



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FUNKTIONSMUSTER EINES INTEGRAL – SPARMOTORS IM LEISTUNGSBEREICH KLEINER 1KW.

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Lindegger Markus, CIRCLE MOTOR AG
Tannackerstrasse 25, CH-3073 Gümligen,
info@circlemotor.ch, www.circlemotor.com



Impressum

Datum: 30. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

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

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, felix.frey@bfe.admin.ch

BFE-Projektnummer: 100915

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

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Resumé	2
Abstract	2
1. Ausgangslage	3
2. Ziel der Arbeit	3
3. Methode	3
3.1 Erstes Funktionsmuster (2004)	3
3.1.1 Konzept	3
3.1.2 Evaluation der Komponenten	4
3.1.3 Wahl des Verfahrens zur Steuerung	5
3.1.4 Bilder zum Bau	8
4. Ergebnisse	11
4.1 Gewicht	11
4.2 Leistungs- und Wirkungsgradmessungen	12
4.3 Temperatur	15
4.4 Standortsbestimmung EMV	15
5. Diskussion	16
5.1 Effizienz	16
5.2 Kosten	16
6. Weiterführung des Projekts mit Industriepartnern	17
6.1 Die Suche nach Industriepartnern	17
6.2 Entwicklungsarbeit im 2005	19
6.2.1 Arbeiten an der el. Maschine	19
6.2.2 Antriebselektronik als Einplatinenlösung	20
6.3 Entwicklungsarbeit im 2006	21
6.3.1 Antriebselektronik	21
6.3.2 Arbeiten an der el. Maschine	22
7. Ausblick	24
Referenzen / Definitionen / Quellen	25

Zusammenfassung

Der grösste Teil der heute eingesetzten Elektromotoren bis 1 kW Antriebsleistung sind Asynchronmotoren, die nicht effizient arbeiten. Der Anteil der Elektromotoren am Elektrizitätsverbrauch ist erheblich. Das Ziel des Gesamtprojekts Energiesparmor ist die Entwicklung eines effizienten Elektromotors mit integrierter elektronischer Steuerung (Integral –Sparmotor) als Ersatz für drehzahlverstellbare Asynchronmotoren.

Die Kosten der Integral-Sparmorien bis 1kW Antriebsleistung, ausgeführt mit Normgehäusen, sind bei vergleichbarer Fertigung etwa gleich, wie bei den Asynchronmotoren mit Umformern.

Zwischen 2004 und 2006 sind die Rohstoffpreise, besonders von Kupfer und Aluminium stark gestiegen. Das Magnetmaterial Neodym - Eisen - Bor blieb etwa konstant. Diese Tatsache spricht für den Integral – Sparmotor in Permanent – Magnet – Technik, da im Bezug zu einem Asynchronmotor bedeutend weniger teures Kupfer und Aluminium verbraucht wird. Die Integral – Sparmotoren erreichen einen höheren Wirkungsgrad bei kleinerem Gewicht als vergleichbare Asynchronmotoren.

Im 2004 entstand ein erstes Funktionsmuster eines Integral – Sparmotors in Permanent – Magnet – Technik. Die Vorteile der höheren Effizienz, des geringeren Gewichts und der Kosten bestätigten sich. Im 2005 und 2006 beteiligten sich drei Industriepartner am Projekt.

Resumé

Un grand nombre de moteurs électriques d'une puissance de l'ordre de 1kW ont des rendements relativement faibles. Leur part à la consommation électrique est considérable. L'objectif fixé au projet du développement d'un nouveau moteur économe consistait dans le développement d'un moteur performant avec contrôle électronique intégré qui peut se substituer au moteur asynchrone à vitesse variable.

Le coût de ces moteurs économes intégrés d'une puissance de l'ordre de 1 kW avec boîtiers normalisés, restent semblables à ceux des moteurs asynchrones avec convertisseurs, réalisés avec des technologies comparables. Depuis 2004, le coût des matières premières telles que cuivre et aluminium ont considérablement augmentés, tandis que le coût des aimants Néodymium-Fer-Bore est resté relativement constant. Ces conditions économiques favorisent le recours à des moteurs intégrés utilisant des aimants permanents, nécessitant beaucoup moins de cuivre ou d'aluminium que les moteurs asynchrones. Ces nouveaux moteurs intégrés atteignent des rendements supérieurs, avec des masses réduites par rapport aux moteurs asynchrones.

Durant 2004, un premier prototype de moteur intégré avec aimants permanents a été réalisé. Les avantages escomptés d'un rendement élevé avec des masses réduites ont pu être démontrés. Durant 2005 et 2006, la technologie a été améliorée et portée à maturité, ensemble avec le concours de 3 partenaires industriels.

Abstract

Numerous electric motors of our daily use, with power ratings of about 1kW operate at rather low efficiencies. Their share in the overall electric consumption is considerable. The aim of the research project consisted in the development of an efficient electric motor with incorporated electronic control (integral - ecomotor), which may serve as a substitute for usual variable speed squirrel cage three phase motor.

