

Jahresbericht 2004, 27. Dezember 2004

Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1kW

Autor und Koautoren	Markus Lindegger dipl. El. Ing. HTL
beauftragte Institution	CIRCLE MOTOR AG
Adresse	Brüggliweg 18
Telefon, E-mail, Internetadresse	031 952 52 52 info@circlemotor.ch www.circlemotor.com
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100915 / 151073
Dauer des Projekts (von – bis)	26. Juli 2004 bis 30. April 2007

ZUSAMMENFASSUNG

Ein ansprechendes Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors ist gebaut. Der Integral-Sparmotor erreicht mit der Steuerung einen maximalen Wirkungsgrad von knapp unter 80%. Bei Nennlast (250W Wellenleistung) beträgt der Wirkungsgrad 76%. Die Leerlaufverluste bei 3000 U/min (Motor, Ventilator und integrierte Antriebselektronik) betragen 22W. Im Vergleich kommt der Integral-Sparmotor mit weniger Kupfer und weniger Stator- Eisen aus als ein vergleichbarer Normmotor. Bei der Entwicklung des Funktionsmusters stand bereits eine spätere, kostengünstige Fertigung im Vordergrund. Deshalb sind alle Komponenten, Stator, Rotor und Antriebselektronik in ein IEC Normgehäuse eingebaut. Die Halbleiterindustrie entwickelt immer kompaktere Chips für den Betrieb von Elektromotoren. Der Markt bietet neu einen Baustein an, in dem ein brushless Controller, die Treiber und die 400V-Leistungstransistoren in einem Gehäuse integriert sind. Diese Entwicklung senkt die Kosten. Der grösste Erfolg des Projektes ist, der zu erwartende Verkaufspreis des 250W Integral-Sparmotors von unter 200 CHF pro Stück, bei optimalen Fertigungsbedingungen. Damit werden die vorgeschlagenen Integral-Sparmotoren zu ernsthaften Konkurrenten für Normmotoren, betrieben an Frequenzumformern im Leistungsbereich < 1kW. Diese Preisgestaltung ist mit eingeholten Offerten überprüft.

Für die Suche eines geeigneten Industriepartners, für die Entwicklung des Integral-Sparmotors zu einem serienreifen Produkt und für die Produktion, wird noch Zeit benötigt. Dies begründet sich auch dadurch, dass das fertige Funktionsmuster erst gegen Ende der ersten Projektphase fertig erstellt worden ist. Gespräche mit möglichen Industriepartnern haben gezeigt, dass die Investitionsbereitschaft in der Schweiz und im EU-Raum eher verhalten ist. Es bestehen Kontaktmöglichkeiten in den asiatischen Raum.

Die Integral-Sparmotoren weisen, nebst einem höheren Wirkungsgrad auch grössere Anlaufmomente auf als Normmotoren. Deshalb sind die vorgeschlagenen Sparmotoren auch als Servomotoren einsetzbar, wie zum Beispiel als Antriebsmotoren für automatische Türen. Vorteilhaft bei dieser Anwendung wäre die Anbindung der Elektronik an ein Bussystem für die Gebäudeautomatisation.

Projektziele

Der grösste Teil der heute eingesetzten Elektromotoren im Bereich 100 W bis 1 kW arbeiten nicht effizient. Der Anteil am Elektrizitätsverbrauch dieser Elektromotoren ist erheblich. Das Ziel des Gesamtprojektes „Energiesparmotor“ ist die Entwicklung eines effizienten Elektromotors mit integrierter elektronischer Steuerung (Integral–Sparmotor) als Ersatz für Normmotoren (Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufern) betrieben an Frequenzumformern im Leistungsbereich < 1kW.

Ausgangslage

Im Jahr 2002 führte *Circle Motor AG* im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE ein erstes Grundlagen -Projekt [1] zum Energiesparmotor durch. Diese Arbeit gliederte sich in drei Phasen:

- Berechnung und Bau eines 250 W Energiesparmotors als Prototyp, für den Einsatz bei 230 Volt.
- Messen der Daten des Energiesparmotors und eines Normmotors gleicher Leistung, auf einem Prüfstand der Fachhochschule Luzern. Die gemessenen Daten beider Motoren wurden verglichen.
- Eine Marktstudie prüfte, ob der vorgeschlagene Energiesparmotor, gegenüber einem Normmotor, preislich konkurrenzfähig ist, wobei auch die Steuerung einbezogen wurde. Ebenfalls erfolgte eine Aussage über das Energiesparpotential in der Schweiz, wenn solche Energiesparmotoren eingesetzt würden.

In einem zweiten Auftrag [2] des Bundesamtes für Energie BFE, in Zusammenarbeit der Firmen *Circle Motor AG* und *Bächli AG*, wurden verschiedene Wicklungsarten und Stator Konstruktionen im Bezug auf den Wirkungsgrad untersucht und optimiert. Drei verschiedene 230 Volt Wicklungen wurden geprüft und Prototypen gebaut. Diese Prototypen wurden mit einem hochwertigen Normmotor verglichen.

Unabhängig von unseren Arbeiten führte das *Institute of Technology Illinois* [3] ein Projekt Energiesparmotor durch. Unsere Analysen im Bereich Energiesparen, Umweltschutz, Marktbereiche bezieht sich auf die Schweiz. Die amerikanische Studie hingegen zeigt die globale Sicht. Beiden Arbeiten ist gemeinsam, dass für den zukünftigen Energiesparmotor die Bauart eines brushless DC Motors mit einem Rotor mit Dauermagneten vorgeschlagen wird und nicht ein Normmotor (Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer).

Die Links zu den ausführlichen Berichten finden Sie im Quellenverzeichnis.

Ziel der Phase 1 (2004) des Projektes Integral-Sparmotor

Das Ziel des dritten, aktuellen Auftrages ist die Entwicklung einer Baugrösse eines Integral – Sparmotors bis zur Serienreife. Der vorliegende Jahresbericht 2004 beschreibt die Arbeiten der Phase 1. Die Phase 1 beinhaltet die Entwicklung und den Bau eines Funktionsmusters mit dem Ziel einen Industriepartner zu gewinnen. Das Funktionsmuster ist nötig, um eine gewisse Sicherheit zu haben, dass ein Integral-Sparmotor in der gewünschten Kompaktheit auch realisierbar ist. Für die Werbung ist ein ansprechendes Funktionsmuster nach unserer Erfahrung zwingend.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Konzept des ersten Funktionsmusters

Grundsätzlich ist der Integral–Sparmotor ein Preis empfindliches Produkt, welches im Wettstreit mit IEC Normmotoren, betrieben an Frequenzumformern steht. Die vorgängigen Arbeiten sind mit 250 Watt Motoren durchgeführt worden. Die Kosten eines IEC Normmotors, Baugrösse 63, 2 polig mit Frequenzumformer, Verkabelung und Inbetriebnahme belau-

fen sich auf etwa 300.- Fr. Um vergleichen zu können, wird die Leistung des ersten Funktionsmusters des Integral-Sparmotors bei 250 W festgelegt.

An eine Alternative zu Normmotoren, die fest an das Strom-Netz angeschlossen sind, sollte ebenfalls gedacht werden. Begründet liegt dies in den Anstrengungen der Halbleiterindustrie immer kompaktere Chips herzustellen. Ein namhafter Halbleiterhersteller bietet neustens einen Baustein an, in dem der komplette Leistungsteil und der Controllerteil für den Betrieb von brushless DC Motoren integriert sind. Die Preisdifferenz zwischen den fest am Netz betriebenen Normmotoren und den Integral-Sparmotoren wird in Zukunft, durch diese Tendenz, weiter schwinden. Unter Einbezug der eingesparten Energiekosten und Aspekte des Umweltschutzes (Kyotot Protokoll) kann sich der Integral-Sparmotor auch hier durchsetzen.

Bei Gesprächen zum Integral-Sparmotor stand jeweils der Preis sehr rasch im Vordergrund. Um dieses Thema zu entkräften, wurde das erste Funktionsmuster mit einem IEC Gehäuse, Baugrösse 63 ausgeführt. Folgend Vorteile ergeben sich durch diese Wahl:

Die Kosten der mechanischen Teile, sowie des benötigten Stator/Rotor Eisens und des Kupfers für die Wicklung sind in diesem Preis eingeschlossen. Der ausgemessene Normmotor Nr1 aus dem ersten Auftrag kostete CHF 91.- beim Kauf eines einzigen Motors. IEC Motorengehäuse sind bekannt und können weltweit bezogen werden.

Der Normmotor Nr 1 und das Funktionsmuster des Integral-Sparmotors können direkt verglichen werden. Dazu wurde der Normmotor Nr1 in seine Einzelteile zerlegt und das IEC 63 Normgehäuse für den Bau des Integral-Sparmotors verwendet.

Die bereits gebauten Energiesparmotoren ohne integrierte Steuerung haben gezeigt, dass der Rotor/Stator nur etwa die Hälfte des Volumens beansprucht, wie bei einem vergleichbaren Normmotor. Es ist deshalb leicht einzusehen, dass im frei werdenden Platz des IEC Normgehäuses, auch die Antriebselektronik (Fig1) untergebracht werden kann.

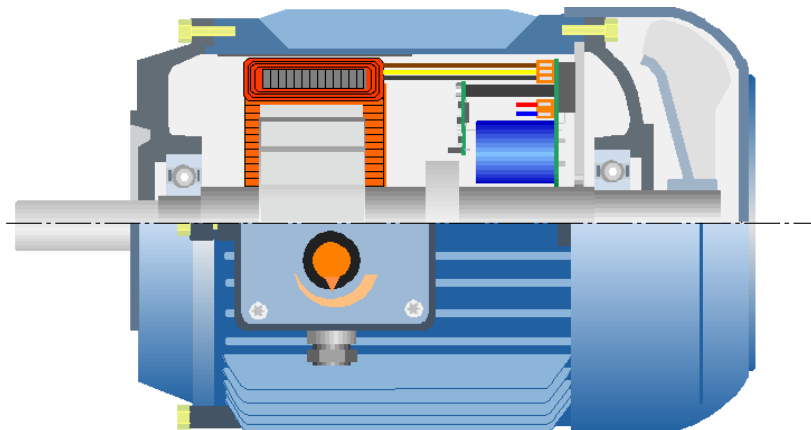


Fig 1. Schnitt durch den Integral-Sparmotos mit einem IEC Normgehäuse aufgebaut.

