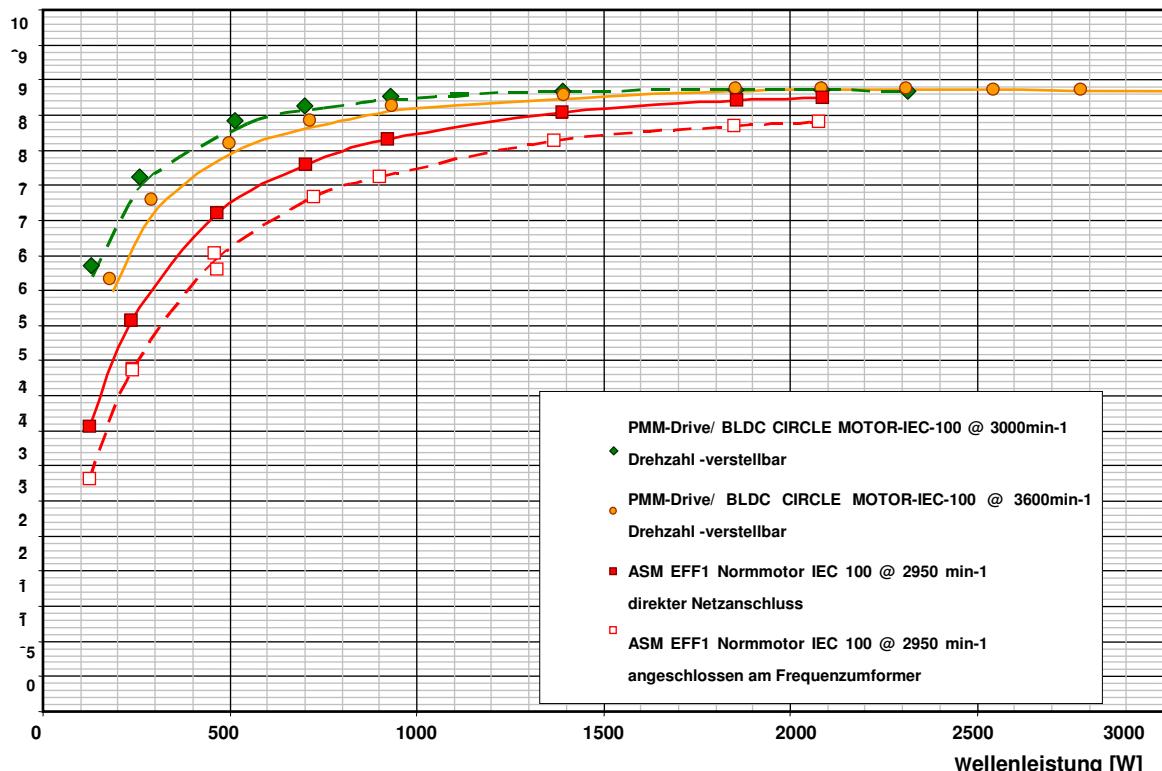


Abb 1: Wirkungsgradkennlinie des gemessenen IEC 3kW Permanent-Magnet-Motors (BLDC ) inkl. Steuerung ( PMM-Drive) im Vergleich mit einem EFF1 IEC 3kW Asynchronmotor mit und ohne Frequenzumformer. [3]

## Bedeutung des Projekts

Mit dem aktuellen Forschungsauftrag, soll ein Beitrag zur Steigerung von hocheffizienten Elektromotoren am Markt geleistet werden, mit dem Ziel, das bekannte Sparpotenzial an el. Energie weiter auszuschöpfen, welches im Bereich der IEC Normmotoren vorhanden ist. Als Sofortmassnahme könnten defekte EFF2 Asynchronmotoren schnell und einfach über die genormte Wellen-Flansch Verbindung mit hocheffizienten IEC Permanent-Magnet Motoren ersetzt werden. Bei einer zukünftigen gesetzlichen Festlegung von Mindestwirkungsgraden, entsprechend der heutigen Premiumklasse oder höher, sind die Forschungsgrundlagen bereits erstellt, falls sich die Permanent-Magnet-Technik als überlegen zeigen sollte, was technisch und wirtschaftlich anzunehmen ist.

Im abgeschlossenen BFE Auftrag Druckluftspeicher [4] sollte ein Gesamtwirkungsgrad von 90% eines Elektromotors mit Steuerung bei 1.5kW erreicht werden, was nicht gelang. Wird dies im aktuellen Auftrag erfüllt, so liegt die untere Leistungsgrenze eines effizienten Druckluftspeichers, bezogen auf die el. Energieumsetzung bei 3kW.

Das Einsparpotential wurde mit **60 Mio kWh<sub>el</sub> pro Jahr ermittelt**, wenn **in der Schweiz alle 3kW IEC Normmotoren** der Klasse EFF2 mit der Variante 3kW Permanent-Magnet-Motor inkl. Steuerung ersetzt würden [3].

## Projektziele

In dieser weiterführenden Arbeit sind, bei Projektabschluss folgende Ziele formuliert:

- **Einen Gesamtwirkungsgrad von 90% des IEC 3kW Permanent-Magnet-Motors mit der zugehörigen Steuerung** bei Nennlast von 3kW.
- **Durchführung eines Pilotprojekts bei der Biral AG.** Damit wird erstmals der 3kW Permanent-Magnet-Motor mit der Steuerung einem Last- und Drehzahlspiel in einer realen Anlage betrieben und die beim **Prozess verbrauchte Energie** bestimmt und verglichen.

## Die Arbeiten im 2008 sind:

Die Berechnung des hocheffizienten Permanent-Magnet-Motors mit FEMAG, durchzuführen an der Hochschule Luzern.

Die Entwicklung und den Bau eines hocheffizienten Schaltreglers für die Spannungsversorgung der el. Komponenten der Antriebssteuerung. Diese Arbeit führt die Hochschule Wallis aus.

Circle Motor AG leitet das Projekt, konstruiert und zeichnet die mechanischen Teile für den Motor und den Steuerschrank.

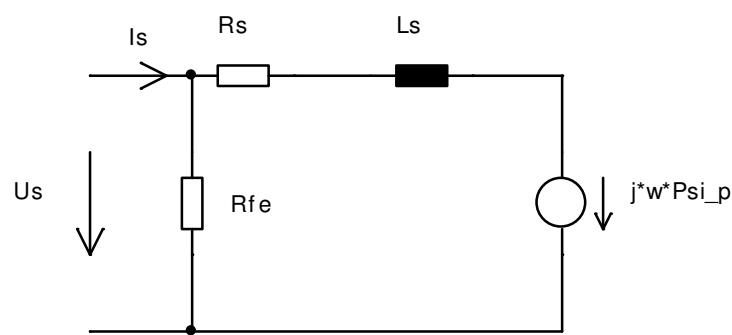
# Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

## Hochschule Luzern

### Ausgangslage

Die Ausgangslage für die Auslegung des hocheffizienten Permanent-Magnet-Motors bilden die Daten der zuvor gebauten Maschine BLDC CM-IEC 3kW. Der Vorteil dabei liegt in der genauen Kenntnis von Daten, die durch Messung genauer bestimmt werden konnten als durch Berechnung. Diese Daten sind die Zusatzverluste durch mech. Reibung, die Vergrösserung des ohmschen und induktiven Widerstands der beiden Wickelköpfe des Stators. Die Vorgehensweise bei der Berechnung besteht deshalb darin, das bestehende *FEMAG* Maschinenmodell, welches mit dem BLDC CM-IEC 3kW Motor gut übereinstimmt, weiter zu verwenden und mit den später gezeigten Massnahmen nach dem höchsten Wirkungsgrad zu suchen.

Unten folgend sind alle Daten des Vorgängers BLDC CM-IEC 3kW aufgeführt, der mit dem brushless DC Verfahren bei Nennlast einen Wirkungsgrad von 92% erreichte.



Schema 2:Ersatzschaltbild des Permanent-Magnet-Motors

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC CM-IEC-3kW
<b>R<sub>s</sub></b>	Ω	I = I <sub>n</sub>	Statorwiderstand	0.846
<b>L<sub>s</sub></b>	H	I = I <sub>n</sub> /5 / f <sub>e</sub> = 200Hz	Ständerinduktivität	7.86E-3

Tabelle 3 beinhaltet die verketteten elektrischen Kennwerte, die mit Hilfe verschiedener Methoden gemessen wurden (DC, Leerlauf, blockierter Rotor).

Symbol	Einheit	Messbedingungen	Beschreibung	BLDC CM-IEC-3kW (3000 / 3600 min <sup>-1</sup> )
<b>P<sub>cu</sub></b>	W	$n = n_n / U = U_n$	Kupferverluste Im Leerlauf	<0.1 / 0.1
<b>P<sub>mec</sub></b>	W	$n = n_n$	Mechanische Verluste Im Leerlauf	29 / 35
<b>P<sub>fe</sub></b>	W	$n = n_n / U = U_n$	Eisenverluste Im Leerlauf	50 / 72
<b>P<sub>tot</sub></b>	W	$n = n_n / U = U_n$	Gesamte Leerlaufverluste	79 / 107

Die Tabelle 4 zeigt die Leerlaufverluste und deren Zusammensetzung

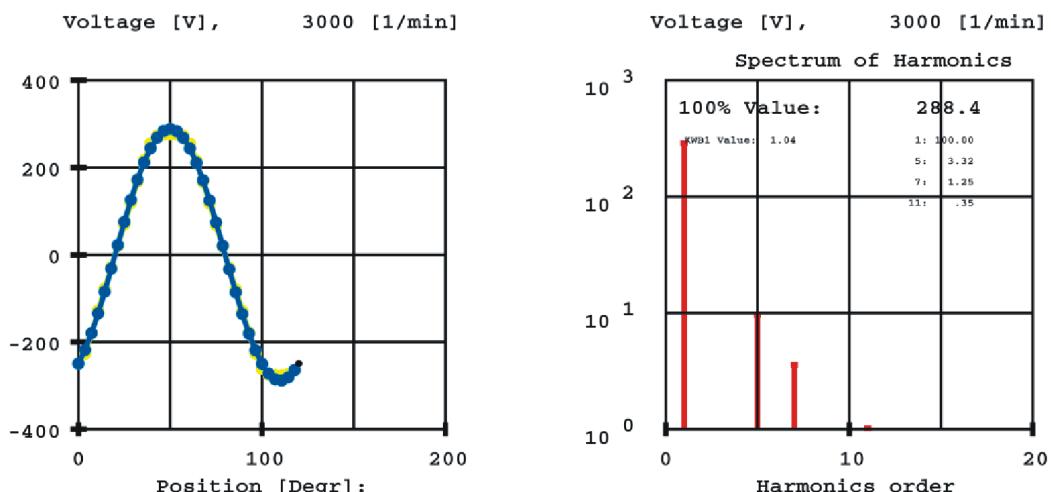


Diagramm 5 und 6 bilden den Verlauf der induzierten Spannung ab. Die blaue Linie (Diagramm 5) stellt die sinusförmige Grundschwingung dar. Die noch schwach sichtbare gelbe Linie ist der Spannungsverlauf einer verketteten induzierten Wicklungsspannung, wie diese in Wirklichkeit beim BLDC CM-IEC 3kW Motor bei 3000U/min und 20 Leitern pro Nut auftritt. Diagramm 6 führt die Oberwellen auf. Bei einem Drehstromsystem mit einer el. Maschine in Sternschaltung treten nur Oberwellen von 5ter und 7ter Ordnung auf. Oberwellen mit gerader Zahl sind naturgemäß nicht vorhanden und Oberwellen ab 7ter Ordnung sind bei einer vernünftigen Auslegung unbedeutend. Bei der Auslegung von Synchronmaschinen ist es energetisch Vorteilhaft nur die Grundwelle zu erzeugen und bei den brushless DC Maschinen durch geschickte Modulation der 5ten und 7ten Oberwelle mit der Grundwelle einen Trapez-förmigen Verlauf der induzierten Wicklungsspannung zu erhalten.