It was shown that the cost of these new motors of 1 kW power output, built with normalised casings, remain similar to those of squirrel cage three phase motors with inverters. Since 2004, the cost of raw materials as copper or aluminium increased considerably, whereas the cost of Neodymium-Iron-Boron magnets remained rather stable. These facts advocate for energy saving motors making use of permanent magnets, requiring much less copper or aluminium than squirrel cage three phase motors. With integral ecomotors, higher efficiencies are achieved at lower masses as compared to usual squirrel cage three phase motors.

In 2004, a first prototype of this ecomotor using permanent magnets, was built. The advantages of improved performances at lower weight were confirmed. During 2005 and 2006, the technology was then improved and matured in a joint research project with 3 industrial partners.

1. Ausgangslage

Der grösste Teil der heute eingesetzten Elektromotoren bis 1 kW Antriebsleistung sind Asynchronmotoren, die nicht effizient arbeiten. Der Anteil am Elektrizitätsverbrauch dieser Elektromotoren ist erheblich. Das Ziel des Gesamtprojektes „Energiespamotor“ ist die Entwicklung eines effizienten Elektromotors mit integrierter elektronischer Steuerung (Integral-Spamotor) als Ersatz für Normmotoren (Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufern) betrieben an Frequenzumformern im Leistungsbereich kleiner 1kW.

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

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

Diese erste Arbeit zeigte auf, dass mit Permanent-Magnet-Technik (PM-Technik), besonders bei Motoren im kleineren Leistungssegment, höhere Wirkungsgrade erreichbar sind als bei vergleichbaren Normmotoren (AS-Technik). Durch den Einsatz von Permanent-Magneten auf dem Rotor von el. Maschinen lassen sich elegant Verluste umgehen. Eine erste Kostenrechnung ergab, dass Energiespamotoren in PM-Technik durchaus konkurrenzfähig sein können, wenn diese mit Normmotoren, inklusive Umformern, verglichen werden. Ein interessanter Markt für die PM-Energiespamotoren sind Antriebe mit langen Laufzeiten, also die Strömungsmaschinen, wie Pumpen, Lüfter und Kompressoren. Ebenfalls zeigte sich ein signifikantes Energiespar-Potential für solche drehzahlverstellbare Energiespamotoren in der Schweiz.

Aus diesen Gründen, erteilte das Bundesamt für Energie den Auftrag für ein „ Funktionsmuster eines Integral – Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1 kW“.

2. Ziel der Arbeit

Der Auftrag gliederte sich in zwei Teile. Im ersten Teil (2004) ist ein erstes Funktionsmuster eines Integral-Spamotors zu realisieren und für die Weiterführung des Auftrags sind Industriepartner zu finden. Im zweiten Teil 2005 bis 2006 ist eine Baugrösse eines Integral-Spamotors zu entwickeln und die Effizienz nachzuweisen.

3. Methode

3.1 Erstes Funktionsmuster (2004)

3.1.1 Konzept

Grundsätzlich ist der Integral – Sparmotor ein Preis empfindliches Produkt, welches im Wettstreit mit IEC Normmotoren, betrieben an Frequenzumformern steht. Die vorgängige Arbeit ist mit 250 Watt Motoren durchgeführt worden. Die Kosten eines IEC Normmotors, Baugrösse 63, 2 polig mit Frequenzumformer, Verkabelung und Inbetriebnahme belaufen sich auf etwa 300.- Fr. Um vergleichen zu können, wird die Leistung des ersten Funktionsmusters des Integral-Spamotors bei 250 W festgelegt.

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 low cost Normmotor aus dem ersten Auftrag Energiespamotor [1] kostete im Jahr 2002 CHF 91.- beim Kauf eines einzigen Motors. IEC Motorengehäuse sind bekannt und können weltweit bezogen werden.

Der low cost Normmotor und das Funktionsmuster des Integral – Sparmotors können direkt verglichen werden. Dazu wurde der Normmotor in seine Einzelteile zerlegt und das IEC 63 Normgehäuse für den Bau des Integral – Sparmotors verwendet.

Die bereits gebauten Energiespamotoren ohne integrierte Steuerung haben gezeigt, dass der Rotor/Stator nur etwa die Hälfte des Volumens beansprucht, wie bei einem Normmotor. Es ist deshalb leicht einzusehen, dass im frei werdenden Platz des IEC Normgehäuses, auch die Antriebselektronik (Abb1) untergebracht werden kann.