Beim Integral-Sparmotor wir ein Wirkungsgrad von etwa 80% erwartet. 60W müssen als Wärme abgeführt werden. Erstrebenswert ist eine möglichst geringe Erwärmung, da die Lebensdauer der Antriebselektronik von der Temperatur abhängt. Die Temperatur der Elektrolytkondensatoren im Zwischenkreis muss möglichst der Umgebungstemperatur angenähert bleiben. IEC Motoren sind mit einer Ventilation ausgerüstet. Die Wahl des Ventilatorrades bietet die Möglichkeit, die Kühlung optimal einzustellen, ohne dadurch die Aufnahmeleistung wesentlich zu erhöhen.

Die Wahl der Wicklungsart fiel auf die Ringwicklung/Jochwicklung, weil hier die grösste Erfahrung und nach unserer Auffassung auch das grösste Potential für eine automatische Fertigung einer spannungsfesten 230Volt Wicklung vorhanden ist. Entsprechende Innovationen und finanzielle Investitionen sind in eine neue Form der Spulenkörper getätigt worden.

Aufbau Zwischenkreis

Die Strategie bei der Wahl der Komponenten im Gleichspannungszwischenkreis besteht im Einsatz hoch - integrierter Halbleiterbausteine. Diese Lösung spart Kosten und Platz. Gesucht wurden Bausteine die mindestens die sechs Leistungshalbleiter, die Treiber, Überstromschutz, Überspannungs- und Unterspannungsabschaltung aufweisen.

Blockschaltung Zwischenkreis

Der grundlegende Aufbau des Zwischenkreises (Fig2) ist Stand der Technik und wird hier nicht näher beschrieben.

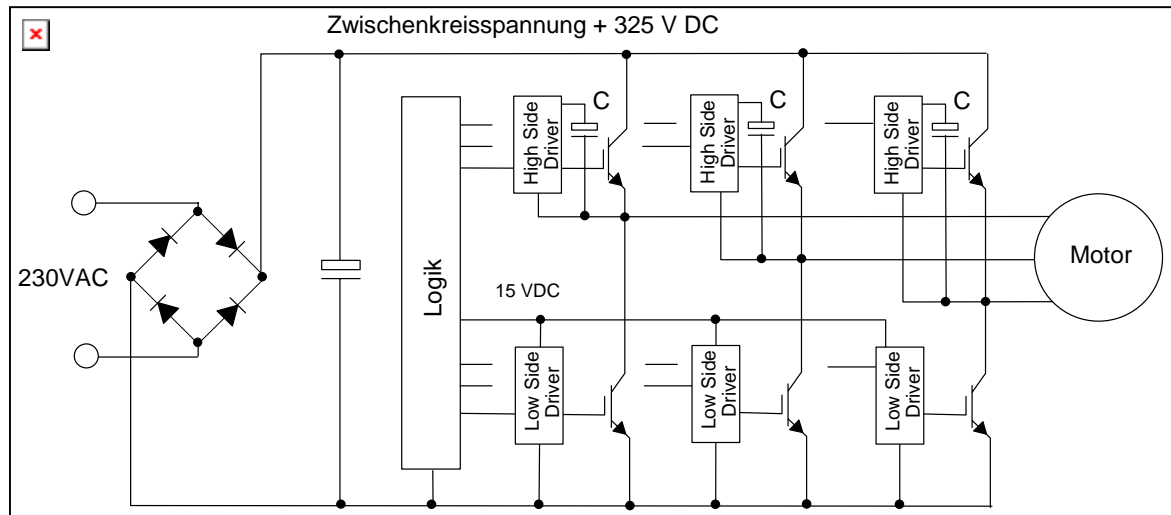


Fig2. Blockschaltbild eines Gleichspannungs-Zwischenkreises.

Unterschiedlich ist jedoch der Schaltvorgang der Leistungsschalter (IGBT's) zwischen einem Frequenzumformer und einer Steuerung für brushless DC Motoren. Der Frequenzumformer muss im Normmotor eine sinusförmige Drehspannung mit veränderbarer Frequenz erzeugen. Mittels Pulsweiten-Modulation (PWM) wird innerhalb eines Taktzyklus, durch ein-und ausschalten aller 6 Leistungsschalter die momentanen Spannungswerte aller drei Phasen gebildet. Alle drei Low-Side IGBT's sind innerhalb eines Taktzyklus der PWM, für eine bestimmte Zeit, eingeschaltet. Während dieser Zeit liegen die High-Side Treiber an Masse und können durch die sogenannten Bootstrap Dioden geladen werden. (Fig3).

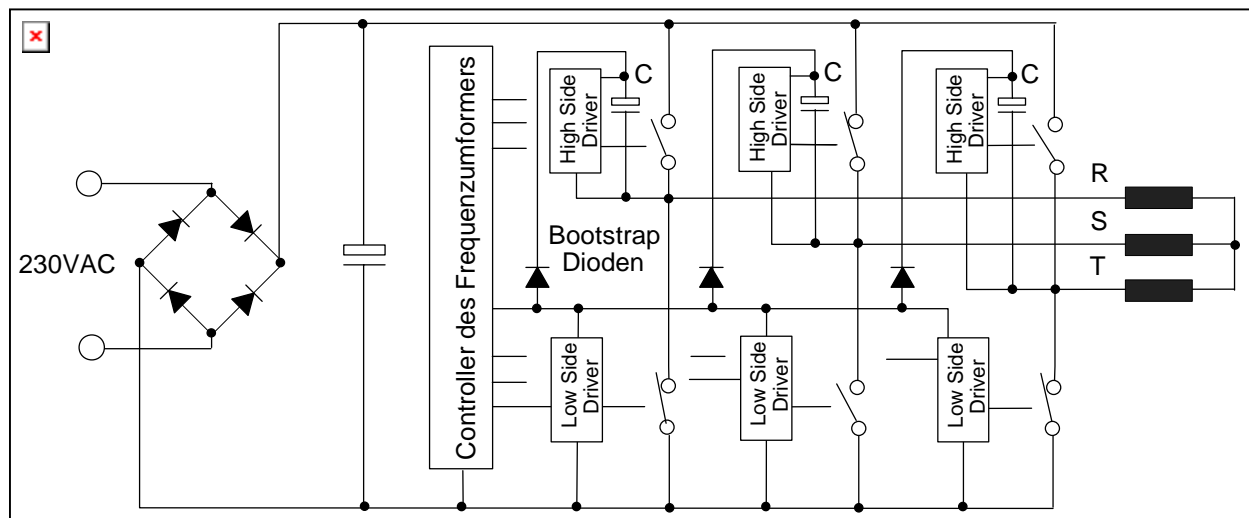


Fig3. Blockschaltbild eines Frequenzumrichters mit Bootstrap Dioden und Normmotor.

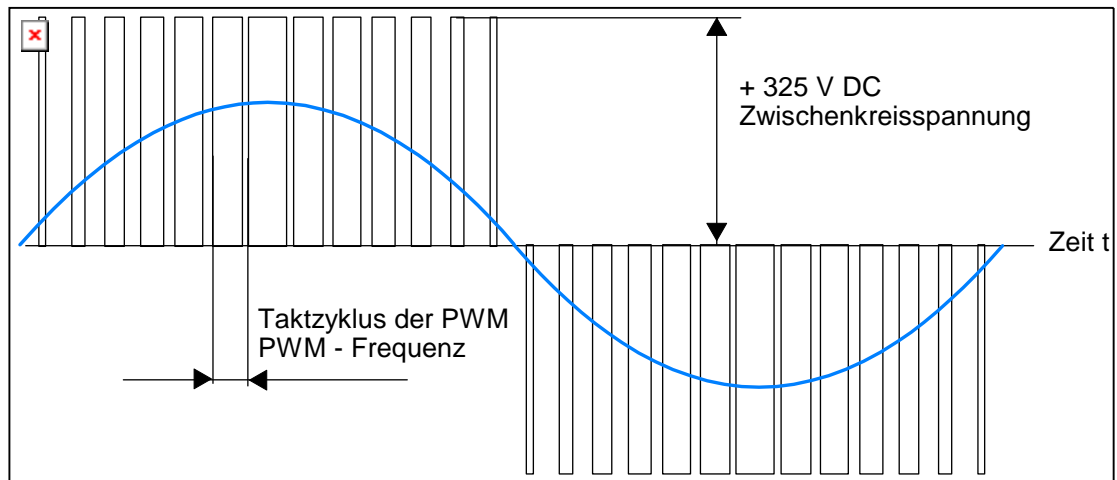


Fig 4. Sinusbewertete Pulsweitenmodulation einer Phase beim Frequenzumformer.

Bei der Steuerung für brushless DC Motoren jedoch wird die Zwischenkreisspannung nur an die beiden Wicklungen angelegt, die momentan den höchsten induzierten Spannungswert aufweisen. Die dritte Wicklung bleibt offen. Ein Strom fließt also nur durch zwei der sechs Leistungshalbleiter. Bei der Kommutierung (schalten eines Hallsensors) wird nur ein Leistungstransistor ausgeschaltet und ein anderer, nicht im selben Brückenweig liegend, eingeschaltet. Die Controllerlogik setzt die Hallsignale nach einem festgelegten Muster in die entsprechenden Ansteuersignale für die Leistungshalbleiter um. Innerhalb eines Kommutierungsblockes muss nur, der im Strompfad liegende Low-Side IGBT mit einer PWM betrieben werden, wenn Drehzahlsteuerung oder Regelung gewünscht wird. Es ist verständlich, dass diese Steuerungen weniger elektromagnetische Störungen und Schaltverluste verursachen.