### Vorgehensweise

Die erste Massnahme zur Effizienzsteigerung besteht darin, die induzierte Wicklungsspannung zu erhöhen. Bei einer grösseren induzierten Spannung sinkt der Strombedarf, bei gleich bleibender Nennleistung und Nenndrehzahl. Ein kleinerer Strombedarf führt zu reduzierten Kupferverlusten im Stator und erhöht den Wirkungsgrad.

Die getroffenen Massnahmen sind: Reduzieren des Luftspaltes auf 1mm, der Einsatz von Magnetmaterialien mit höherer magnetischer Energiedichte und vergrössern der Höhe der Magnete.

Induzierte verkettete Spannung, Spitzenwert (BMN-48H, 1mm Luftspalt, Nuten 10° schräggestellt)

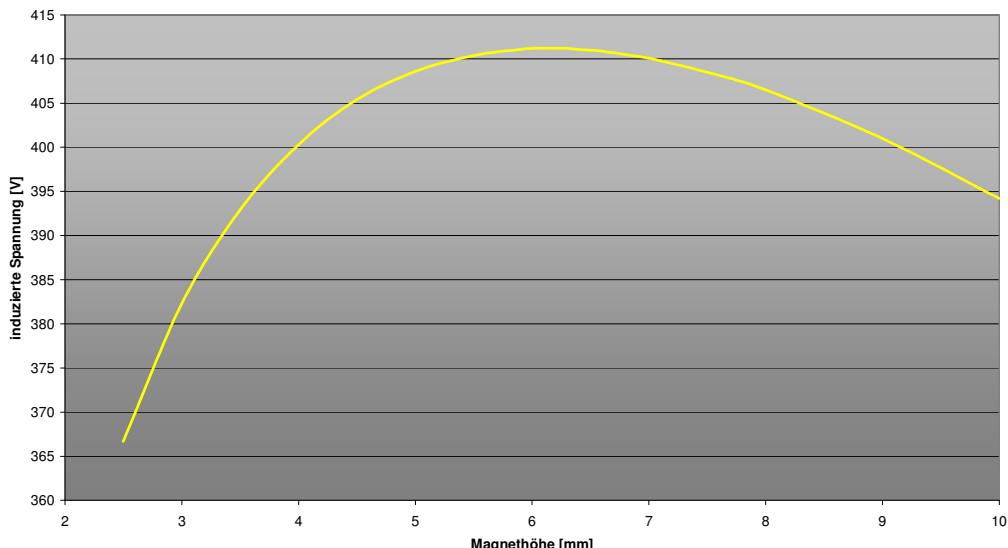


Diagramm 7 zeigt den Verlauf der induzierten Wicklungsspannung mit der Zunahme der Höhe der Magnete.

Das Optimum der induzierten Spannung wird bei einer Magnethöhe von rund 6mm erreicht. Die *FEMAG* Berechnungen zeigen aber, dass die Eisenverluste für die festgelegten Nenndaten von 3kW und 3000U/min schon bei einer Magnethöhe von 3.5mm mit 170W zu gross sind. Die Zunahme der Eisenverluste überwiegt den Gewinn aus der Reduktion der Kupferverluste, sodass das Optimum des Wirkungsgrads bereits überschritten ist. Für den besten Wirkungsgrad ist es deshalb nicht zwingend, das Magnetmaterial mit der höchsten Energiedichte, wie das *BMN-48* zu verwenden. Das Verfahren zur Optimierung auf besten Wirkungsgrad besteht im Gleichgewicht der Kupfer- zu den Eisenverlusten, wobei die Remanenz des Magnetmaterials erfahrungsgemäss bei 1.3 Tesla liegen soll. Mit dem Einsatz von Hochfrequenz Statorblechen könnten die Eisenverluste noch gesenkt und der Wirkungsgrad noch mal erhöht werden. Aus Kostengründen verbietet sich der Einsatz dieser Bleche für Industriemotoren und mit der verwendeten Qualität M330-50A ist ein verlustarmes Blech gewählt, dass sich preislich noch vertreten lässt.

Beim brushless DC Motor liegt der berechnete beste Wirkungsgrad bei 93%. Die Magnethöhe ist 2.5mm und die Magnetbreite 5.5mm. Die Wellenleistung beträgt 3040W, die Kupferverluste 55W, die Eisenverluste 145W und die Zusatzverluste 29W.

Für eine gute Effizienz muss die induzierte Wicklungsspannung beim brushless DC Motor einen Trapez- förmigen Verlauf aufweisen. Dieser Verlauf ergibt sich, wenn der gesamte Umfang des Rotors mit Permanent-Magneten bestückt ist. Für die Eisenverluste nachteilig ist dabei, dass die magn. Flussdichte über dem Umfang des Luftspaltes konstant bleibt. Würden einzelne Magnete pro Pol auf dem Rotor entfernt, so würden sich die Eisenverluste reduzieren und der Verlauf der induzierten Wicklungsspannung sich der Sinusform annähern. Diese Idee verfolgten wir mit der Berechnung eines Permanent-Magnet-Synchronmotors weiter. Den besten Wirkungsgrad aller Berechnungen erreichten wir beim Synchronmotor, mit der Entfernung von 2 der 7 Magneten pro Rotorpol mit gleichzeitiger Vergrösserung der Magnethöhe auf 3.5mm bei den noch vorhandenen 5 Magneten pro Pol.

Beim Permanent-Magnet-Synchronmotor liegt der berechnete beste Wirkungsgrad bei 95%. Die Magnethöhe ist 3.5mm und die Magnetbreite 5.3mm. Die Wellenleistung beträgt 3002W, die Kupferverluste 53W, die Eisenverluste 78W und die Zusatzverluste 29W.

Für beide Motoren wurde das Magnetmaterial *BMH 42* verwendet,

## Berechnete Daten aus FEMAG

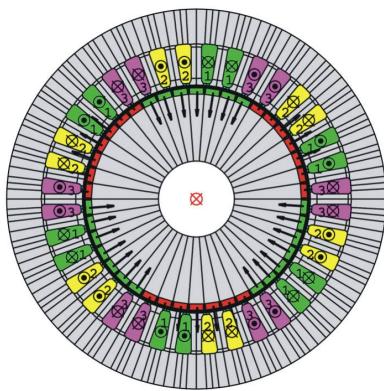


Abbildung 8: FEMAG Modell des BLDC Motors

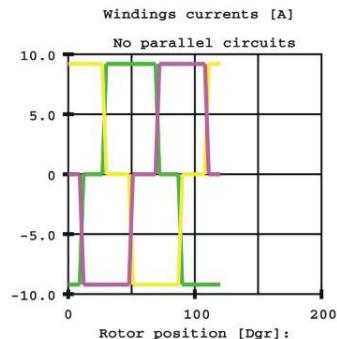


Diagramm 9: Phasenströme

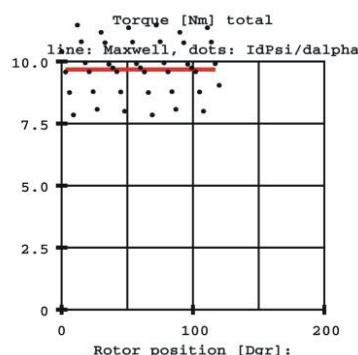


Diagramm 10: Nennmoment

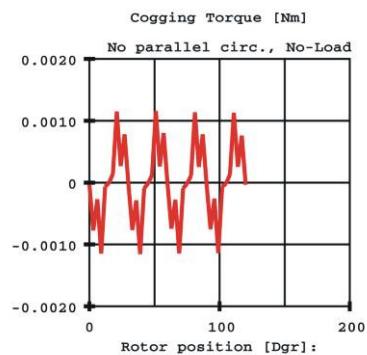


Diagramm 11: magn. Rastmoment

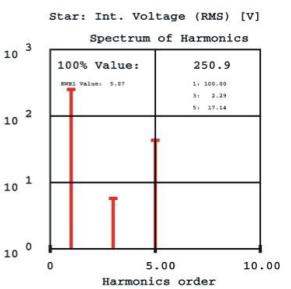
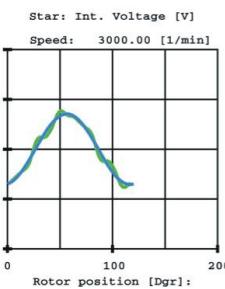
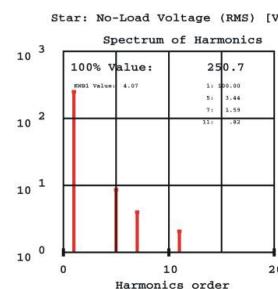
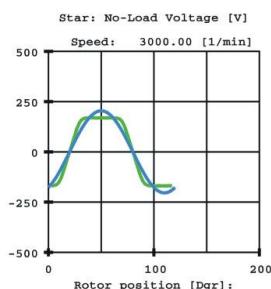
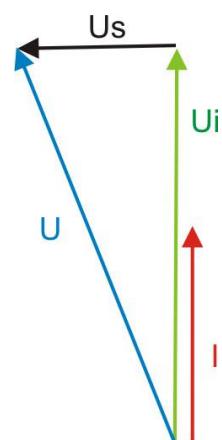


Diagramme 12 – 15: Verlauf der Leerlauf- und Nennspannung mit dem Oberwellenspektrum

Speed..... [1/min]: 3000  
Torque..... [Nm] : 9.68  
Term. Voltage [V] : 149.7  
Mach. Voltage [V] : 149.7  
Current..... [A] : 7.41  
Power..... [kW] : 3.09  
cos phi..... : 0.930  
Angle I vs. Up [Degr] : 0  
Angle U vs. Up [Degr] : -21.92