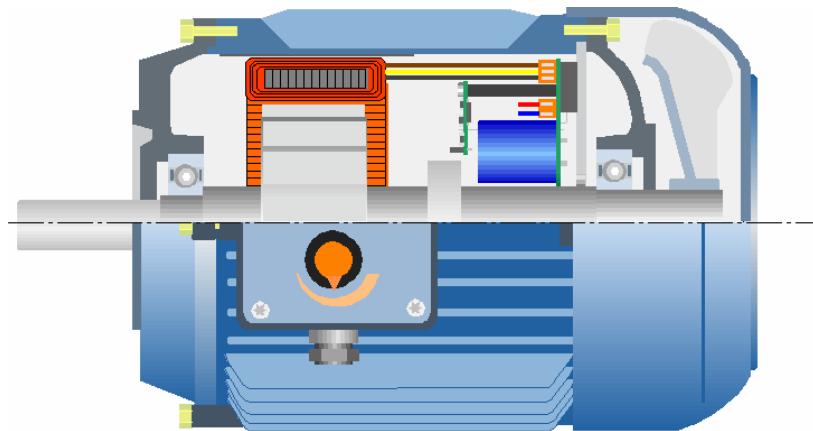


Abb 1. Schnitt durch das erste Funktionsmuster des Integral - Sparmotors mit einem IEC Normgehäuse aufgebaut.

Beim Integral-Spamotor wird 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 sein. IEC Motoren sind mit einem Lüfter ausgerüstet. Die Wahl der Grösse des Lüfterrads bietet die Möglichkeit, die Kühlung optimal einzustellen, ohne dadurch die Aufnahmeleistung wesentlich zu erhöhen.

Die Wahl der Wicklungsart fiel auf eine Jochwicklung, weil hier die grösste Erfahrung und nach unserer Auffassung auch das grösste Potential für eine automatische Fertigung einer spannungsfesten 230 Volt Wicklung vorhanden ist.

3.1.2 Evaluation der elektronischen Komponenten

Die Strategie bei der Wahl der Komponenten bestand im Einsatz von hoch - integrierten Halbleiterbausteinen. Diese Lösung spart Kosten und Platz. Sehr interessant sind Module für den Leistungsteil am Gleichspannungs – Zwischenkreis (325 VDC). Diese Module beinhalten die sechs Leistungshalbleiter, die Treiber dazu, Überstromschutz, Überspannungs-, Unterspannungsabschaltung.

Die Wahl fiel auf den Baustein *PS21661-RZ/FR* (*Single-In-Line intelligent Power Modul*) von *Mitsubishi*.[2]

Der Baustein von *Mitsubishi* ist einfach und übersichtlich. Er besitzt die nötigen Schutzschaltungen und kann mit einem einfachen brushless Controller oder mit einem Microprozessor verbunden werden. Beim Aufbau der Schaltung und Inbetriebnahme hat sich als Vorteil erwiesen, dass sich die Über- und Unterspannungsüberwachung nur auf die Versorgungsspannung der Treiber beschränkt. Die Schaltung konnte zuerst bei 40 VDC getestet werden, bevor diese an die Netzspannung angeschlossen wurde.

Beachtenswert ist auch der TB6581H (*3 Phase Full-Wave Sine Wave PWM brushless Motor Driver*) [3] von *Toshiba*, der erst im Laufe des Projekts bekannt wurde. Dieser Baustein bestätigt die Vorhersage, dass die Halbleiterindustrie immer kompaktere Chips für den Motorenmarkt herstellt. Im TB6581H sind die Steuerung, die Treiber und die Leistungstransistoren in einem Gehäuse integriert. Dieser Baustein kostet in einer 1000er Serie rund CHF 10.- pro Stück.

Beim verwendeten Leistungsbaustein von *Mitsubishi* ist ein Controller nötig. Der Controller liefert die el. Signale so an das Leistungsmodul, dass im Motor ein drehendes Magnetfeld entsteht. Für die Evaluation des Controllers wurden in der ersten Projektphase (2004) einige Prozessorlösungen betrachtet. Aus Zeitgründen fiel jedoch die Wahl auf den uns bekannten Motor Controller MC33035 von *Motorola*. Bei diesem Baustein ist keine Programmierung von Software nötig.

Der Motor Controller benötigt für den Betrieb eine 15V Kleinspannung, die mittels einem DC/DC Wandler aus dem 325 Volt Zwischenkreis gewonnen wird.

3.1.3 Wahl des Verfahrens zur Steuerung

Als Verfahren für den Betrieb des Integral – Sparmotors wurde das brushless DC Verfahren gewählt. Der Grund liegt in der höheren Effizienz, der Einfachheit und den damit verbundenen geringeren Kosten als bei der Erzeugung von drei phasigem Sinusstrom. (Verfahren des Frequenzumformers).

Folgende Abbildungen zeigen den Unterschied.

Der grundlegende Aufbau des Zwischenkreises (Abb 2) ist Stand der Technik und wird hier nicht näher beschrieben. Der Zwischenkreis ist für beide besprochenen Verfahren gleich.