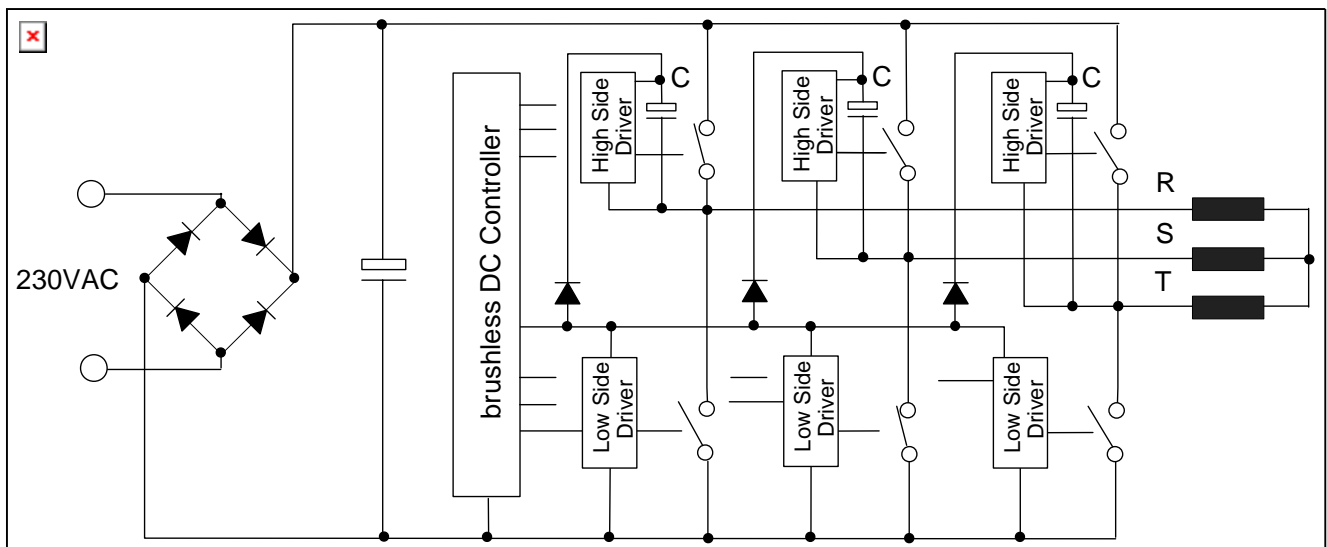


Fig5. Blockschaftbild einer brushless Steuerung. Stromfluss durch Phase RS.

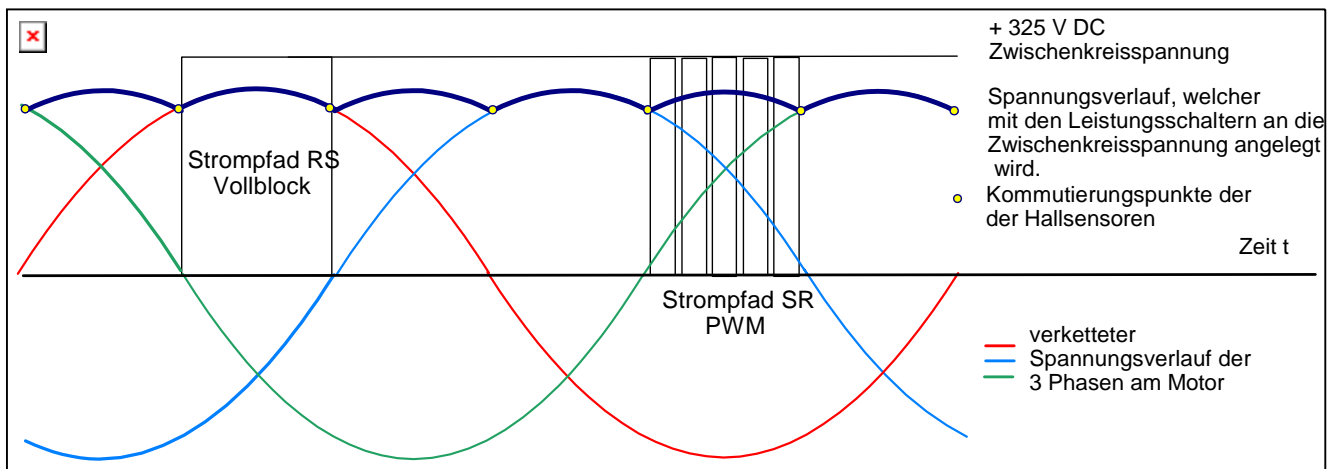


Fig6. Spannungsverläufe der brushless DC Steuerung

Das Laden der Spannungsversorgung aller High-Side Treiber durch die Bootstrap Dioden, wird nicht automatisch, wie beim Frequenzwandler durch eine feste Taktfrequenz, gewährleistet. Mehraufwand in der Controllerlogik muss, durch regelmässige Schaltvorgänge der IGBT's, die Spannungsversorgung der High-Side Treiber sicherstellen.

Eine effiziente Spannungsversorgung der Controllerlogik setzt aber den Einsatz eines DC/DC Wandlers voraus. Dieser DC/DC Wandler besteht, unter anderem, aus einem kleinen Hochfrequenztrafo der die Zwischenkreisspannung in eine gleichgerichtete Kleinspannung umsetzt. Da sekundärseitig nur wenige Windungen nötig sind macht es durch aus Sinn noch drei zusätzliche, galvanisch getrennt Wicklungen für die Versorgung der High-Side Treiber, im Hochfrequenztrafo unterzubringen. Durch diese Massnahme reduziert sich der Aufwand beim brushless Controller, welcher in der einfachsten Form die Hallsignale in die Ansteuerungssignale für die Leistungshalbleiter umsetzen muss.

Controllerteil

Zur Lösung der Steuerung- und Regelungsaufgabe für brushless DC Motoren wurden Standard - Microcontroller mit integrierten Schaltungen verglichen, die speziell für Motoren entwickelt wurden.

Standard-Microcontroller mit geeigneter Funktionalität

Dazu zählen Controller, die zur 8051 Architektur kompatibel sind, wie die C500 Familie von *Infineon*, oder *Motorola-Controller* [4] aus der 68HC08 Reihe, wie der Baustein MR16. Der Vorteil besteht in der Verfügbarkeit und in der Freiheit der Funktionen, welche durch die Software festgelegt werden. Der Aufwand an externen Bauteilen ist gering, da die Software alle nötigen Funktionen abdecken kann, wie die Umsetzung der Hallsignale in die Ansteuerungssignale für die Treiber, Logikteil für die Drehrichtungsumkehr mit Hoch- und Tieflauframpe, Drehzahlverstellung durch bestehende PWM Funktion im Controller, Abfrage der Bedienungselemente mit den zugehörigen Sicherheitsabfragen, einlesen der Temperaturfühler und des Sollwertpotentiometers über AD/Wandler. Die Software kann in einen internen Flash Speicher abgelegt werden. Ebenfalls sind Microcontroller mit einem Bussystem erhältlich (CAN).

Spezialisierte Bausteine für die Steuerung und Regelung von Motoren.

International Rectifier bietet mit dem IRMCK203 (High Performance sensorless Motion Control) [5] einen neuen Controllerbaustein an, der brushless Motoren ohne Hallsensoren betreiben kann. Verlockend an dieser Technik ist, dass der Prozessschritt des Positionierens der Hallsensoren bei der Fertigung entfällt.

Aufzuführen sind *STMicroelectronics* [6] und *Toshiba* [7], die interessante Produkte zur Steuerung und Regelungen von Motoren anbietet.

Ein häufig verwendeter Baustein ist der MC 33035 [8] von *Motorola*. Dieses IC ist vollständig in Hardware realisiert und in seiner Anwendung unproblematisch.

Beim Studium der Datenblätter hat sich gezeigt, dass für die Einarbeitung zum Erlernen eines modernen Mikroprozessors zuviel Zeit benötigt würde, die eventuell einen termingerechten Abschluss der ersten Phase des Projektes gefährden könnte. Deshalb wurde der bekannte brushless Motor Controller Baustein MC33035 zur Steuerung und Regelung des Funktionsmusters des Integral-Sparmotors verwendet.

Kommutierung

Wie in Fig6 gezeigt, müssen die Leistungstransistoren in dem Zeitpunkt geschaltet (kommutiert) werden, in dem der Betrag von zwei verketteten Phasenspannungen gleich gross ist. Die Kommutierungssignale können von Hallsensoren, einem Encoder oder aus der induzierten Spannung der Wicklung selber, abgeleitet werden.

Hallsensoren

Eine einfache und bewährte Lösung bieten drei Hallsensoren, die direkt das Magnetfeld des Rotors oder ein zusätzliches, auf der Welle angebrachtes Magnetrad abtasten. Der Vorteil der Hallsensoren liegt darin, dass die Lage des Rotors jederzeit, auch in Stillstand, bekannt ist. Ebenfalls sind Hallsensoren preiswerte Bauteile (ca 0.50 CHF pro Stk). Nachteilig ist, dass die Position der Hallsensoren im Bezug zum Stator oder zum zusätzlichen Magnetrad, exakt eingehalten werden muss. Deshalb sind bei der Fertigung zusätzliche Prozessschritte nötig. Wird die Position der Hallsensoren nicht eingehalten, steigt der Aufnahme Strom des Motors durch Oberwellen an. Ebenfalls erhöhen sich die Geräusche.

Encoder

Motoren für Positionierungsaufgaben in der Automatisierung sind mit einem Encoder ausgerüstet. Mit diesem Element wird eine hohe Auflösung innerhalb einer Umdrehung der Welle erreicht. Unterschieden wird zwischen einem optischen oder magnetischen Leseverfahren. Optische Encoder bestehen aus einer Scheibe mit Markierungen, die mit optischen Bauelementen abgetastet werden. Nachteilig beim optischen Encoder mit Laserdioden sind der Preis und die Verschmutzungsgefahr durch Kugellagerfett. Ein interessanter Baustein, als Beispiel für einen magnetischen Encoder, ist der AS5040 [9]. Über seiner Oberfläche rotiert das freie Ende der Motorenwelle. Eine Bohrung im Zentrum der Welle nimmt einen kleinen Magneten auf, dessen Feld durch eine integrierte Matrix aus Hallsensoren im AS5040 ausgewertet wird. Dieser magnetische Encoder kann den absoluten Drehwinkel der Welle mit einer Auflösung von 0.35° in der Form eines seriellen Ausgangssignals liefern. Die Vorteile sind, ca 1/3 der Kosten eines optischen Encoders mit Laserdioden und keine Verschmutzungsgefahr. Nachteilig sind die engen Toleranzen, die bei der Positionierung zur Wellenachse eingehalten werden müssen. Encoder sind teurer als Lösungen mit drei Hallsensoren.

Sensorlose Kommutierung

Bei der Steuerung von brushless Motoren sind nur zwei Phasen bestromt. Aus dem Verlauf der induzierten Spannungskurve in der dritten Phase, kann der Zeitpunkt der nächsten Kommutierung bestimmt werden. Da im Stillstand des Motors auch keine Spannung in den Wicklungen induziert wird, liegt die Problematik bei der sensorlosen Kommutierung beim Anfahren unter Last und bei niedrigen Drehzahlen. Vorteilhaft ist das Wegfallen des Prozessschrittes zum positionieren bei der Fertigung. Für den Integral-Sparmotor zum betreiben von Ventilatoren kann die sensorlose Kommutierung interessant sein.

Für das erste Funktionsmuster des Integral-Sparmotors sind drei Hallsensoren für die Ableitung der Kommutierungssignale gewählt worden. Beim Einsatz eines IEC Normgehäuses wirkt sich ein freies Wellenende für die Montage eines Encoders nachteilig aus. Bei der sensorlosen Technik bestehen bei uns nur theoretische Grundlagen.