Ld..... [H] : 0.0071  
Lq..... [H] : 0.0071  
Magn. Flux Psip [Vs] : 0.145  
Resistance Ra [Ohm]: 0.324  
Mach. Length.. [mm] : 70  
L external.... [H] : 0  
L end winding [H] : 0.0008000  
Rel. Nunber Turns : 1

Daten des BLDC Permanent-Magnet-Motors bei Nennlast



Vektordiagramm 16

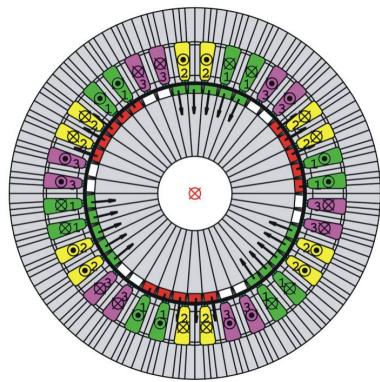


Abbildung 17: FEMAG Modell des Synchronmotors

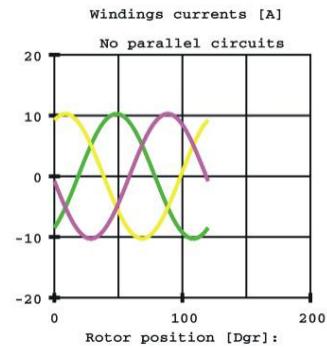


Diagramm 18: Phasenströme

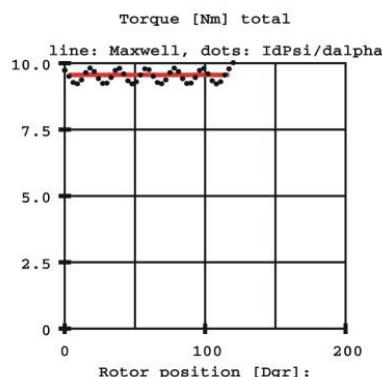


Diagramm 19: Nennmoment

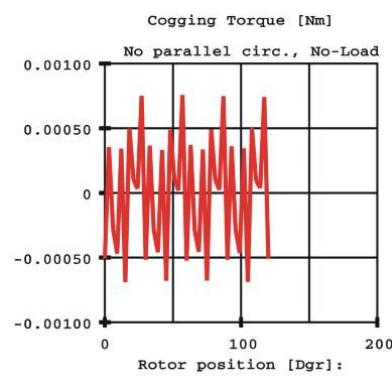


Diagramm 20: magn. Rastmoment

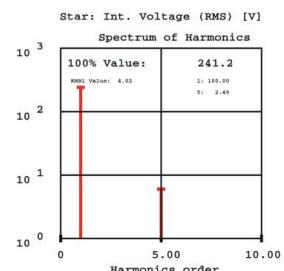
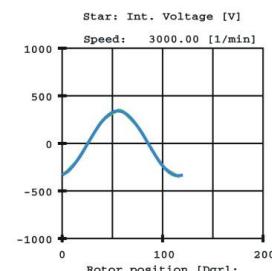
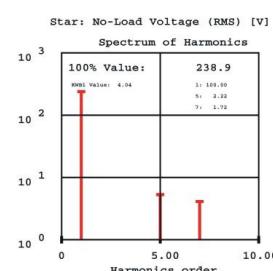
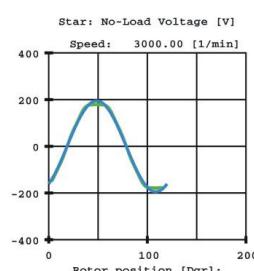


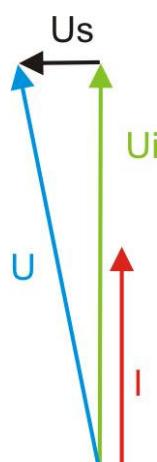
Diagramme 21 – 24: Verlauf der Leerlauf- und Nennspannung mit dem Oberwellenspektrum

Speed..... [1/min]: 3000  
Torque..... [Nm] : 9.56  
Term. Voltage [V] : 142.6  
Mach. Voltage [V] : 142.6  
Current..... [A] : 7.28  
Power..... [kW] : 3.05  
cos phi..... : 0.981  
Angle I vs. Up [Degr] : 0  
Angle U vs. Up [Degr] : -11.49

Ld..... [H] : 0.0033  
Lq..... [H] : 0.0033  
Magn. Flux Psip [Vs] : 0.146  
Resistance Ra [Ohm] : 0.324  
Mach. Length.. [mm] : 70  
L external.... [H] : 0  
L end winding [H] : 0.0008000  
Rel. Nunber Turns : 1

Daten des Permanent-Magnet-Synchronmotors bei Nennlast

Vektordiagramm 25



## Weitere durchgeführte Untersuchungen

Die Welle des effizienten Permanent-Magnet-Motors aus der vorhergehenden Arbeit, lies sich ohne magnetisches Rasten leicht drehen. Der Grund für diese Eigenschaft liegt in der Schrägstellung des Statorblechs in axialer Richtung um genau eine Nut ( $10^\circ$ ). Diese Schrägstellung reduziert die induzierte Wicklungsspannung. In einer weiterführenden Untersuchung wurde erklärt, wie die induzierte Wicklungsspannung und das Rastmoment an der Welle bei einem ungeschrägten Stator ansteigen.

Daten	Magnetmaterial BMN-42H	
Luftspalt [mm]	1.2	
Magnethöhe [mm]	2.5	
Stator		
Schrägungswinkel [ $^\circ$ ]	0	10
magnetischer Fluss [Vs]	0.361	0.356
induzierte Spannung [V]	340.5	336
Rastmoment [Nm]	0.49	0.026

Tabelle 26 zeigt den Einfluss der Statorschrägung.

Dabei wurde das Motormodell einmal mit einem Statorschrägungswinkel von  $10^\circ$  und einmal mit ungeschrägtem Stator ( $0^\circ$ ) simuliert. Die Simulationen zeigten, dass das Rastmoment bei ungeschrägtem Stator unerwünscht hoch auf 0.5Nm ansteigt. Bei einem Wellendurchmesser von 28mm müsste beim Drehen der Welle von Hand eine Kraft von rund 35N angelegt werden. Die induzierte Spannung bei ungeschrägtem Stator nimmt gegenüber dem geschrägten Modell zugleich nur gering um 4 bis 5 V zu. Deshalb kann auf das Schrägen des Stators nicht verzichtet werden.

Ein weiterer Ansatz zur höheren Effizienz besteht in der Realisierung von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen. Jede induzierte Spannung pro Nut bildet einen Spannungsvektor. Werden die Leiter der Wicklung durch mehrere Nuten in Serie geschaltet, so ist der Betrag der resultierenden Anschlussspannung die geometrische Addition der einzelnen Nutenspannungen. Wie aus Abbildung 28 ersichtlich, steigt der resultierende Wicklungsfaktor bei einem 6 Phasen System mit einem Stator mit 36 Nuten infolge fehlender Sehnung an. Der Wirkungsgrad, gegenüber dem 3 Phasen System vergrössert sich jedoch nur um 0.6%, also zu gering für eine Realisierung in unserer Arbeit. Zudem ist die Spannungsform mit Oberwellen behaftet. Weitere Bemerkungen dazu sind auf Seite 11 beschrieben.

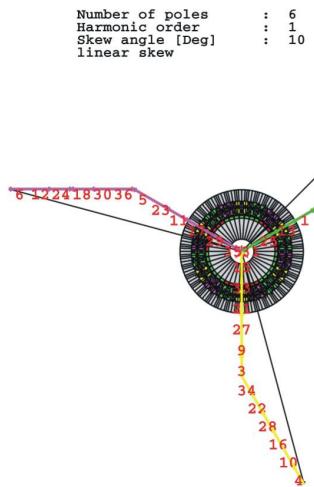


Abbildung 27: resultierender Wicklungsfaktor des 3 Phasen Systems

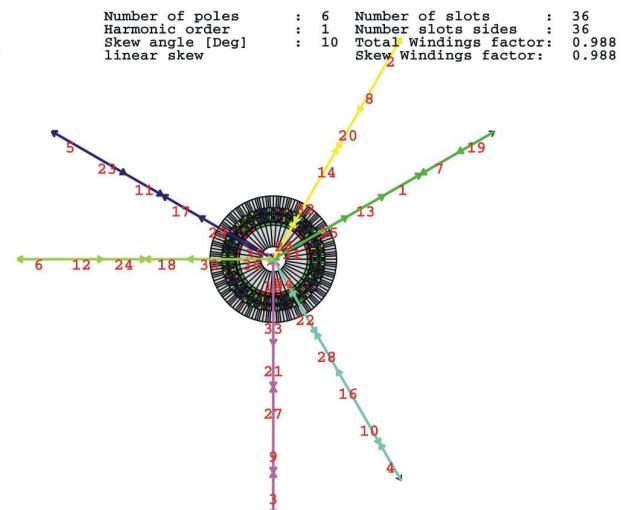


Abbildung 28: resultierende Wicklungsfaktor des 6 Phasen Systems

Die Eisenverluste sind bei der obigen Optimierung bei der Nenndrehzahl von 3000U/min grösser gewählt als die Kupferverluste. Wird der Motor, wie gefordert einem Drehzahlspiel unterworfen, so reduzieren sich die Eisen- und Zusatzverluste mit sinkender Drehzahl, während die Kupferverluste bei gleich bleibendem Drehmoment konstant sind. Darin begründet sich die Wahl der höheren Eisenverluste. Bei der gewählten Ausführung des Rotors in den obigen Berechnungen sind die Magnete Oberflächen-montiert. Diese Art der Montage führt zu konstanten Eisenverlusten über den ganzen Lastbereich. Bei Nenndrehzahl und im tieferen Teillastbereich wirken sich die konstant beleibenden Eisenverluste negativ aus. Ein weiterführendes FEMAG-Modell mit in das Rotoreisen eingebauten Permanent-Magneten wurde deshalb weiterverfolgt. Die Idee besteht darin, einen Luftspalt von nur 0.5 mm zu wählen und das Magnetfeld der Permanent-Magnete mit dem Magnetfeld erzeugt durch den Stromfluss in der Statorwicklung zu addieren. Mit dem geringeren Strombedarf im Teillastbereich sinkt mit dieser Massnahme auch die Magnetisierung im Stator, die Eisenverluste reduzieren sich und der Wirkungsgrad sinkt mit zunehmender Teillast weniger stark. Trotz zeitlichem Aufwand konnte die Optimierung eines Motors mit in Eisen eingebetteten Magneten noch nicht abgeschlossen werden.