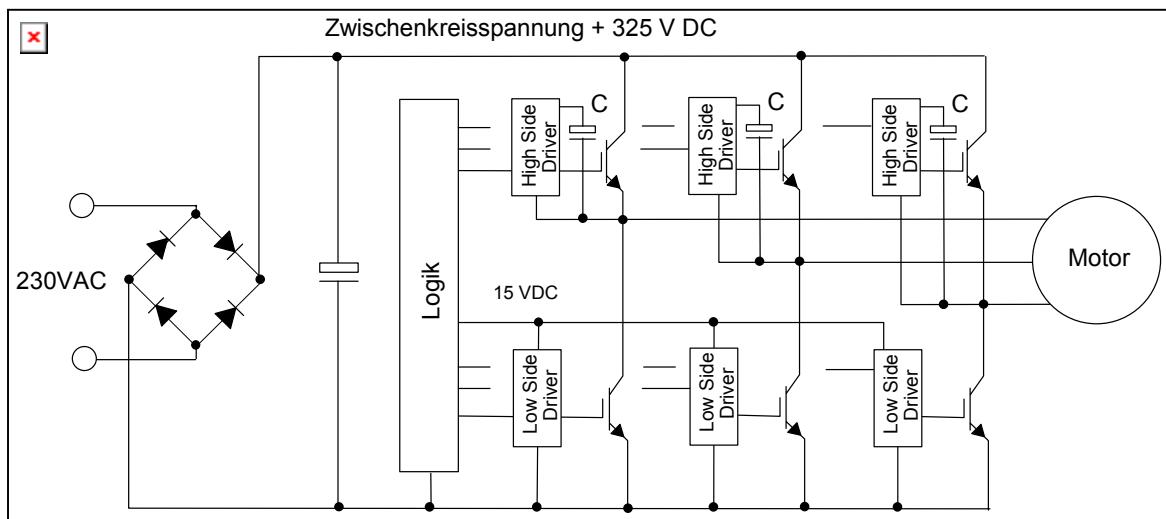


Abb 2. Blockschaltbild eines Gleichspannungs-Zwischenkreises.

Unterschiedlich ist jedoch der Schaltvorgang der Leistungshalbleiter zwischen einem Frequenzumformer und einer Steuerung für brushless DC Motoren.

Der Frequenzumformer muss im Normmotor einen sinusförmigen Drehstrom mit veränderbarer Frequenz erzeugen. Mittels Pulsweiten-Modulation werden innerhalb eines Taktzyklus (einige 10us), durch ein- und ausschalten aller 6 Leistungshalbleiter, die momentanen Spannungswerte aller drei Phasen gebildet. Alle drei unteren Leistungshalbleiter sind innerhalb eines Taktzyklus, für eine bestimmte Zeit leitend. Während dieser Zeit liegen die unteren Leistungshalbleiter an Masse und können durch die sogenannten Bootstrap Dioden geladen werden. (Abb 3).

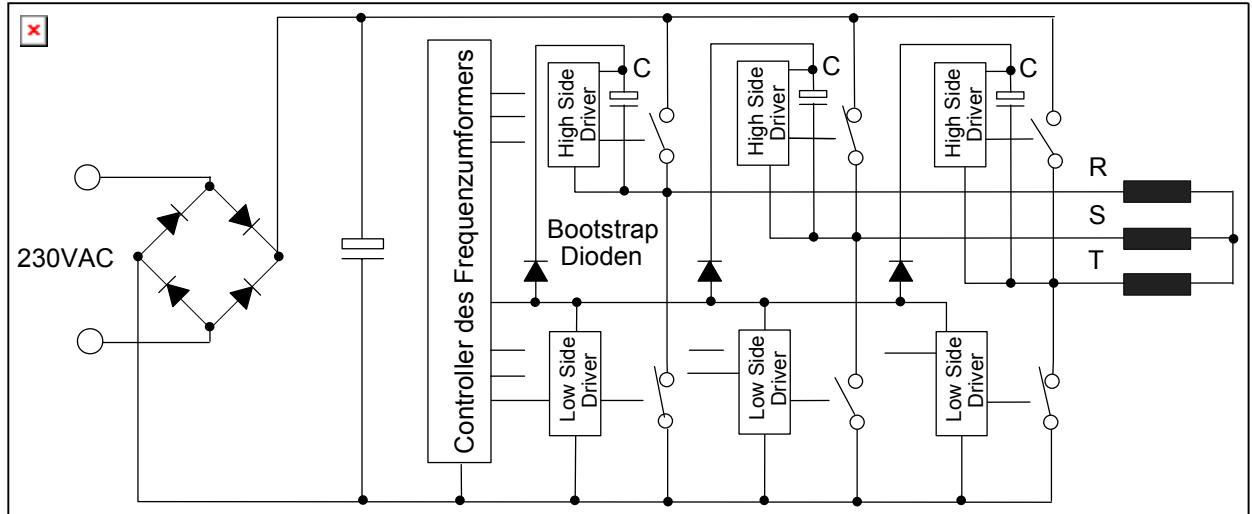


Abb 3. Blockschaltbild eines Frequenzumrichters mit Bootstrap Dioden und Normmotor.