Bau des Funktionsmusters

Elektronik

In einem ersten Aufbau wurde die Elektronik (Bild1) mit den zugehörigen Funktionsblöcken aufgebaut. Als Antrieb stand der Motor aus dem ersten Auftrag des BFE zur Verfügung. Eine bestehende Schaltung (Bildmitte) setzte die Signale der Hallsensoren in die Ansteuerungssignale für den Leistungsbaustein um. Aus Sicherheitsgründen beim experimentieren ist der Kleinspannungsteil galvanisch vom Netz getrennt. Die Speisung erfolgte über eine zusätzliche Wicklung des HF Trafos (violette Leitungen). Die Ansteuerung zum Leistungsbaustein ist über Optokoppler getrennt. Der verwendete Leistungsbaustein ist zwischen dem Lochprint und einer Aluminium Platte, zur besseren Kühlung, montiert. Auf der Aluminiumplatte sind, ein Filter, der Zwischenkreiskondensator, ein Gleichrichter und die Elektronik des DC/DC Wandlers angebracht.

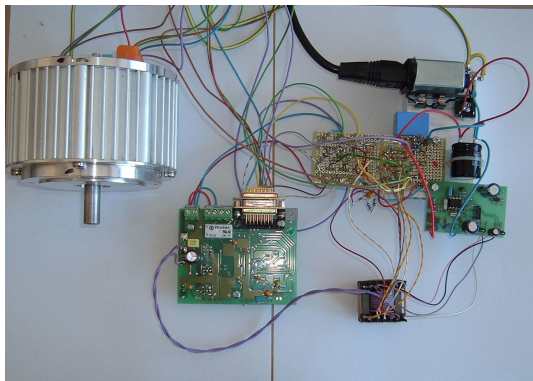


Bild1. Erster Aufbau der Elektronik

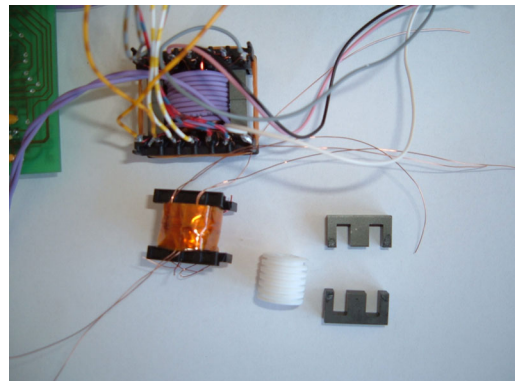


Bild2. Varianten HF Trafo

Zwei Varianten zum Laden des Glättungskondensators im Gleichspannungszwischenkreis wurden untersucht.

Variante 1:

Ein Vorladewiderstand lädt mit definiertem Strom den Glättungskondensator auf. Nach dem Ladevorgang überbrückt ein Halbleiterelement (Power FET) den Vorladewiderstand. Die Gate- Spannung zum einschalten des FET würde von einer galvanisch getrennten Wicklung des DC/DC Wandlers erzeugt. Die Einschaltwiderstände der untersuchten Power FET's sind:

$$BUZ\ 80\ 800V\ R_{ds_on} = 40\Omega \quad BUZ\ 42\ 500V\ R_{ds_on} = 2\ \Omega$$

$$IRF\ 840\ 500V\ R_{ds_on} = 0.85\ \Omega$$

Bei der Annahme eines mittleren Einschaltwiderstandes eines Power FET von 1 Ohm ergibt sich beim Nennstrom von 1 A ein Leistungsverbrauch von 1 Watt am Halbleiter.

Variante 2:

Der Vorladewiderstand wird auf konventionelle Art mit einem Relaiskontakt überbrückt. Die Verluste entstehen beim Relais nicht im Kontakt, sondern in der Wicklung des Elektromagneten. Beim verwendeten Print-Relais beträgt der Spulenverlust 200mW.

Die Wahl, unter Einbezug des Energieverbrauches fiel auf das Relais, auch deshalb weil die Kosten der untersuchten Bauteile etwa im gleichen Preisrahmen liegen. Da die Schaltbelastung des Relaiskontaktes bei Wechselstrom wesentlich höher liegt, wird die Vorladeschaltung vor dem Gleichrichter angeordnet.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des ersten Aufbaus ist das Gesamtschema, die Stückliste und das Print-Layout erstellt worden. Beim ersten Layout hat sich gezeigt, dass der Platz für die Anordnung des Leistungs- und Controllerteils auf einer Printplatte nicht reichte. Der Grund des Platzmangels waren die einzuhaltenden Spannungsabstände beim den Zwischenkreiskomponenten. Das realisierte Layout besteht aus einem Leistungsprint, der mit bedrahteten Komponenten ausgeführt ist. Dieser Print nimmt alle Komponenten des Zwischenkreises und des DC/DC Wandler auf. Der Aufbau des Leistungsprints entspricht von der Art der Bauteile und der Fertigung, dem von geschalteten Netzteilen. Deshalb ist ein Preisvergleich mit geschalteten Netzteilen durchaus zulässig. Die Komponenten, die Wärme erzeugen sind auf die Unterseite des Leistungsprints gelötet und mit einer Aluminiumplatte verschraubt. Diese Platte ist zwischen

dem hinteren Flansch und dem Gehäuse (siehe Fig1) eingeklemmt. Der Wärmeübergangswiderstand beträgt 0.1K/W. Somit ist der Aluplate mit genügender Wärmeableitung mit dem hinteren Flansch verbunden, welcher durch den Ventilator des Motors mit Kühlluft versorgt wird. Die Schutzart IP55 des Motors entspricht auch der Schutzart der Elektronik.



Bild3. Elektronik zum Funktionsmuster mit Leistungs- und Controllerprint.

Der Controllerprint ist steckbar über dem Leistungsprint angeordnet und mit einem Distanzbolzen verschraubt. Alle Bauteile auf dem Controllerprint sind in SMD Technik ausgeführt und können automatisch bestückt werden. Das Potentiometer zur Drehzahlverstellung ist über ein abgeschirmtes Kabel im Klemmenkasten montiert. Die Motorenwelle ist zentrisch durch beide Prints durchgeführt und trägt eine 8 polige Magnetscheibe, die von drei Hallensoren, auf dem Controllerprint montiert, abgetastet wird. Diese Konstruktionsweise hat sich als nicht brauchbar erwiesen, weil der Durchmesser mit 30mm der Magnetscheibe zu klein gewählt worden ist. Nach mehreren fehlgeschlagenen Versuchen, die Hallensoren mit genügender Genauigkeit zu Positionieren, wurde das Problem mit einem Zwischenring und drei Aufnahmehülsen für die Hallensoren gelöst. Bei der neuen Lösung tasten die Hallensoren die Magnete des Rotors ab. Die Magnetscheibe entfällt. Da sich die Hallensoren auf einem wesentlich grösseren Durchmesser befinden, wurde die nötige Genauigkeit problemlos erreicht.

Brushless DC Motoren mit Permanentmagnet-Rotoren weisen nicht nur einen grösseren Wirkungsgrad auf, wie vergleichbare Normmotoren, sondern auch höhere Anfahrmomente. Hohe Anfahrmomente sind bei automatischen Türen vorteilhaft. Ein namhafter Hersteller ist deshalb am Integral-Sparmotor interessiert. Das Funktionsmuster wurde mit einer zusätzlichen externen Steuerungselektronik ausgerüstet, die Fahrprofile von Türen simuliert. Der steckbare Controllerprint wird durch einen Print (Bild4) mit galvanischer Trennung ersetzt. Die galvanisch getrennten Hall- und Ansteuersignale der Leistungshalbleiter sind auf eine DIN Buchse am Klemmenkasten des Motors geführt. Zukünftig kann, ohne Gefahr eines elektrischen Schlages, eine Prozessorkarte (Bild 5) an die DIN Buchse angeschlossen werden. Mit der Prozessorkarte soll gezeigt werden, dass der Integral-Sparmotor auch als Servomotor eingesetzt werden kann, wobei auch eine Anbindung an ein Bussystem (Gebäudeautomatisation) möglich ist.

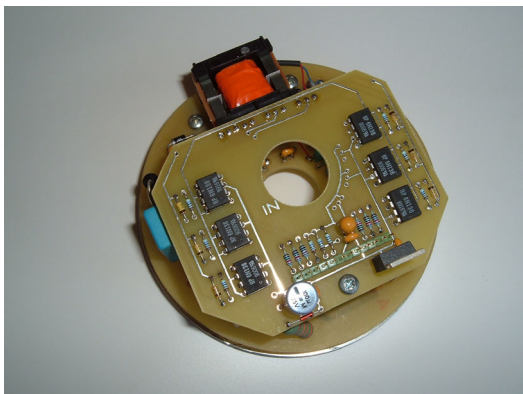


Bild4. Leistungsprint galvanisch getrennt.



Bild5. Prozessorkarte

Bau des Stators und des Rotors

Die Bleche zum Aufbau des Stators wurden von einer spezialisierten Firma lasergeschnitten. Mit 2.5W/kg bei 1.5 Tesla wurde verlustarmes Blech verwendet. Ein Industriepartner investierte in eine Werkzeugform für verbesserte Spulenkörper. Der Stator wurde mit den neuen Spulenkörpern bestückt und mit einer Spezial-Wickelmaschine gewickelt.

Mit dieser Technologie wird zwischen den Wicklungen jeder Phase ein Abstand vom mindestens 2mm erreicht. Vorteilhaft sind die hohe Spannungsfestigkeit, die tiefen Kapazitäten zwischen den Wicklungen. Mit einer Vergussmasse (Wärmeklasse F) wurde der Stator in das IEC Normgehäuse (Bild 6) eingegossen. Der Wärmeübergangswiderstand zwischen der Wicklung und dem Gehäuse beträgt 0.25 K/W.