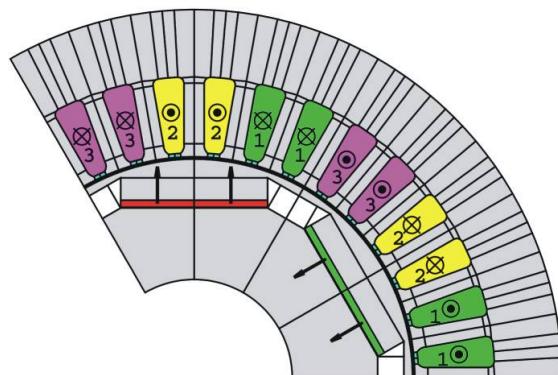


Abbildung 29: FEMAG Modell mit in das Eisen des Rotors eingebauten Permanent-Magneten.

Zu bemerken sein noch, dass die Aussagen in diesem Bericht sich auf eine el. Maschine in den geometrischen Abmessungen der Grösse IEC 100, ausgeführt als Innenläufer, in einem Drehzahlbereich von 3000U/min und einigen kW Leistung gelten. Für andere Ausführungen und geforderte Daten, wie z.B. Kleimotoren oder Motoren im bedeutend grösseren Leistungsbereich, werden sich effizienzbezogene Massnahmen, welche sich für den beschriebenen Motor günstig auswirken, ändern. So ist als Beispiel für einen Kleinstmotor eine eisenlose Wicklung aus Gründen der Herstellung und der Effizienz vorzuziehen.

## Hochschule Wallis

An der Hochschule Wallis wurden Arbeiten zu den möglichen Steuerverfahren für brushless DC Motoren, zum Entwurf des Umrichtereingangfilters und zur Entwicklung eines hocheffizienten Schaltreglers durchgeführt.

### Steuerverfahren

Besonders das brushless Steuerungsverfahren mit den 6 Pulsen wurde noch nicht auf bessere Effizienz untersucht. Die Abbildung 30 zeigt den Verlauf des gemessenen Stromes in einer Phase des Motors.

Die Welligkeit des Stromes bewirkt eine Verringerung des Wirkungsgrades und erzeugt zusätzliche Geräusche.

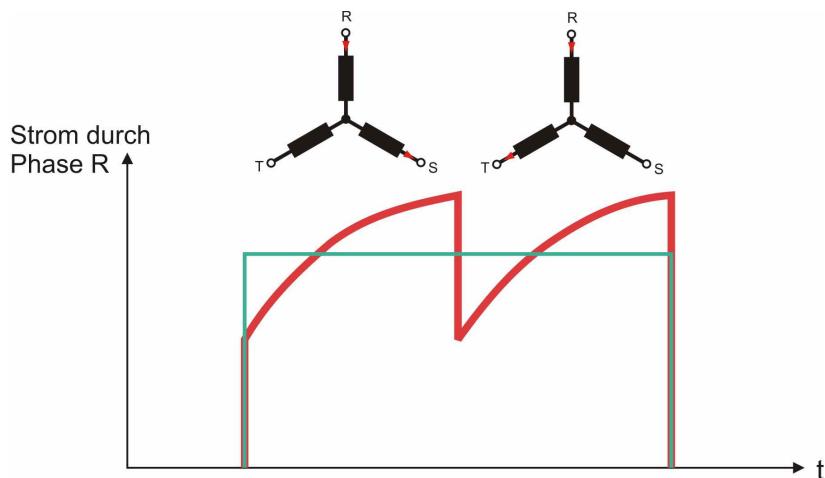


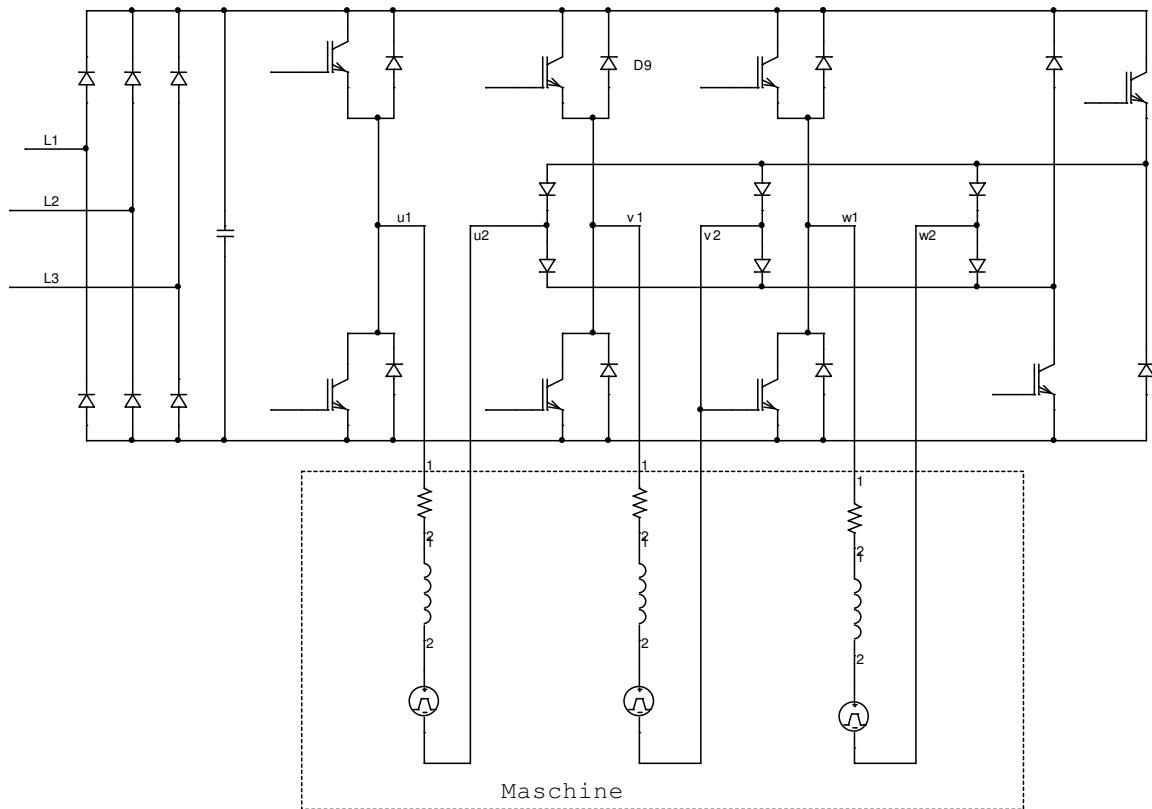
Abbildung 30: Verlauf des gemessenen Stroms in einer Phase des Motors

In der Literatur finden sich Verfahren, die sich positiv auf die Effizienz und Geräuschbildung auswirken. Mit Hilfe von Simulationen wurden 6 pulsige Steuerverfahren mit 12 pulsigen verglichen. Es stellt sich heraus, dass die Welligkeit des Stromes und damit des Antriebsmoments verringert werden kann: Sie kann jedoch nicht vollständig unterdrückt werden.

Ein weiterer Ansatz besteht in der Realisierung von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen. Die grössere Anzahl der Kommutierungen bei kleinerem Strom zeigt weniger Schwankungen im Drehmoment, verringert die Geräusche und erhöht den Wirkungsgrad leider nur unwesentlich, wie die Berechnungen gemäss der Abbildung 28 zeigt. Der Wechsel zu 6 Phasen würde zusätzlich die Kosten der Wechselrichterschaltung erhöhen.

Zu bemerken ist aber, dass Motoren mit hoher Phasenzahl in der Herstellung Vorteile aufweisen, wenn bei einem drei Phasensystem die Windungszahl pro Nut klein und der Leiterquerschnitt gross wird. So z.B. bei Antrieben für Elektrofahrzeuge, die tendenziell kleinere Antriebsspannungen und hohe Stromstärken aufweisen. Zu prüfen wäre der Wechsel auf 6 Phasen auch bei 400V Drehstrommotoren, wenn unsere Arbeit in den Leistungsbereich über 10kW vordringen würde. Die benötigten hohen Ströme ergeben in den Nuten nur noch wenige Leiter mit grossem Querschnitt. Die Herstellung dieser Wicklung und die Anschlüsse ans Klemmenbrett, die Leiterführung in der Antriebselektronik führen mit den massiven Leitern zu einigen Schwierigkeiten. Beim Wechsel zu einem 6 Phasensystem halbiert sich der Leiterquerschnitt, die Wickelarbeit beim Stator und die Verkabelung wird einfacher. Bei unserem 3kW Motor ist der Wechsel zu 6 Phasen nicht gegeben, weil die Herstellung mit den gegebenen Leiterquerschnitten gut beherrschbar ist.

Ausgehend von den guten Resultaten der vorhergehenden Arbeiten [3] wurde versucht, eine Schaltungstopologie zu finden, die mit 6- oder 12-pulsigen Verfahren arbeiten kann, mit stark verkleinerter Stromwelligkeit. Eine Lösung wurde gefunden, die mit 2 Schaltern bei hoher Schaltfrequenz und 6 Schaltern bei tiefer Schaltfrequenz die Maschinenströme steuert (Blockschatzbild 31):



Blockschemma 31: Neue Topologie zur Ansteuerung von brushless DC Maschinen

Diese Topologie weist folgende Vorteile auf:

- „Silizium“ - Lösung, minimaler Filteraufwand
- Hoher Wirkungsgrad
- Brushless DC : Blockströme ohne Welligkeit
- Sinusförmige Maschinenströme ebenfalls möglich
- Kostengünstig
- Im Motor integrierbar
- Mit geringem zusätzlichen Aufwand: 4 Quadrantenbetrieb möglich

Die Schaltung wurde ausführlich simuliert und in einer ersten Version aufgebaut. Sie weist bei 3kW Leistung einen Wirkungsgrad von circa 97% auf. Das folgende Diagramm 32 zeigt den Verlauf des noch nicht optimierten Maschinenstroms mit 6-pulsigem Steuerverfahren als Resultat einer Simulation.