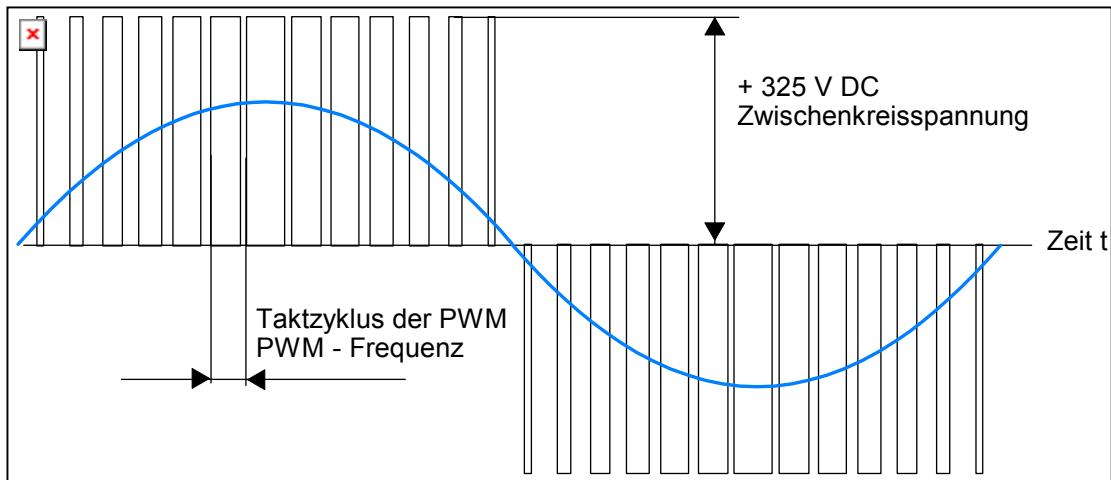


Abb 4. Sinusbewertete Pulsweitenmodulation einer Phase beim Frequenzumformer.

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 unbestromt. Ein Strom fließt jeweils nur durch zwei der sechs Leistungshalbleiter. Der Zeitpunkt der Wicklungsumschaltung (Kommutierung) bestimmen drei Hallsensoren, welche die Position des Rotors abtasten. Bei der Kommutierung wird nur ein Leistungshalbleiter abgeschaltet und ein anderer, nicht im selben Brückenzweig liegend, eingeschaltet. Die Controllerlogik setzt die Hallsignale nach einem festgelegten Muster in die entsprechenden Ansteuersignale für die Leistungshalbleiter um. Innerhalb eines Kommutierungsblocks muss nur, der im Strompfad liegende untere Leistungshalbleiter mit einer PWM betrieben werden, wenn Drehzahlverstellung gewünscht wird. Es ist verständlich, dass diese Steuerungen weniger elektromagnetische Störungen und Schaltverluste verursachen.

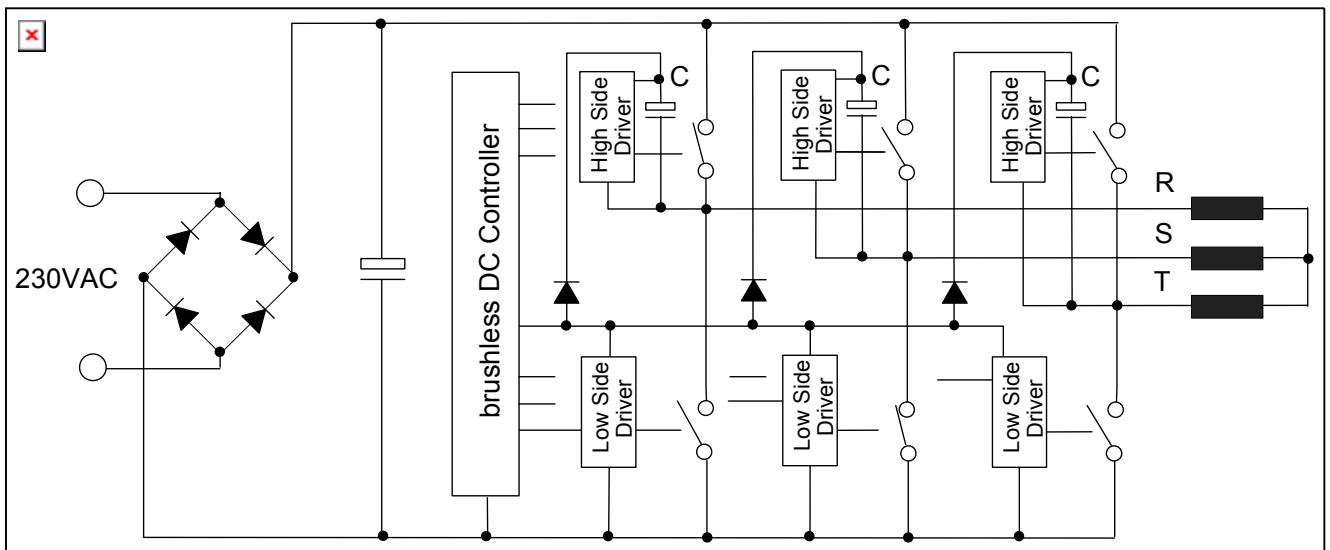


Abb 5. Blockschaltbild einer brushless Steuerung. Stromfluss durch Phase RS.