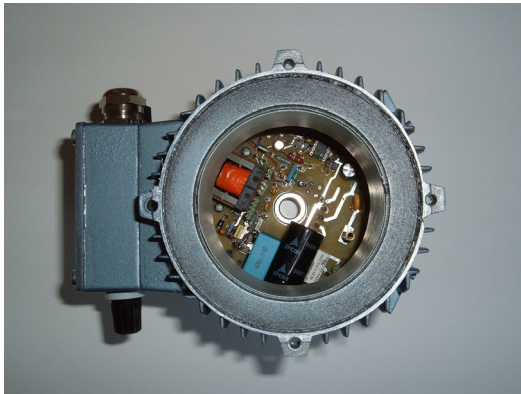


Bild6. Stator im Normgehäuse eingegossen

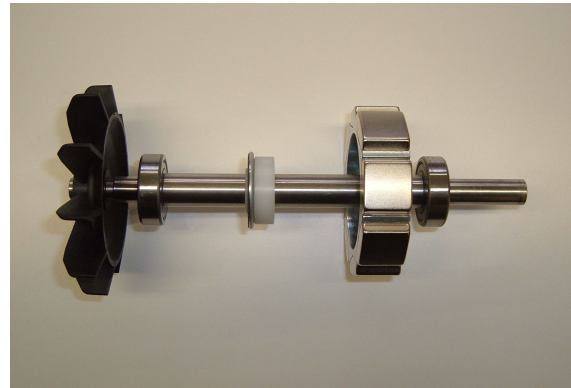


Bild7 Rotor mit Welle, Lager und Ventilator

Da der Rotor (Bild 7) keinem magnetischen Wechselfeld unterworfen ist, wurde er mit einem CNC Bearbeitungszentrum aus Vollmaterial gefertigt. Zur Reduktion des Massenträgheitsmomentes wurde das Volumen im Innern des Rotors reduziert. Die Magnete sind in passende Vertiefungen am Aussenumfang des Rotors eingeleimt. Die seitlichen Flächen der Vertiefungen sind so geformt, dass die Magnete gegen die Fliehkräfte gesichert sind.



Bild8. Fertig zusammengebautes Funktionsmuster des Integral-Sparmotors



Bild9. Integral-Sparmotor mit Bremse

Um das Verhalten unter Last zu testen, ist das Funktionsmuster, über eine flexible Wellenkupplung und einem Flansch, mit einer Bremse verbunden. Ursprünglich war diese Anordnung auch für Dauertests unter Last vorgesehen. Bei der Auslegung blieb unberücksichtigt, dass die Bremse die Abgabeleistung des Motors in Wärme umsetzt und somit die Testanlage unzulässig erwärmt. Eine geeignete Last, wie ein Generator, Ventilator ist noch zu beschaffen.

Gewichtvergleich (beide Motoren mit ALU-Flansch ausgeführt)

	Integral Sparmotor	Normmotor Nr1
Gesamtgewicht	2760	3880
Rotor mit Welle ohne Lager	615	690
Stator komplett	610	1890
Kupfer	195	410
Eisen	175	1480
Vergussmasse	240	
Elektronik mit Alu Platte	235	
Gehäuse mit Aluflansch	1300	1300

Für den Integral-Sparmotor werden rund 200g Kupfer und 1300g Statoreisen weniger benötigt.

Leistungs- und Wirkungsgradmessungen

Die elektrische Aufnahmeleistung wurde mit der Strom- und Spannungsmessung am Gleichstromzwischenkreis bestimmt. Verwendet wurden True RMS Multimeter (Metra Hit 18s). Das Voltmeter wurde direkt am Zwischenkreis angeschlossen. Die Strommessung erfolgte direkt im Strompfad des DC/DC Wandlers oder des Leistungsbausteines. Die Leistung des Gleichrichters wurde durch Multiplikation des gemessenen Stromes * die zweifache Durchlassspannung der Dioden (1.4V) bestimmt. Im weiteren diente der Prüfstand der Fachhochschule Luzern für die Drehmoment- und Drehzahlmessung, mit der gleichen Messanordnung, wie im ersten Auftrag „ Energiesparmotor“.

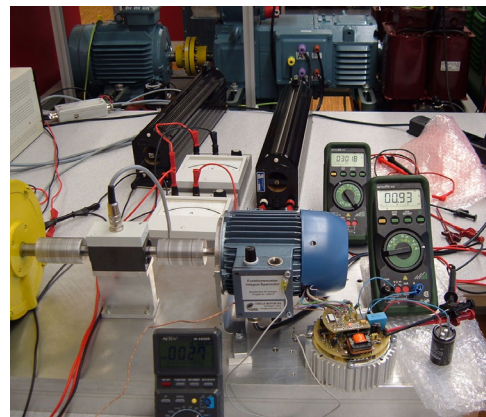
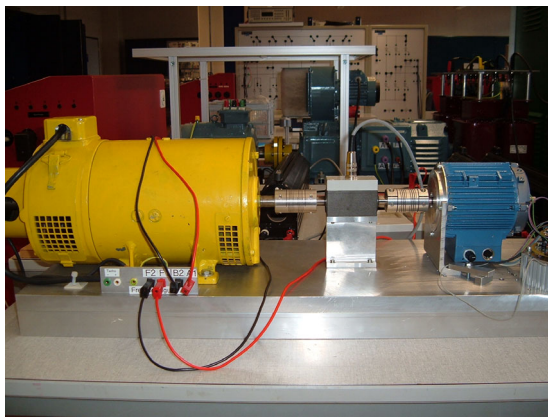


Bild 12/13 Messungen an der Hochschule für Technik+Architektur Luzern

Messresultate und Auswertung

Leistungsbedarf des DC/DC Wandlers

	Strombedarf [mA]	Spannung [V]	Leistung [W]
Speisung UC 3842	15	13.5	0.20
Speisung UC 3842 von Zwischenkreis	2	300	0.60
Speisung Controllerprint	16	20	0.32
Relais	24	20	0.48
Speisung für Leistungbaustein	6	20	0.12
Speisung 3*High Side Treiber	1	22	0.07
Leistungsbedarf Sekundärseite			1.79
Eingangsleistung auf der Primärseite	18	318	5.72
Wirkungsgrad des DC/DC Wandlers			31%

Aufnahmeleistung in Watt des Integral-Sparmotors im Leerlauf

Drehzahl [U/min]	Ohne Ventilator	mit Ventilator	mit Ventilator und Wandler	Motor aus erstem Auftrag ohne Ventilator	Differenz der Eisenverluste
1071	1	2	8	5	4
1500	3	5	10	7	4
1875	5	7	13	10	5
2143	6	9	15	12	6
2500	8	12	17	15	8
3000	10	16	21	20	10
3333	12	18	24	23	11

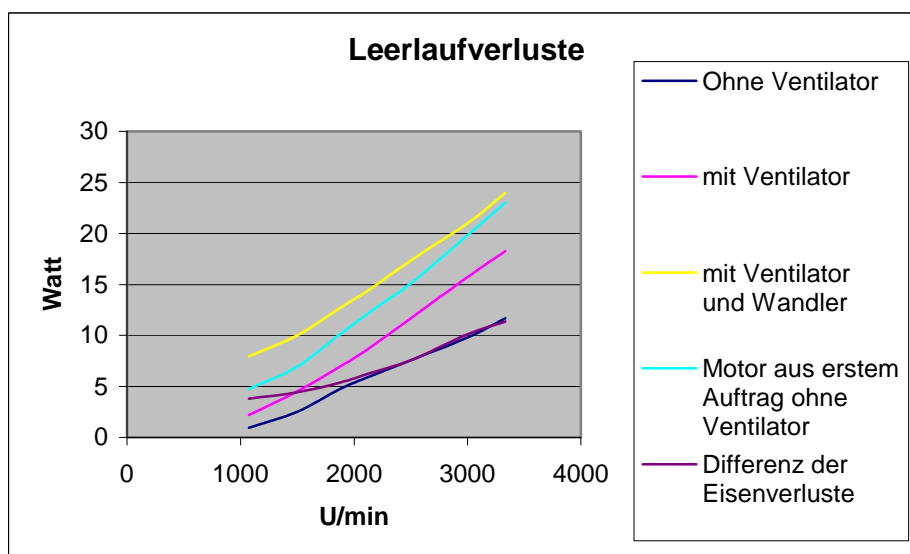


Diagramm 1 zeigt die Leerlaufverluste.

Das verwendete Stator-Eisen des Motors im ersten Auftrag hat mit 8W/kg bei 1.5 Tesla eine relativ hohe Verlustziffer. Das verwendete Stator-Eisen des Funktionsmusters hat mit 2.35W/kg bei 1.5 Tesla etwa 2/3 weniger Verluste. Die Rotor/Stator Geometrie und die Windungszahl des Motors aus dem ersten Auftrag und des Funktionsmusters sind gleich. Die Differenz der Eisenverluste betragen 10 W, bei der Messung ohne Ventilator und bei Nenndrehzahl. Damit lassen sich die Verluste des Stator-Eisens beim Funktionsmuster mit nur 5 Watt bestimmen. Nach dem Einlaufen reduzierte sich die Reibung der Kugellager um 1Watt.

Zusammenstellung der Leerlaufverluste in Watt des Integral-Sparmotors bei Nennlast und 3000 U/min

Leistung DC/DC Wandler	6 W
Verluste Ventilator	6 W
Kugellager, Luftreibung zwischen Rotor und Stator, magn Streufelder	5 W
Verluste im Statoreisen	5 W

Wirkungsgrad des Integral-Sparmotors mit Ventilator, Elektronik im PWM Betrieb

Drehzahl [U/min]	el.Aufnahme- leistung [W]	Wellen- leistung [W]	Wellenleistung/ Nennleistung [%]	Drehmoment [Nm]	Wirkungsgrad [%]
2850	99	76	30	0.26	77
2850	157	122	49	0.41	78
2850	208	164	66	0.55	79
2850	249	194	78	0.65	78
2850	293	225	90	0.76	77
2850	330	251	100	0.84	76

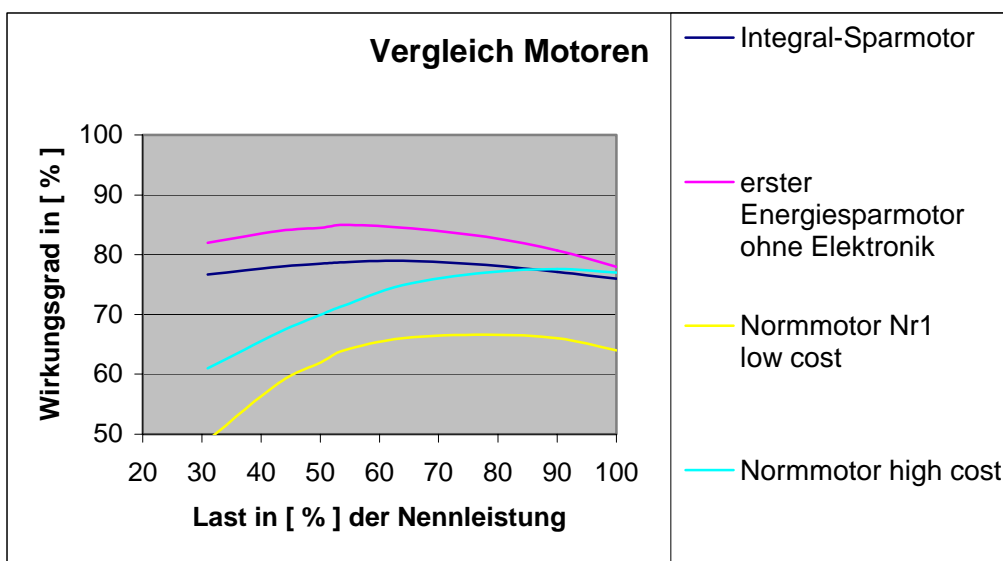


Diagramm 2: Vergleich der Motoren aus den BFE Projekten.