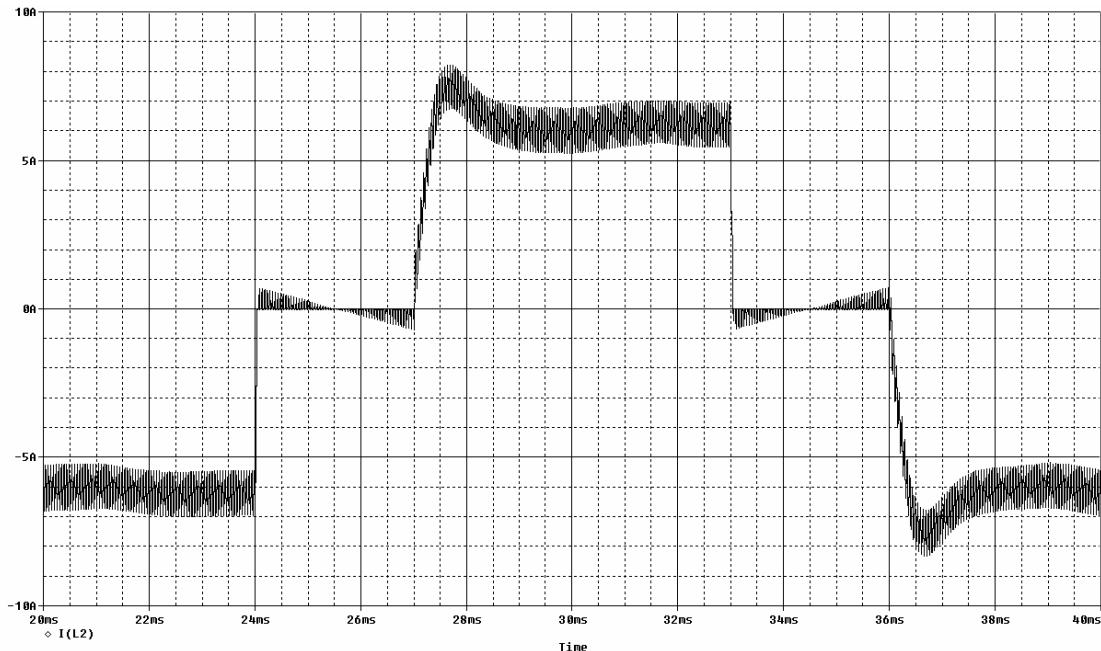


Diagramm 12: Simulierter Verlauf des Maschinenstroms bei der neuen Topologie.

## Eingangsfilter des Umrichters

Ein wichtiger Aspekt liegt in der Einhaltung der Normen bezüglich der netzgebundenen Störungen am Eingang der Steuerung. Die zulässigen niederfrequenten Stromober schwingungen werden in der Norm EN/IEC 61000-3-2 beschrieben. In der Norm EN 50081-1 werden leitungsgebundene Emissionen bis 30MHz und abgestrahlte Emissionen bis 1GHz festgelegt.

Zur Einhaltung dieser Normen wurden elliptische Filter basierend auf einer Gleichtaktfilterstruktur entworfen, die gegenüber üblichen Filtern folgende Vorteile aufweisen:

- Magnetische Auslegung nur auf Gleichtaktströme
- Geringe Baugröße
- Keine Resonanzprobleme mit dem Netz

Die Filter werden mit dem zu realisierenden Prototypen der Umrichterschaltung getestet werden.

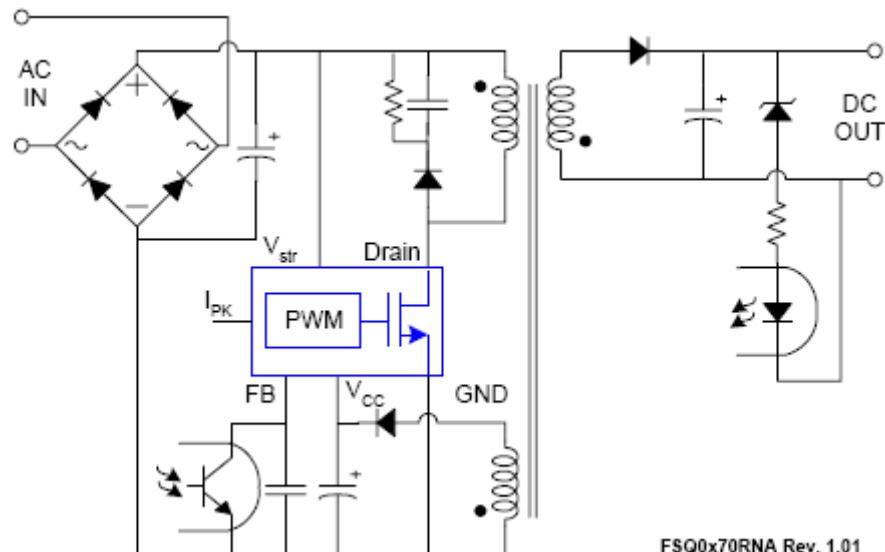
## Hocheffizienter Schaltregler

Der Wirkungsgrad der Umrichterschaltung kann noch dadurch erhöht werden, dass für die Hilfsspeisungen hocheffiziente Schaltregler eingesetzt werden. In den bisher aufgebauten Prototypschaltungen wurden laborübliche Flyback Wandler mit hohen Standby-Verlusten (5W) und geringem Wirkungsgrad (< 50%) verwendet.

Ein neuer hocheffizienter Schaltregler wurde mit Hilfe der „Green Mode Switch“ Technologie entwickelt, die von verschiedenen Herstellern vorgeschlagen wird. Dank dieser Technologie können die Standby-Verluste minimiert werden.

## Funktionsprinzip des „Green Mode Switch“

„Green Mode Switch“ sind autonome Wandler mit einem integrierten Hochspannungs-Transistor. Beim Einschalten der Netzspannung wird ihre Energie zum Aufstarten direkt aus der gleichgerichteten Netzspannung bezogen und anschliessend mit Hilfe einer Wicklung des Transformators bereitgestellt. Diese Schaltungen sind dank ihrer integrierten 500V bis 700V MOS-Transistoren speziell auf Flyback-Speisungen angepasst (Schema 33). Weiterhin sind unterschiedliche Optionen wie Strombegrenzung, Feedback-Eingang zur Regelung der Ausgangsspannung und Hilfsspannungsversorgung integriert.



Schema 33: Prinzipschema einer Flyback-Speisung

Das Aufstarten des Wandlers wird mit Hilfe einer integrierten Stromquelle bewerkstelligt, die einen Kondensator auflädt, und so die notwendige Speisung bereitstellt. Nach dem erfolgreichen Aufstarten wird die Energieversorgung mit Hilfe einer Hilfswicklung des Transformators realisiert. Die interne Stromquelle wird dabei ausgeschaltet.

Eine interne Shunt-Strommessung erlaubt die Strombegrenzung beim Aufstarten und im Fehlerfall. Einige Wandler weisen zusätzlich Softstartschaltungen auf, die den Strom- und Spannungsanstieg verlangsamen.

Das folgende Diagramm 34 zeigt den Spannungsanstieg des 5V Ausganges der realisierten Wandler schaltung ohne Belastung.

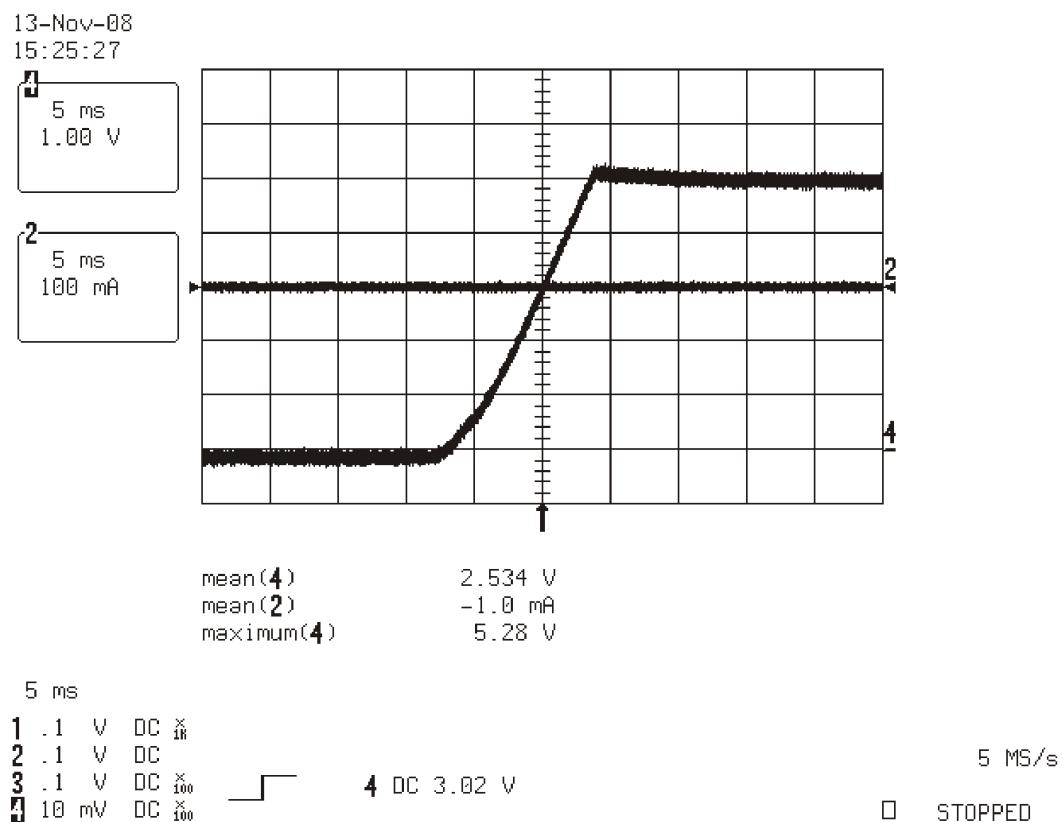


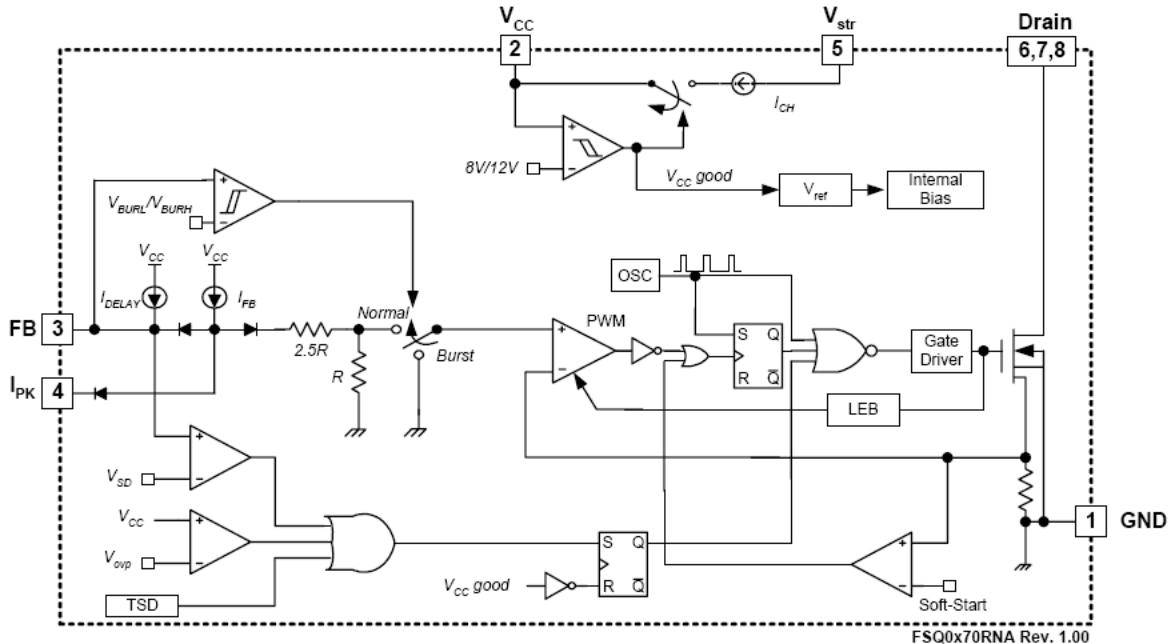
Diagramm 34: Aufstarten der Speisung ohne Last. Obere Kurve 4: Geregelte 5V Ausgangsspannung (Start-Up 0V → 5V). Untere Kurve 2: Ausgangstrom (0A)

Üblicherweise ist ebenfalls eine Schaltung zur Temperaturüberwachung mit integriert um eine Überhitzung und damit die Zerstörung des Wandlers zu verhindern.