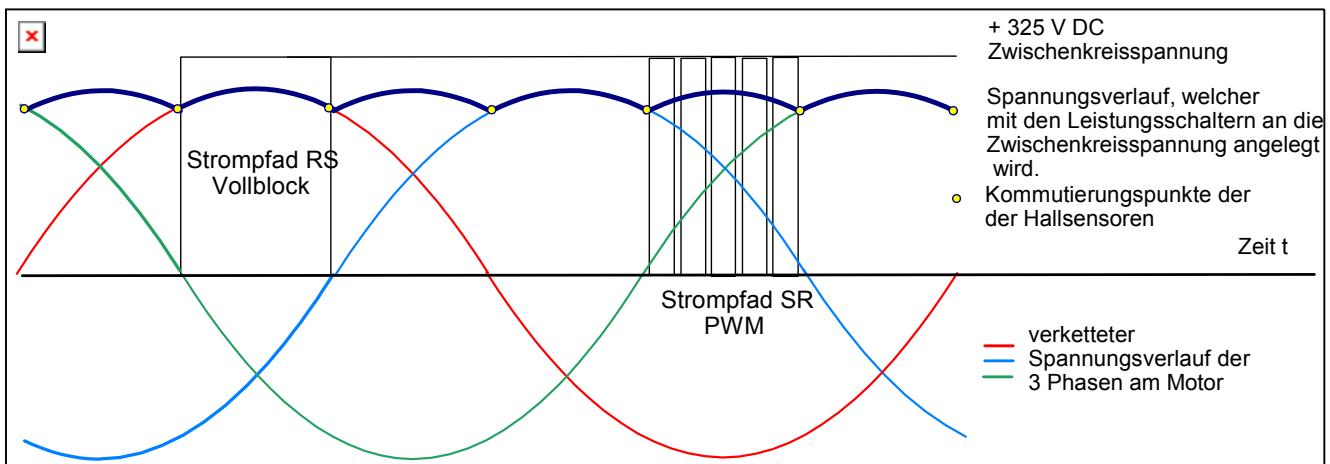


Abb 6. Spannungsverlauf des brushless DC Verfahrens

Die Spannungsversorgung hervorgerufen durch leitende Bootstrap Dioden, der oberen Leistungshalbleiter wird nicht automatisch, wie beim Frequenzwandler durch eine feste Taktfrequenz, gewährleistet. Mehraufwand in der Controllerlogik muss, durch regelmässige Schaltvorgänge aller Leistungshalbleiter, die Spannungsversorgung der oberen Leistungshalbleiter sicherstellen.

Eine effiziente Spannungsversorgung der Controllerlogik setzt 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 Sinn noch drei zusätzliche, galvanisch getrennte Wicklungen für die Versorgung der oberen Leistungshalbleiter, im Hochfrequenztrafo unterzubringen. Durch diese Massnahme reduziert sich der Aufwand beim brushless Controller und die Bootstrap Dioden können eingespart werden.

3.1.4 Bilder zum Bau

In einem ersten Aufbau wurde die Elektronik (Abb 7) mit den zugehörigen Funktionsblöcken aufgebaut. Als Antrieb stand der Motor aus dem ersten BFE Auftrag Energiesparmotor [1] zur Verfügung. Eine bestehende Schaltung (Bildmitte) setzte die Signale der Hallsensoren in die Ansteuerungssignale für das Leistungsmodul um. Aus Sicherheitsgründen beim experimentieren ist die Schaltung 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 Leistungsbaustein PS21661 ist zwischen dem Experimentier - Print und einer Aluminium Platte, zur besseren Kühlung, montiert. Auf der Aluminiumplatte sind zusätzlich, ein Filter, der Zwischenkreiskondensator, ein Gleichrichter und die Elektronik des DC/DC Wandlers angebracht.