Das Funktionsmuster hat, wie erwartet einen reduzierten Wirkungsgrad gegenüber dem ersten Prototypen des Energiesparmotors. Bei den Messungen des ersten Prototypen sind die Ventilationsverluste und die Verluste der Elektronik nicht in die Berechnungen des Wirkungsgrades eingeflossen.

Die Verluste durch Ventilation, Lagerreibung, der unbelasteten Elektronik bleiben über den ganzen Lastbereich konstant. Der Einfluss dieser Verluste auf den Wirkungsgrad des Funktionsmusters zeigt sich vor allem im tieferen Lastbereich, bei dem die Wellenleistung absolut gesehen noch kleine Werte aufweist.

Bei Nennlast stehen die ohmschen Verluste in der Wicklung und die Schaltverluste der Pulsweitenmodulation (PWM) im Vordergrund. Mit 2% Wirkungsgradverlust bei Nennlast, zwischen dem ersten Prototypen Energiesparmotor und den Funktionsmuster, ist dieser Unterschied kleiner als erwartet. Der erste Prototyp Energiesparmotor wurde nicht mit PWM betrieben, sondern im Vollblockbetrieb. Sein Stator-Eisen wies die dreifachen Verluste gegenüber dem Funktionsmuster auf. Bemerkenswert ist, dass durch den Einsatz des verlustarmen Blechs, die Verluste des DC/DC Wandlers und des Ventilators kompensiert werden konnten. Die Leerlaufverluste betragen bei beiden Motoren etwa 22W. Aufgefallen beim Funktionsmuster ist die Verlustleistung von 79W bei Nennlast. Die Leerlaufverluste betragen 22 Watt. Die Kupferverluste der Wicklung würden etwa 20 W ($1.08A^2 \cdot 150\Omega$) betragen, wenn die Wicklung mit absolut geglättetem Gleichstrom durchflossen würde. Erfahrungsgemäss liegen die Schaltverluste der Leistungshalbleiter ebenfalls in dieser Grössenordnung. Aus der Summe der Verluste ist ersichtlich, dass noch etwa 20 W Verlustleistung nicht zugeordnet werden können.

Diese Verluste könnten in den Oberwellen, erzeugt durch die Welligkeit der Zwischenkreisspannung begründet sein oder durch mechanische Verlustleistung durch Vibrationen des Funktionsmusters auf dem Prüfstand. Durch die Bearbeitung des IEC Gehäuses des Funktionsmusters gab es einen Fluchtungsfehler zwischen der Welle und den Flansch, was Vibrationen auf dem Prüfstand erzeugte. Diese Vibrationsverluste entstehen vor der Drehmomenten-Messwelle und reduzieren fälschlicherweise den Wirkungsgrad.

Die Verluste des DC/DC Wandler können noch um 2-3 Watt verringert werden.

Temperaturen bei Dauerbetrieb mit Ventilator

Im Leerlauf bei 1500 und 3000 U/min wurde keine merkliche Temperaturerhöhung festgestellt. Die Temperaturerhöhung bei Nennlast betrug 11K. (gemessen mit Metex Multimeter M-3850D mit Thermoelement)

Kosten

Der Aufwand der mechanischen Teile des Funktionsmusters, wie Gehäuse, Kugellager, Welle, Ventilator, Rotor ohne Magnete, gewickelter Stator, Montage, Test sind vergleichbar mit dem Normmotor Nr1 Baugrösse IEC 63. Dieser Motor kostete beim Bezug von einem Stück CHF 91.-

Die Kosten für die Magnete betragen CHF 10.-

Der Aufbau der Elektronik entspricht, von der Art der Bauteile und der Fertigung, dem von geschalteten Netzteilen. Deshalb ist ein Preisvergleich mit geschalteten Netzteilen durchaus zulässig. Die Kosten, gemäss einer eingeholten Offerte betragen etwa CHF 40.-

Für den Mehraufwand des Leistungsbausteines und des Filters sind 30.- CHF zu rechnen.

Der Verkaufspreis eines 250 Watt Integral-Sparmotors mit IEC 63 Gehäuse würde, bei vergleichbarer Fertigung unter CHF 200.- liegen !

Standortbestimmung zur elektromagnetischen Verträglichkeit EMV

- Ist die Elektronik zum Integral-Sparmotor grundsätzlich entstörbar? Da bei der brushless DC Steuerung nur ein Leistungstransistor durch die Pulsweitenmodulation getaktet wird, müsste die Energie der Störungen geringer sein als bei der Elektronik eines Frequenzumformers.
- Wie verhält sich der Störpegel zwischen PWM und Vollblockkommutierung?
- Wie ist das Spektrum der Störungen, die durch den DC/DC Wandler erzeugt werden? Der Wandler taktet bei 25 kHz.

Als Grundlage der Standortbestimmung dienen die leitungsgebundenen Störungen nach der Norm EN 55011 Kl. A. Die blauen Kurven in den Diagrammen 3-6 stellen die Spitzenwerte dar. Mit diesem Spitzenwertverfahren können die Messungen schneller durchgeführt werden. Zur Einhaltung der Norm darf die rote Grenzlinie (Quasi Peak) und orange Grenzlinie (Mittelwert) nicht überschritten werden. Werden die Grenzlinien überschritten, müssen in diesem Bereich die Quasi Peak und Mittelwerte gemessen werden, wie in Diagramm 3 bei der letzten Tabelle durchgeführt. Diagramm 3 zeigt den Störverlauf des DC/DC Wandlers im Stillstand des Motors. Die Störungen sind grösser als erwartet. Der Wirkungsgrad des DC/DC Wandler beträgt nur 31%, was auf ein Schwingungsverhalten mit entsprechendem Energieverbrauch und Störungen verbunden ist. In einem zukünftigen Schritt müssen diese Ursache ergründet werden. Durch die Pulsweitenmodulation des Leistungsteils (Diagramm 4) steigen die Störungen im Leerlauf des Motors an. Bei einer PWM mit 40 % Last (Diagramm 5) erhöhen sich die Störungen um etwa 5 dB Fig. Bei 60 % Last ohne PWM (Diagramm 6) sinkt der Störpegel ab einigen 100 kHz um etwa 5 dB.

Die EMV Messungen haben gezeigt, dass der DC/DC Wandler einen grösseren Einfluss auf den Störpegel aufweist, als erwartet. Die Unterschiede des Störverlaufes zwischen Leerlauf, Last mit PWM, Last bei Vollblock sind geringer als erwartet. Es ist somit anzunehmen, dass Taktfrequenzen für den Betrieb von brushless DC Motoren im Frequenzbereich unter 10 KHz die Störungen nicht wesentlich erhöhen. Die Messungen wurden im EMV Labor der Firma *Montana emc SA* von Herrn O.Dzamko durchgeführt. Dank der Beratung von Herr Dzamko entstand ein Vorschlag (Fig7) eines EMV Filters, aufgebaut auf einer Printplatte im Klemmenkasten des Motors.

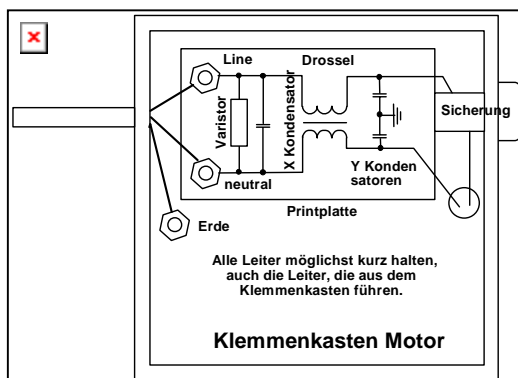


Fig7. EMV Filter im Klemmenkasten

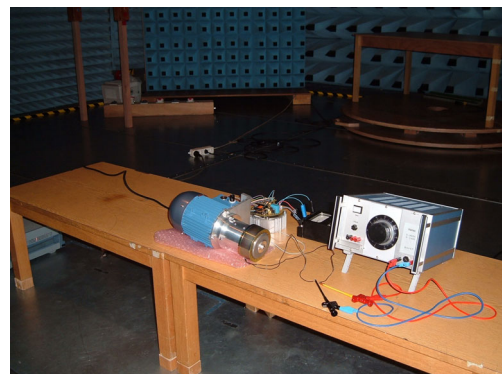


Bild14. EMV Messungen

Measurement Type : Voltage Interference
 Supply : Neutral
 Other :



Equipment Under Test : Integral-Sparmotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : Nur DC/DC-Wandler
 Remarks :

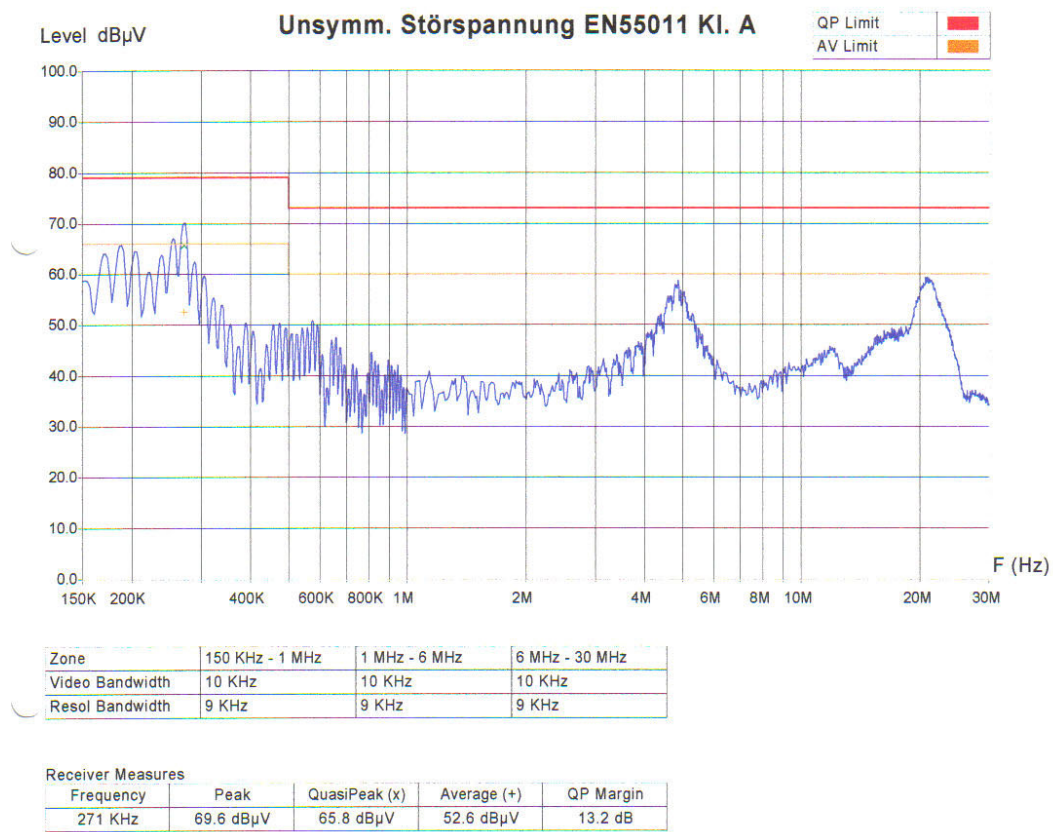


Diagramm3. Störverlauf des DC/DC Wandlers

Measurement Type : Voltage Interference
 Supply : Line 1
 Other :