Das folgende Blockdiagramm 35 zeigt den inneren Aufbau einer Flyback-Wandler Steuerschaltung.

Erkennbar sind unter anderem die Stromquelle zum Aufstarten ( $I_{CH}$ ), der Pulsbreitenmodulator zur Ansteuerung des Leistungstransistors (PWM, OSC, Gate DRIVER), der Shunt-Widerstand mit dem Eingang zur Festlegung der Strombegrenzung ( $I_{PK}$ ) und die Schaltung zur Regelung der Pulsbreite (FB, Normal, Burst).

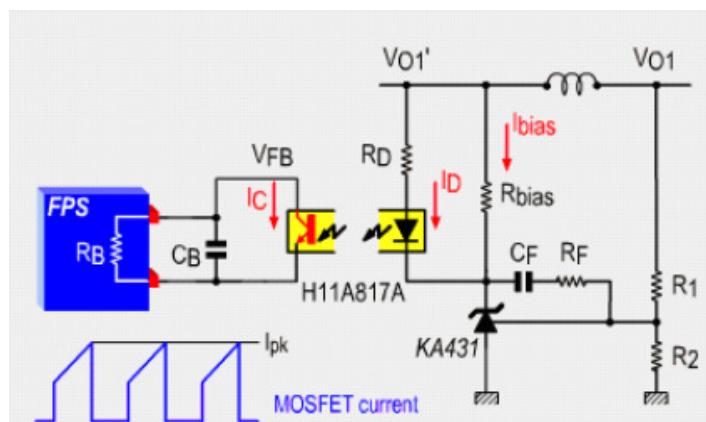
### Internal Block Diagram



Blockdiagramm 35. Innerer Aufbau einer integrierten Flyback-Wandler-Steuerung.

Flyback-Wandler können mit mehreren Sekundärspannungen realisiert werden, wobei üblicherweise nur eine Spannung geregelt wird. Die anderen Spannungen ändern sich unter Belastung.

Oft wird dadurch nur die Versorgungsspannung der elektronischen Einheit (Prozessor) geregelt. Die Referenz dieser Spannung befindet sich normalerweise nicht auf dem Niveau der Flyback Steuerung. Um diese Spannung potentialgetrennt zu regeln, wird eine integrierte Schaltung mit Referenzspannung und Reglereinheit verwendet (Fig. 36, KA431). Das Ausgangssignal dieses Reglers wird mit Hilfe eines Optokopplers (Fig. 36, HA11A817A) der Steuerung des Flyback-Wandlers zugeführt. Mit den in der Figur 36 dargestellten Komponenten  $R_F$ ,  $C_F$ ,  $R_1$  und  $R_2$  wird ein PI Regler zur Stabilisierung der Ausgangsspannung  $V_{O1}$  realisiert.



Figur 36. Galvanisch getrennte Regelschaltung der Ausgangsspannung

Einige Flyback-Reglerschaltungen verringern im Teillastbereich, bei Unterschreitung einer minimalen Pulsbreite, die Schaltfrequenz. Vielfach wird jedoch die Energie im Teillastbereich mit Hilfe von Impulspaketen (Bursts) der Sekundärseite zugeführt (Diagramm 37). In beiden Fällen werden die Schaltverluste verringert und der Wirkungsgrad erhöht.

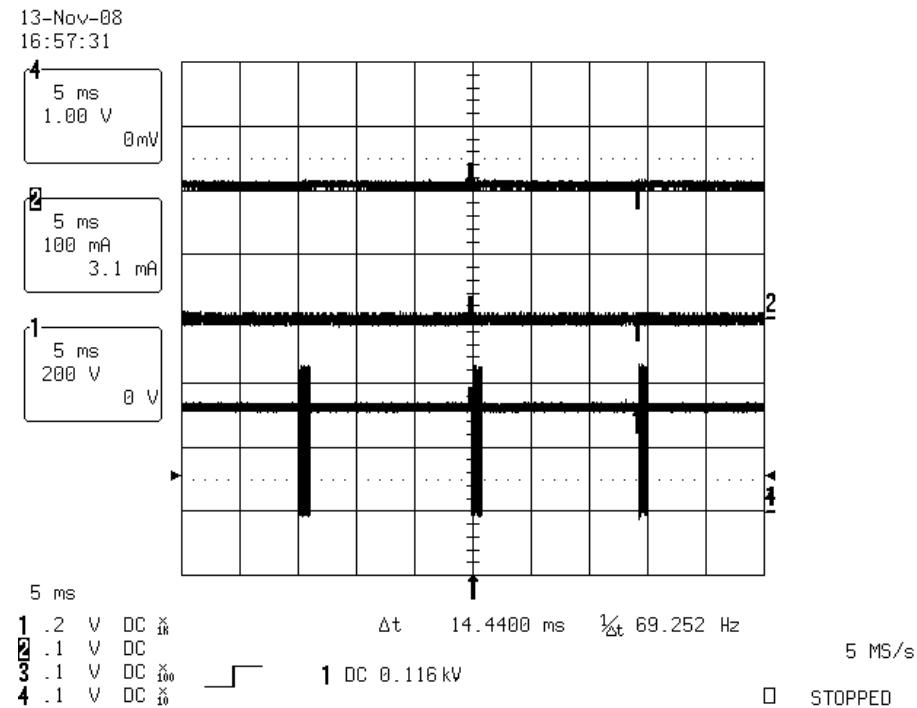


Diagramm 37: Impulspakete im Teillastbereich. Obere Kurve 4: geregelte 5V Ausgangsspannung. Mittlere Kurve 2: Ausgangsstrom (0A). Unterste Kurve 1: Drainspannung des Flybackwandlers (200V/Div)

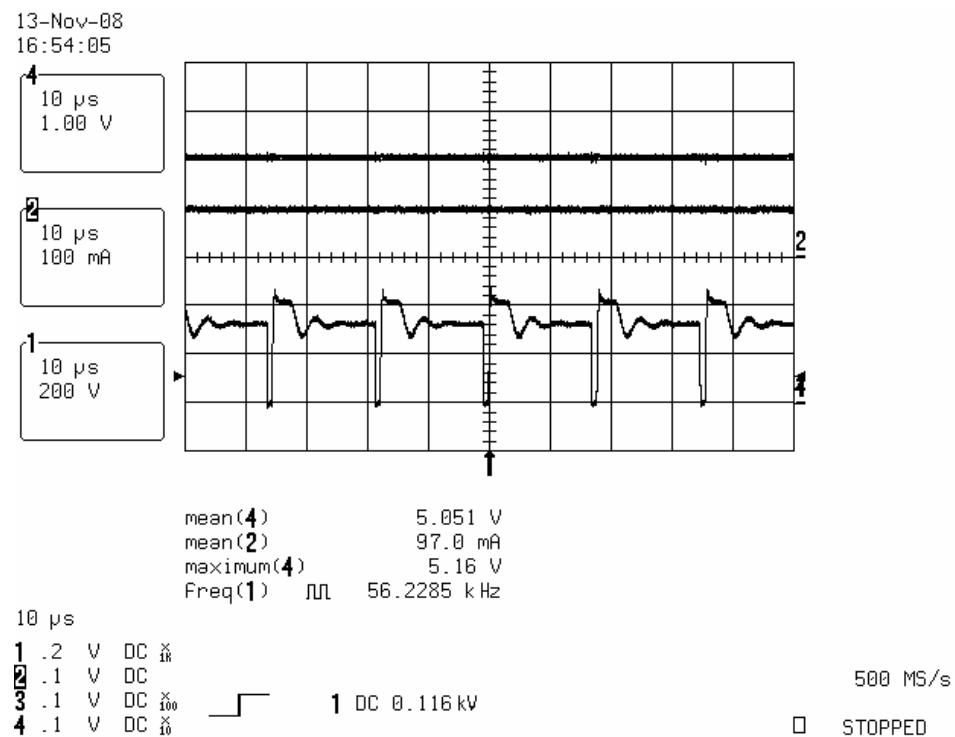


Diagramm 38: Betrieb des Flybackwandlers mit 0.8W Belastung. Obere Kurve 4: geregelte 5V Ausgangsspannung. Mittlere Kurve 2: Ausgangsstrom (100mA/Div). Unterste Kurve 1: Drainspannung des Flybackwandlers (200V/Div)

## Resultate

Die Schaltung wurde mit einem Transformator mit 2 Sekundärspannungen und einer Hilfsspannung (Bias) zur Flyback Steuerung für 10W Leistung entworfen, aufgebaut und getestet.

Die Messung der Standby-Verluste erfolgte ohne Sekundärlast. Durch die Spannungsregelung mit Referenz und Optokoppler blieb jedoch die Flyback-Steuerung in Funktion. Die Messung der Standby-Verluste entspricht daher dem Leerlaufbetrieb des Flyback-Wandlers und nicht der Leistungsaufnahme der gesperrten Steuerschaltung.

Die Tests wurden mit zwei verschiedenen Flyback-Kontrollern durchgeführt: mit dem Typen FSQ311 der Firma *Fairchild* (<http://www.fairchildsemi.com>) und dem Typen Viper17L der Firma *STMicroelectronics* (<http://www.st.com/stonline>).

Die Testaufbauten zeigten eine Leerlaufleistungsaufnahme von 150mW und 120mW (im Vergleich zu 5W der verwendeten Laborspeisung). Die Norm "*Code of Conduct on Energy Efficiency*" bestimmt eine obere Grenze der Leerlauf-Leistungsaufnahme von 300mW für Speisungen im Lastbereich von 0.3W bis 50W.