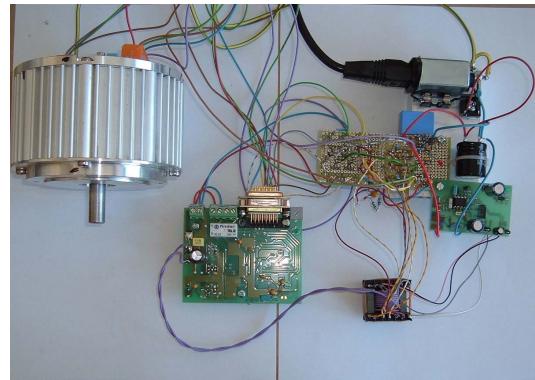


Abb7. Erster Aufbau der Elektronik

Beim ersten Print - Layout hat sich gezeigt, dass der Platz für die Anordnung des Leistungs- und des Controllerteils auf einer Printplatte nicht reichte. Der Grund des Platzmangels waren die einzuuhaltenden Spannungsabstände beim den Zwischenkreiskomponenten. Das realisierte Layout besteht aus einem Leistungsprint (Abb 8), der mit bedrahteten Komponenten ausgeführt ist. Dieser Print nimmt alle Komponenten des Zwischenkreises und des DC/DC Wandlers auf. Der Aufbau des Leistungsprints entspricht von der Art der Bauteile und der Fertigung, dem von geschalteten Netzteilen. Deshalb ist bei der Kostenrechnung ein Preisvergleich mit geschalteten Netzteilen durchaus zulässig. Die Komponenten, die Wärme erzeugen sind auf der Unterseite des Prints angelötet und mit einem Aluring verschraubt. Der Aluring ist zwischen dem hinteren Flansch und dem Gehäuse (Abb 1) eingeklemmt. Der Wärmeübergangswiderstand beträgt 0.1K/W. Somit ist der Aluring 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.

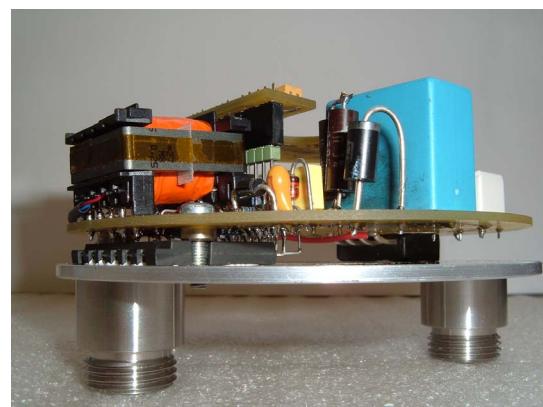


Abb 8/9 Elektronik zum Funktionsmuster mit Leistungs- und Controllerprint.

Der Controllerprint (Abb 9) 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 Welle (Abb 11) ist zentrisch durch beiden Prints durchgeführt und trägt eine Magnetscheibe, die von drei Hallsensoren 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 Hallsensoren mit genügender Genauigkeit zu positionieren, wurde das Problem mit einem Zwischenring und drei Aufnahmehülsen für die Hallsensoren gelöst. Ungenaue positionierte Hallsensoren erhöhen den Aufnahmestrom des Motors und die Geräusche. Bei der neuen Lösung tasten die Hallsensoren die Magnete des Rotors ab.

Die Eisenringe 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 bereits in eine Werkzeugform für verbesserte Spulenkörper. Der Eisenring wurde mit Spulenkörpern (Abb 10) bestückt und mit einer Spezial-Ringwickelmaschine bewickelt.

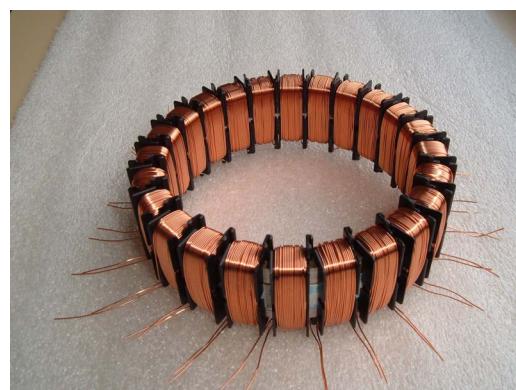


Abb 10 Stator bewickelt

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 und das Fehlen von auskragenden Spulenköpfen. Mit einer Vergussmasse (Wärmeklasse F) wurde der Stator in das IEC Normgehäuse (Abb 12) eingegossen. Der Wärmeübergangswiderstand zwischen der Wicklung und dem Gehäuse beträgt 0.25 K/W.



Abb 11. Stator, Rotor und Welle



Bild12. Stator im Normgehäuse vergossen.

Da der Rotor (Abb 11) keinem magnetischen Wechselfeld unterworfen ist, wurde er aus Vollmaterial gefertigt. Zur Reduktion des Massenträgheitsmoments ist das Innere des Rotors ausgedreht. Die Magnete (Abb 11) sind in die passenden acht Vertiefungen am Ausserumfang des Rotors eingeklebt. Die seitlichen Flächen der Vertiefungen sind so geformt, dass die Magnete gegen die Fliehkräfte gesichert werden.



Abb 13. Fertig zusammengebautes erstes Funktionsmuster des Integral-Sparkmotors

4. Ergebnisse

4.1 Gewicht

Da der Integral-Spamotor, nach dem Zerlegen des low cost Normmotors, in das IEC 63 Gehäuse eingebaut wurde, können die einzelnen Komponenten beider Motoren verglichen werden.