Equipment Under Test : Integral-Sparmotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : Leerlauf 3000 rpm
 Remarks :

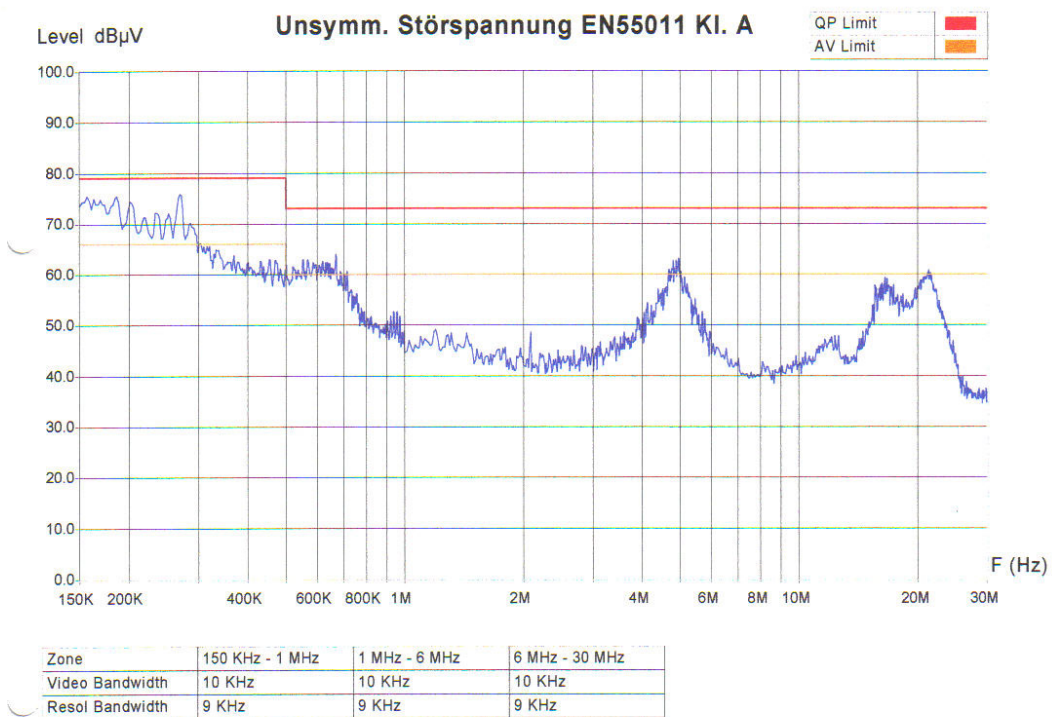


Diagramm 4. Störpegel im Leerlauf des Motors bei 3000 U/min mit PWM

Measurement Type : Voltage Interference
 Supply : Neutral
 Other :



Equipment Under Test : Integral-Spasmotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : PWM 40% last
 Remarks :

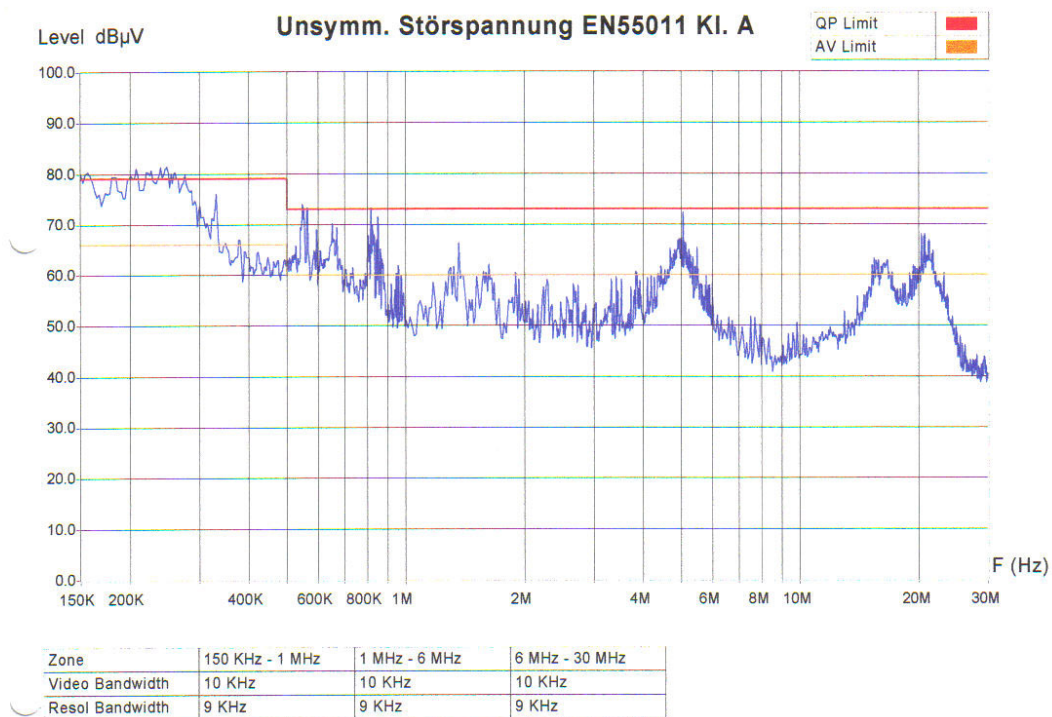


Diagramm5. Motor 40 % belastet mit PWM

Measurement Type : Voltage Interference
 Supply : Line 1
 Other :



Equipment Under Test : Integral-Sparmotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : Ohne PWM 70% last
 Remarks :

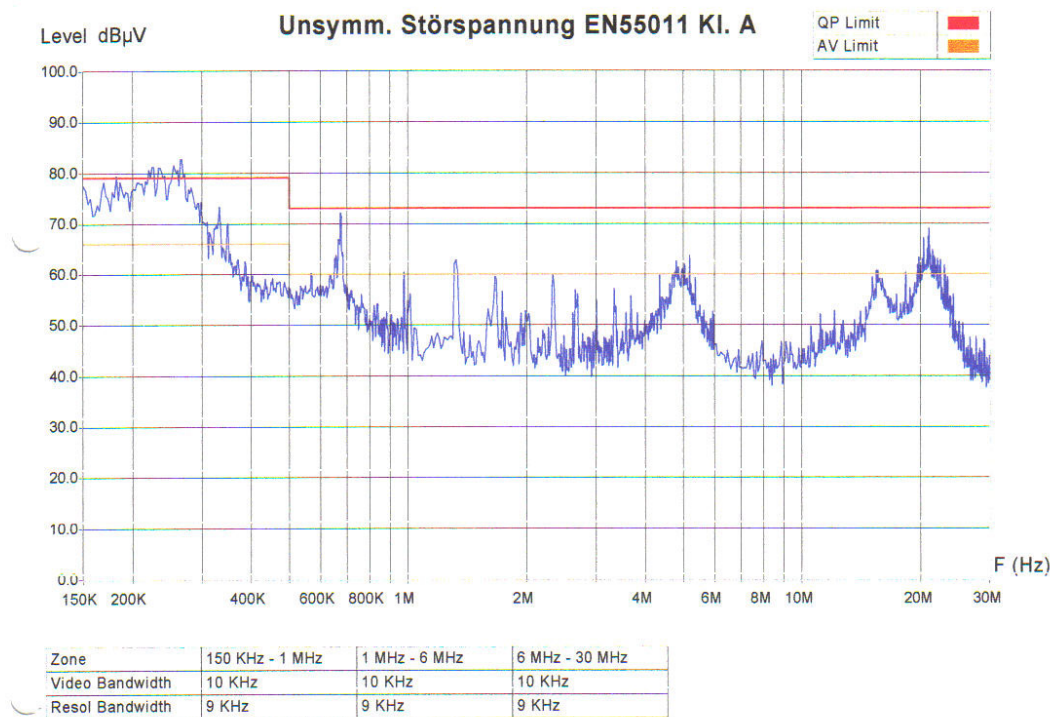


Diagramm6. Motor mit 70 % belastet ohne PWM (Vollblock)

Anhang

Im Anhang wird noch eine Pendenz aus dem zweiten Auftrag „Energiesparmotor“ behandelt:

- Wie wirkt sich eine Vergrösserung der Kupfermasse der Wicklung auf den Wirkungsgrad aus?

Beim Integral-Sparmotor wird mit dem zusätzlichen Kupfer eine Steigerung des Wirkungsgrades, durch Reduktion des ohmschen Widerstandes R_{cu} der Wicklung, angestrebt. Die Windungszahl und der Strom der Wicklung bleiben konstant. Das zusätzliche Kupfer dient somit zum vergrössern des Querschnittes des Wicklungsdrahtes.

Die Kupferverluste der Wicklung betragen: $P_{cu} = I^2_{konst} \cdot R_{cu}$

Der Mehraufwand der Kupfermasse lässt die Kupferverluste in der Wicklung proportional sinken.

Beim Funktionsmuster beträgt der Wirkungsgrad bei Nennlast 76%. Die Verluste des Kupfers mit geschätztem Anteil der Oberwellen betragen etwa 30W. Wäre es möglich, die Masse der Kupferwicklung bei gleichen geometrischen Verhältnissen zu verdoppeln, würde der Wirkungsgrad 80 % betragen. Eine doppelte Kupfermasse würde den Wirkungsgrad nur um 4% steigern.