Uin [V]	lin [mA]	Pin [W]	Uout [V]	Iout [mA]	Uout [V]	Iout [mA]	Pout [W]	Verluste [W]	$\eta$
232.3	8.11	0.163	14.36	0	5.05	0	0.000	0.163	0.000
232.3	10.53	0.600	13.09	7	5.05	48	0.327	0.273	0.546
233.3	13.31	0.990	13.15	11	5.05	89	0.596	0.394	0.602
233.2	17.10	1.600	13.04	22	5.05	147	1.031	0.569	0.644
232.9	24.80	2.640	12.84	61	5.03	213	1.857	0.783	0.704
233.4	34.50	3.810	12.81	112	5.01	284	2.862	0.948	0.751
233.2	41.50	4.800	12.72	164	5.01	320	3.684	1.116	0.767
233.3	48.00	5.720	12.80	193	5.01	385	4.394	1.326	0.768
233.3	51.30	6.190	12.84	208	5.00	421	4.778	1.412	0.772
233.1	61.70	7.510	12.85	261	5.00	494	5.823	1.687	0.775
233.8	74.50	9.240	12.93	324	4.99	586	7.113	2.127	0.770
233.8	94.60	12.100	13.10	407	4.98	762	9.128	2.972	0.754

Tabelle 39. Messung des Wirkungsgrads  $\eta$  beim Flyback-Testaufbau (FSQ311)

## Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad wurde mit Hilfe der Schaltung mit 2 Sekundärspannungen und einer Hilfsspannung (Bias) für die Flyback Steuerung getestet (Tabelle 39). Die 5V Ausgangsspannung wurde mit Hilfe der Regelung stabilisiert. Die Nominalspannung der zweiten Ausgangsspannung beträgt 12V. Die Hälfte der Belastung erfolgte beim 5V Ausgang. Der höhere Ausgangsstrom bei tieferer Ausgangsspannung bewirkt mehr Verluste in der Gleichrichterdiode und der gemessene Wirkungsgrad liegt leicht unter den Erwartungen von 80%. Unter gleichen Bedingungen lieferten beide Kontroller vergleichbare Resultate.

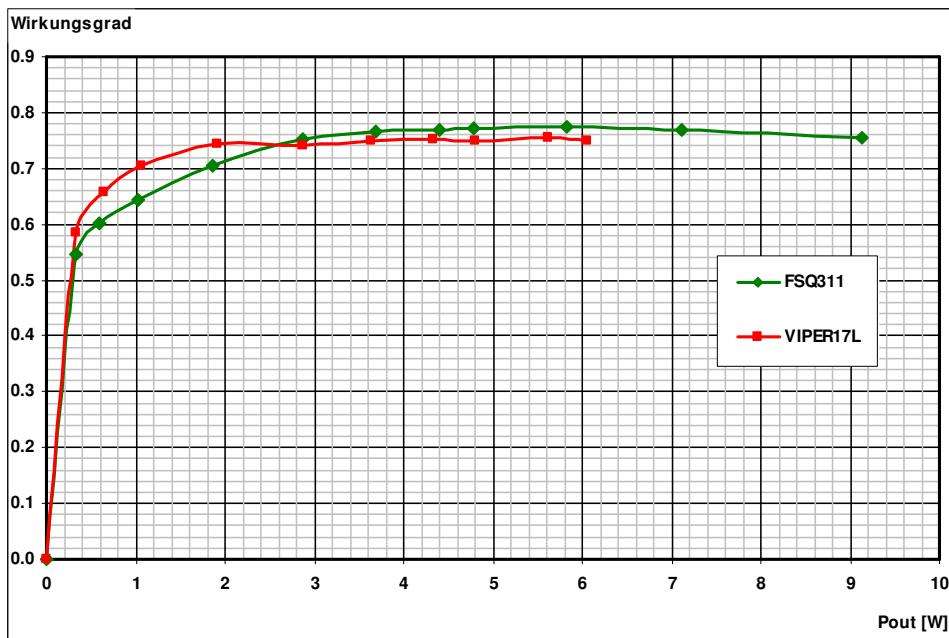
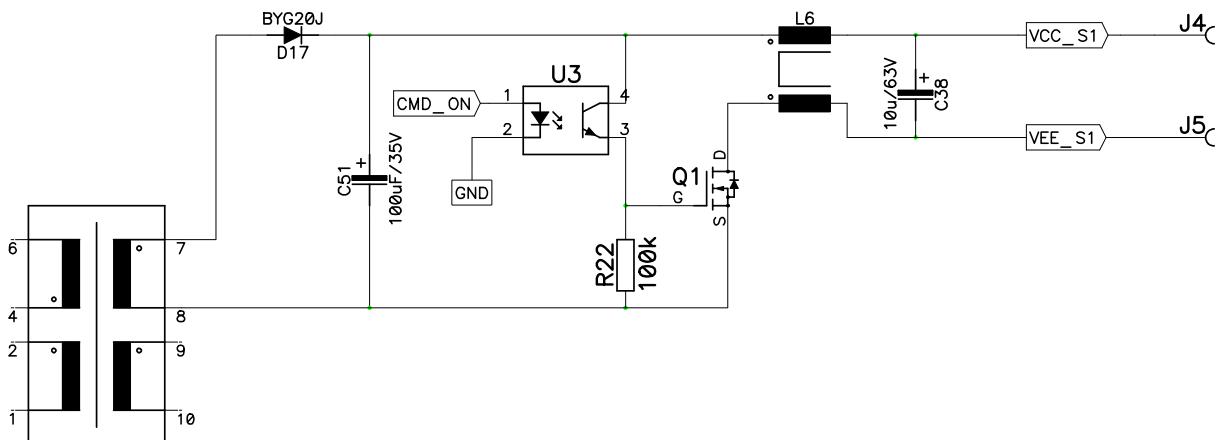


Diagramm 40: Messung des Wirkungsgrads beim Testaufbau.

### Massnahmen zur Verringerung der Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb

Im Leerlauf wurde bei den verwendeten Testschaltungen eine Leistungsaufnahme zwischen 50mW und 150mW gemessen. Falls jedoch mit eingeschalteter Elektronikeinheit (Prozessor und Peripherieschaltungen) die Leistungsaufnahme minimiert werden soll, müssen andere Verbraucher von der Flyback Speisung getrennt werden.

Wie erwähnt, wird bei einer Flyback-Schaltung üblicherweise nur eine Sekundärspannung geregelt und alle weiteren ändern sich unter Belastung. Bei einem Standby-Betrieb mit Elektronikeinheit sollten also die Lasten der nicht verwendeten Ausgänge abgetrennt werden. Dies kann mit Hilfe eines zusätzlichen elektronischen Schalters erfolgen, der durch den Prozessor gesteuert wird (Schema 41)



Schema 41: Prinzip der Abschaltung unbenutzter Ausgänge im Standby-Betrieb.

Mit dem Steuersignal (CMD\_ON) wird der MOSFET-Schalter Q1 im Schema 41 mit Hilfe des Optokopplers (U3) eingeschaltet, und die an den Klemmen J4 und J5 verbundene Last wird mit Spannung versorgt. Im Standby-Betrieb fliesst kein Strom durch die Diode des Optokopplers und der Transistor Q1 wird gesperrt. Der Widerstand R22 garantiert diese Sperrung.

Mit dieser Methode kann der Versorgung der Treiberschaltungen und anderer Verbraucher des Frequenzumrichters im Standby-Betrieb abgetrennt, und dadurch die Leistungsaufnahme minimiert werden.

## Circle Motor AG

Circle Motor AG leitet das Projekt, konstruierte und zeichnete die mechanischen Teile für den Motor und den Steuerschrank.

Der Permanent-Magnet Motor ist mit einem IEC Aluminium Druckguss Gehäuse der Baugrösse 100 mit der zugehörigen Welle und einem B5 Flansch aufgebaut. Damit wird der hocheffiziente Permanent-Magnet-Motor, bezüglich den mechanischen Massen voll kompatibel zu einem 2 poligen 3kW Normmotor. Als Option ist das Anschrauben von Füßen am Gehäuse möglich, sowie der einfache Austausch des Flanschs hin zur Ausführung B3 oder B14. Aus Kostengründen ist die Kugel-gelagerte Welle durch den gesamten Motor durchgeführt und mit den beiden Gussflanschen aufgenommen. Der Rotor/Stator nimmt dabei nur circa 2/3 des vorhandenen Platzes im Gehäuse ein. Bei gleich bleibendem Wirkungsgrad besteht die Möglichkeit mit der IEC Baugrösse 100 die Leistung noch zu steigern.

Die Welle besteht aus gehärtetem Stahl 1.1213. Die Härte beträgt 62 HRC und die durch Rundschleifen erreichte Toleranz ist h6. An beiden Enden ist eine Zentrierbohrung vorhanden, die eine spätere Nacharbeitung zulässt. Dies ermöglicht z.B. eine Verlängerung, nicht antriebsseitig für die Aufnahme eines Ventilatorflügels und/oder eines Encoders.

Der Rotor ist auf die Welle geleimt und verstiftet. Eine berechnete Schrumpfverbindung ergab ein Schrumpfmaß von nur 15um, welche im Bereich der Fertigungstoleranzen von Welle und Rotorbohrung liegen. Unter dieser Gegebenheit wurde die Schrumpfverbindung als zu unsicher betrachtet und verworfen. In axialer Richtung, nahe am Außenumfang des Rotors befinden sich Bohrungen, um den Rotor nach der Komponenten-Methode zu wuchten. Ein geeignetes Auswuchtgerät Minibalancer MI 2000 der Firma Hofmann GmbH steht zur Verfügung. Die Komponenten-Methode gibt die Wuchtgewichte und die Zugehörigkeit zu den vorhandenen Bohrungen an. Das Wuchten des Rotors erfolgt in zwei Ebenen, da ein langer Rotationskörper vorliegt. Die Einarbeitung in den Arbeitsschritt „Wuchten“ erfolgte. Es sei noch bemerkt, dass nicht ausgewuchtete Rotoren Vibrationen erzeugen, welche in bedeutender Weise Schwingungsenergie in Wärme umsetzen und den Wirkungsgrad des Motors signifikant senken können.

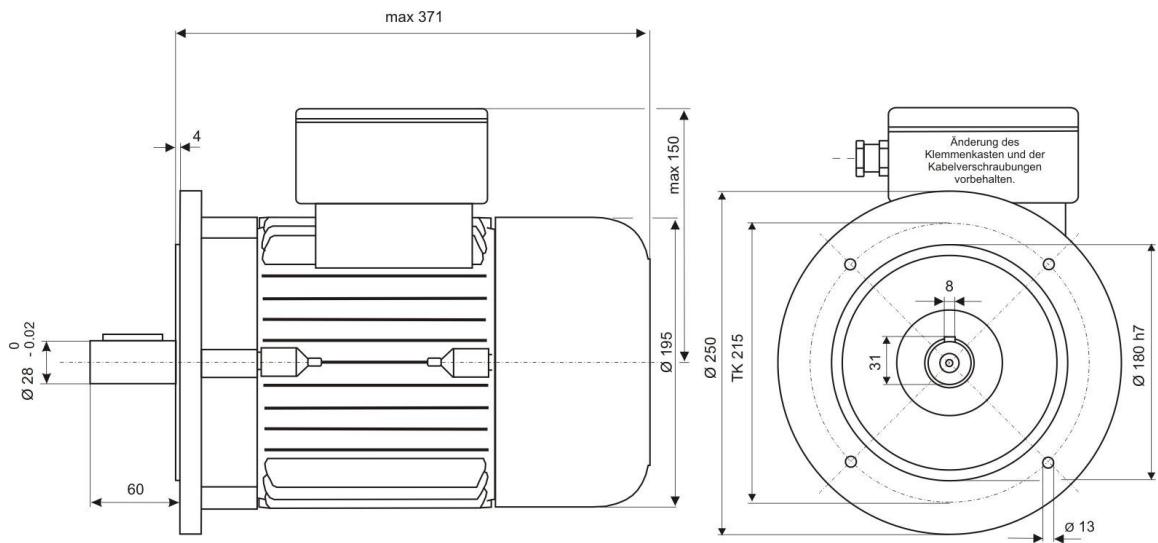
Der beste Wirkungsgrad des Motors bei Nennlast wurde mit 95% berechnet. Rund 150W Wärme muss von der Oberfläche des Gehäuses abgegeben werden. Das Massblatt 42 zeigt den Motor mit Ventilatorhaube. Die energetischen Messungen für die Pumpenanwendung bei der Biral AG werden klären, ob ein Ventilator nötig ist oder nicht.