Unterschiedlich wäre es, wenn das zusätzliche Kupfer zur Erhöhung des Drehmomentes verwendet würde. Da die Kühlleistung einer el. Maschine durch die Oberfläche, die Wärmeklasse und die Kühlungsart gegeben und somit konstant ist, muss der Strom erhöht und der Wicklungswiderstand reduziert werden.

Für die Erhöhung des Drehmomentes gilt: $P_{cu} = \text{konstant} = I^2 \cdot R_{cu}$

Ein verdoppeln des Drehmomentes bedeutet den doppelten Strom und somit eine Verringerung des Wicklungswiderstandes auf $\frac{1}{4}$ des ursprünglichen Wertes. Bei gleich bleibender Kühlleistung P_{cu} müsste also Kupfermasse vervierfacht werden!

Für das unterbringen von zusätzlichem Kupfer in der Wicklung bleibt, wenn die Baugrösse des Motors unverändert bleiben soll:

1. die Steigerung des Füllfaktors
2. Platz schaffen durch Nutzung des Stator

1) Als Füllfaktor wird die Ausnützung des für die Wicklung zu Verfügung stehenden Platzes, durch das Kupfer der Leiter bezeichnet. Bei Integral-Sparmotoren < 1kW ist die Windungszahl, bei verhältnismässig kleinen Leiterquerschnitten, gross. Die Wicklung muss deshalb mit Runddraht ausgeführt werden. Der Füllfaktor bei Integral-Sparmotoren < 1kW beträgt ca. 60% und kann aus Herstellungsgründen nicht durch die Verwendung von Profildraht gesteigert werden. Der Füllfaktor von 60% bezieht sich auf Wicklungen in Nuten und auf Luftspaltwicklungen. Die Ring-/Jochwicklung, die in der gebauten Ausführung zu den Luftspaltwicklungen gehört, ist bereits lagenweise gewickelt. Deshalb kann auch hier der Füllfaktor nicht gesteigert werden.

2) Durch das Nutzen des Stators wird für die Wicklung mehr Platz geschaffen. Bei Spulenwicklungen mit einer Spulenweite über mehrere Nuten, wie bei den Normmotoren üblich, entstehen ausserhalb des Blechpaketes auskragende Spulenköpfe (Bild 15/16). Die Länge des Kupferdrahtes einer Windung, die sich in der Nut befindet und einen Drehmomentanteil bildet, beträgt beim Normmotor Nr1, 40mm. Die mittlere Leiterlänge, die für die Verbindung im Spulenkopf nötig ist und an der Drehmomentbildung nicht beteiligt ist, misst 120mm. 350 Gramm Kupfer bilden die Spulenköpfe und 60 Gramm Kupfer sind in die Nuten verlegt.

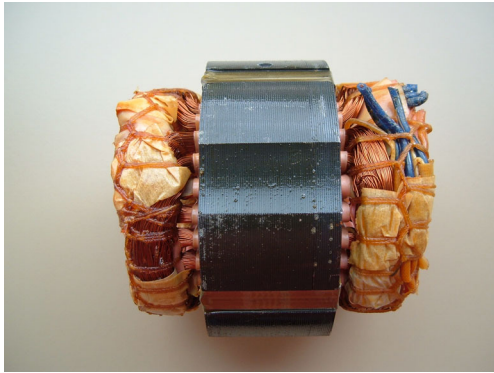


Bild 15/16. Seiten- und Frontansicht des Stators des Normmotor Nr 1.

Für den Vergleich des benötigten Kupfers zwischen dem Normmotor Nr 1 und dem Funktionsmuster sei auf Seite 13 hingewiesen.

Die Einzelzahnwicklung / Stabkernwicklung (Bild 17) verringert den passiven Teil der Spule, also die Wicklungsköpfe, die nur Widerstandsverluste bringen. Diese Wicklungsart erhöht den Wirkungsgrad. Statoren mit Einzelzahnwicklung sind ebenfalls für Integral-Sparmotoren geeignet, wie der zweite Auftrag „Energiesparmotor“ gezeigt hat.

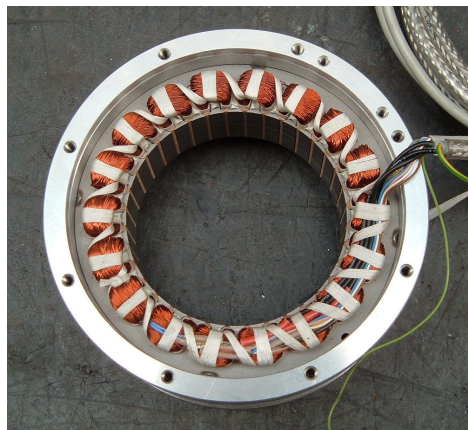


Bild 17. Stator mit Einzelzahnwicklung der Firma EMB in Biberach D.

Tiefere Nuten, die gegen die Achse des Motors laufen, könnten mehr Kupfer aufnehmen. Damit würde aber der Rotordurchmesser verkleinert. Die Erhöhung der Kupfermasse mit gleichzeitiger Verringerung des Rotordurchmessers wirken sich für eine Wirkungsgradsteigerung gegenläufig aus.

Unter Einbezug aller Aspekte ist die Geometrie der Jochwicklung, wie im Funktionsmuster realisiert und ein Stator mit einer Zahnwicklung für 250 W Motoren optimal ausgelegt.

Nationale Zusammenarbeit

Die Hochschule Technik+Architektur Luzern, das Labor für elektrische Maschinen stellte den Prüfstand für Lastmessungen zur Verfügung.

Internationale Zusammenarbeit

EMT Ingenieurbüro für Elektro-Maschinen-Technik GmbH, Herr Hans-Hubert Kreuzer, Theresienstrasse 1, 71384 Weinstadt-Grossheppach entwickelte einen verbesserten Spulenkörper für hochbewickelte Motoren und finanzierte das Spritzguss-Werkzeug.

EMB Elektromaschinenbau GmbH, Herr Markus Schmitz, Industriestrasse 32, D-88441 Mittelbiberach. Beratung zu el. Maschinen mit Zahnwicklung. Steigerung der aktiven Kupfermasse.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005/6

Ein ansprechendes Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors ist realisiert. Für ein erstes Funktionsmuster, unter Einbezug der zur Verfügung stehenden Zeit sind gute technische Daten erreicht worden. (Leerlaufverluste, Gesamtwirkungsgrad, Laufruhe, Abgabeleistung, Erwärmung). Aus Gründen der Vertraulichkeit sind mögliche Industriepartner in einem separaten Dokument aufgeführt. Der grösste Erfolg ist der zu erwartende Preis des 250W Integral-Sparmotors von unter 200 CHF pro Stück, bei optimalen Fertigungsbedingungen. Damit werden die vorgeschlagenen Integral-Sparmotoren zu ernsthaften Konkurrenten für Normmotoren, betrieben an Frequenzumformern im Leistungsbereich < 1kW. Diese Preisgestaltung ist mit eingeholten Offerten überprüft. Wichtige Erkenntnisse lieferte die genaue Zusammenstellung der Leerlaufverluste. Ersichtlich ist, dass bei einer zukünftigen Entwicklung der DC/DC Wandler optimiert werden muss. Ebenfalls soll durch die Auslegung des Ventilators die geeignete Kühlleistung gefunden werden. Etwa 20 Watt Verlustleistung konnten bei Nennlast keiner Verlustquelle zugeordnet werden. Das Resultat der genauen Untersuchung dieser Verlust könnte den Wirkungsgrad noch steigern. Geringer als erwartet war der Einfluss der Leistungsmin- derung durch die Pulsweitenmodulation. Die gemessene Erwärmung des Funktionsmusters lässt den Einbau der An- triebselektronik im Motor, mit vernünftiger Lebensdauer zu. Eine Standortbestimmung bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit hat zu einem Vorschlag eines verbesserten Filters, im Klemmenkasten des Motors, geführt. Der Trend der Halbleiterindustrie, immer kompaktere Bausteine für den Betrieb von Motoren anzubieten, hat sich bestätigt. Ein namhafter Halbleiterhersteller bietet einen Baustein an, der den Leistungs- und Steuerungsteil in einem Gehäuse vereint. Als Ausblick wird vorgeschlagen einen Integral-Sparmotor als Lüfter, mit diesem Baustein zu realisieren. Die beim Funktionsmuster gewählte Anordnung der Hallsensoren mit einem zusätzlichen Magnetrad auf der Welle hat nicht funktioniert. Der Durchmesser des Magnetrades war zu klein. Vorgeschlagen wird ein kleiner Print, welcher die Hallsen- soren trägt und auf dem Stator positioniert und montiert wird. Bei Motoren mit erhöhtem Luftspalt ist es möglich, direkt mit den Hallsensoren die Magnete des Rotors abzutasten.

Referenzen und Quellenverzeichnis

- [1] Erster Auftrag Energiesparmotor vom Bundesamt für Energie BFE.
<http://www.electricity-research.ch/pages/berichte/sb02-energiesparmotor-d.pdf>
<http://www.circlemotor.com>
- [2] Zweiter Auftrag Energiesparmotor vom Bundesamt für Energie BFE.
http://www.electricity-research.ch/pages/berichte/2004/sb04-energiesparmotor_1.4.pdf
- [3] Final Projekt Reports „Energiesparmotors“ des Institute of Technology Illinois
<http://www.energychallenge.org/IIT-Final-Report.pdf>

Links im Internet zu den Datenblättern der verwendeten Bauteile.

- [4] Microprozessor zum Steuern- und Regeln von Motoren
www.motorola.com/mcu
- [5] Baustein für sensorlose Steuerung von brushless DC Motoren
<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irmck203.pdf>
- [6] Anbieter von integrierten Bausteinen zum Steuern von Motoren
<http://www.st.com>
- [7] Leistungsbaustein von Toshiba
<http://www.ebv.com/en/>
- [8] Verwendeter Controller Baustein
<http://www.onsemi.com/site/products/summary/0,4450,MC33035,00.html>
- [9] Magnetischer Encoder in einem SMD Gehäuse
<http://www.austriamicrosystems.com/04segments/industry/AS5040.htm>

Quellenverzeichnis der Bilder:

CIRCLE MOTOR AG, Brüggliweg 18, CH-3073 Gümligen: Alle Figuren, Diagramme und Bilder 1-16

EMB Elektromaschinenbau GmbH, Industriestrasse 32, D-88441 Mittelbiberach.

Bild 17.