Die Berechnungen der Hochschule Luzern ergaben für den Synchronmotor den höchsten Wirkungsgrad. Mit den technischen Daten des Vorgängers lag der Wirkungsgrad bei 94.5%. Die runde Zahl von 95% stachelte den Ehrgeiz an und so zeigte sich, dass der Wirkungsgrad von 95% mit einer Einsparung des Kupferwiderstands von 25% bei der Wicklung möglich wird. Die von Circle Motor AG getroffenen Massnahmen liegen in erster Linie bei der Einsparung von Kupfer bei den Wicklungsköpfen, weil damit auch eine Kostenreduktion einher geht und in zweiter Linie beim erhöhen des Füllfaktors bei den Nuten. Ein ausführliches Studium des Wicklungskonzeptes erfolgte, auch unter Einbezug der Bibliothek der Hochschule Luzern.

Das Massblatt 44 zeigt den Steuerschrank, der etwas grösser gewählt wurde als nötig. Die abzugebende Wärme beträgt 100W und ist mittels natürlicher Konvektion von der Oberfläche an die Umgebung abzuführen. Im Innern des Steuerschranks ist ein Ventilator vorgesehen, der die Luft umwälzt und die Wärme bildenden Komponenten kühl, sowie für eine gleichmässige Strömung mit Wärmeabgabe an die Innenwand sorgt.

Alle Steuer-, Signal und Energieleitungen sind an Klemmen geführt. Das Netz ist mit Sicherungen und einem Hauptschalter geschützt. Zur Übertragung der Steuer- und Signalleitungen nach aussen sind genügend DIN Buchsen vorgesehen.

Das Massblatt 44 des Steuerschranks zeigt die vier Ansichten und die Darstellung der Montageplatte mit dem Aufbau der elektrischen und elektronischen Komponenten.



Massblatt 42: Seiten- und Frontsicht des hocheffizienten IEC 100 Permanent-Magnet-Motors

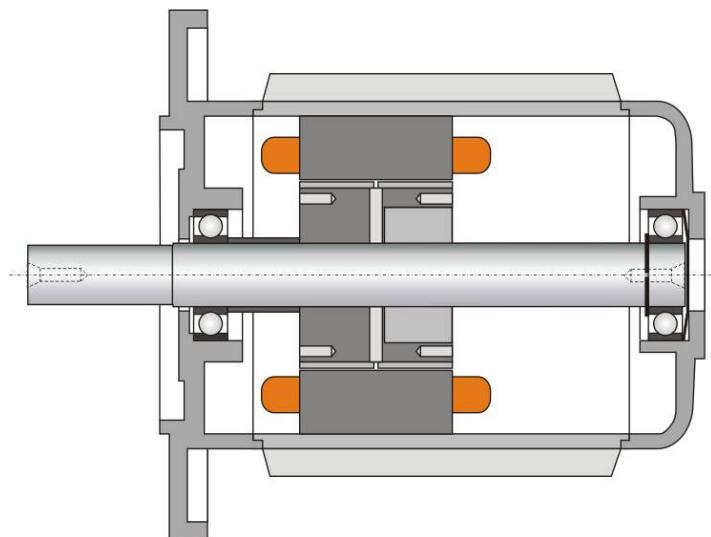


Abbildung 43: Schnittzeichnung durch den Motor

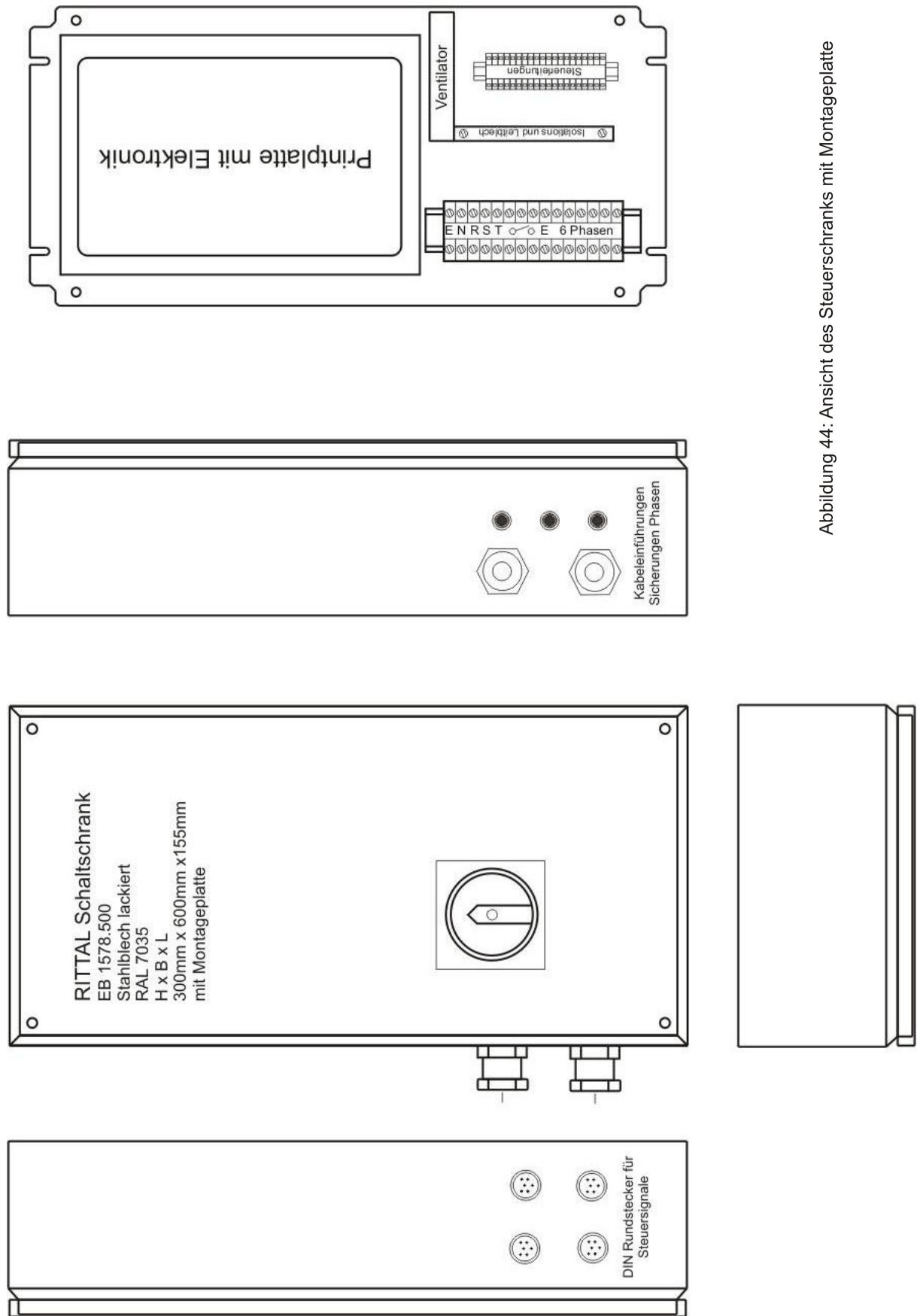


Abbildung 44: Ansicht des Steuerschranks mit Montageplatte

## Nationale Zusammenarbeit

Dieser Auftrag des Bundesamts für Energie wird von zwei Firmen, der Biral AG, Circle Motor AG und den beiden Hochschulen Luzern, Wallis durchgeführt.

## Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Mit den realisierten Arbeiten im 2008 liegt der berechnete Wirkungsgrad des hocheffizienten IEC 3kW Permanent-Magnet-Motors zusammen mit der Antriebssteuerung im Bereich von 90-92%. Das angestrebte Ziel, den Durchbruch über die 90% Wirkungsgrad Marke sollte somit im 2009 auch mit Messungen bestätigt werden.

Der höchste Wirkungsgrad zeigte sich nicht, wie erwartet beim brushless DC Motor, sondern beim Synchronmotor. Aus dieser Erkenntnis konzipierte die Hochschule Wallis eine Antriebssteuerung die es ermöglicht beide Steuerungsverfahren, brushless DC und Synchron, umzusetzen. Die Auslegung des Motors durch die Hochschule Luzern führte zur Erkenntnis, das nicht der Einsatz des besten Magnetmaterials zur höchsten Effizienz führt, sondern das optimierte Zusammenspiel der erzeugten Kupferverluste der Wicklung mit den Eisenverlusten des verwendeten Statorblechs. Die Hochschule Wallis entwickelte einen hocheffizienten Schaltregler nach der Green Mode Switch Technologie für die Spannungsversorgung der Leistungselektronik. Circle Motor konzipierte den Aufbau des Motors gemäss der IEC Norm, zeichnete den Steuerschrank und erarbeitete Ideen zur weiteren Effizienzsteigerung mittels geeigneter Wuchtmethode des Rotors, sowie zur Reduktion der Kupferverluste der Wicklung.

Im 2009 werden der hocheffiziente Permanent-Magnet-Motor und die Antriebselektronik mit dem zugehörigen Steuerschrank hergestellt, alle Komponenten in Betrieb genommen und ausgemessen, sowie energetische Messungen als Pumpenanwendung bei der Biral AG durchgeführt.

## Referenzen

- [1] BFE Studie: „**Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren**“. Erstellt durch Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)
- [2] Flyer **topmotors.ch**
- [3] BFE Auftrag: „**Effizienter IEC 3kW Permanent-Magnet-Motor**“. Erstellt durch Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)
- [4] BFE Auftrag: „**Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP-B**“. BFE Projekt Nr 100985.

Alle Abbildungen, Schemas, Tabellen und Diagramme in diesem Bericht sind durch die Projektmitglieder entstanden.