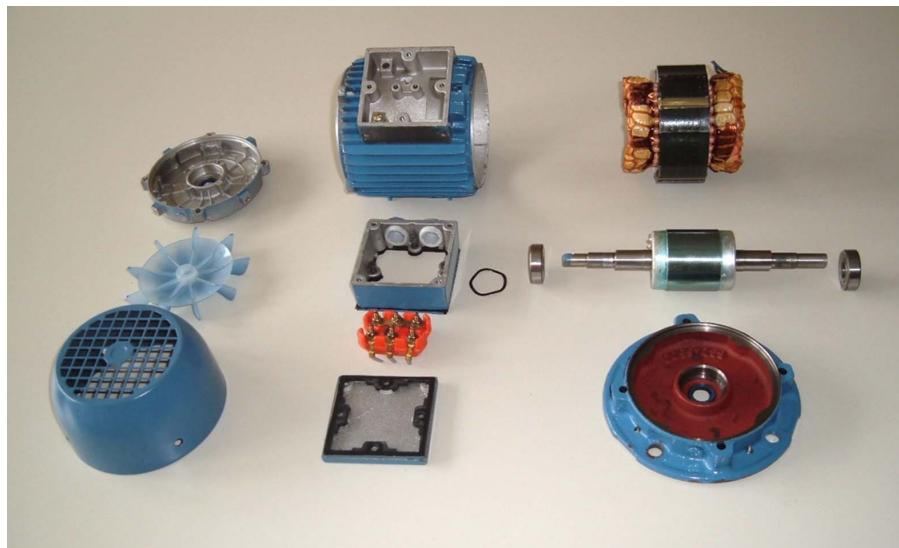


Abb 14. Zerlegter IEC low cost Normmotor /Baugrösse 63/ 250Watt/ 2polig



Abb 15. Einzelteile des ersten Integral - Sparmotors

Gewichtsvergleich (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		410
Eisen		1480
Vergussmasse		240
Elektronik mit Alu Platte	235	
Gehäuse mit Aluflansch	1300	1300

Abb 16. Für den Integral-Sparmotor werden rund 200g Kupfer und 1300g Statoreisen weniger benötigt.

4.2 Leistungs- und Wirkungsgradmessungen

Die elektrische Aufnahmeleistung wurde mit der Strom- und Spannungsmessung am Gleichstromzwischenkreis bestimmt. Verwendet wurden True RMS Multimeter (Metra Hit 18s). 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“ [1].



Abb 17/18 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 Leistungblock PS 21661	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%

Abb 19. Zusammensetzung der Verluste beim DC/DC Wandler

Aufnahmeleistung in Watt des Integral-Spamotors 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

Abb 20. Leerlaufleistung des Integral - Sparmotors

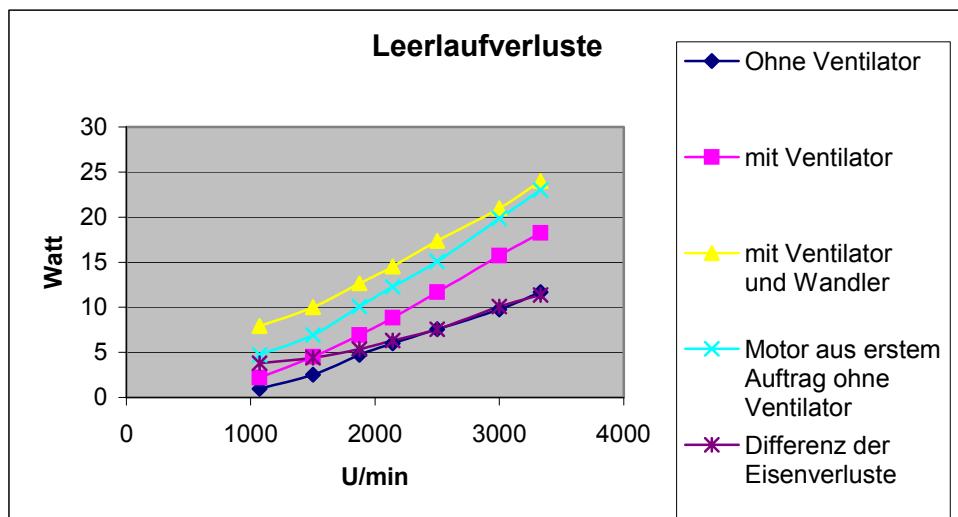


Abb 21. Leerlaufverluste der Sparmotoren

Abbildung 21 zeigt den Einfluss des Ventilators und bestimmt die Eisenverluste durch Vergleich des Funktionsmusters mit dem Energiesparmotor aus dem ersten Auftrag [1].

Das verwendete Stator - Eisen des Motors im ersten Auftrag [1] hat mit 8W/kg bei 1.5 Tesla eine relativ hohe Verlustziffer. Das verwendete Stator - Eisen des Funktionsmusters des Integral-Sparmotors 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

Abb 22. Einzelverluste

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

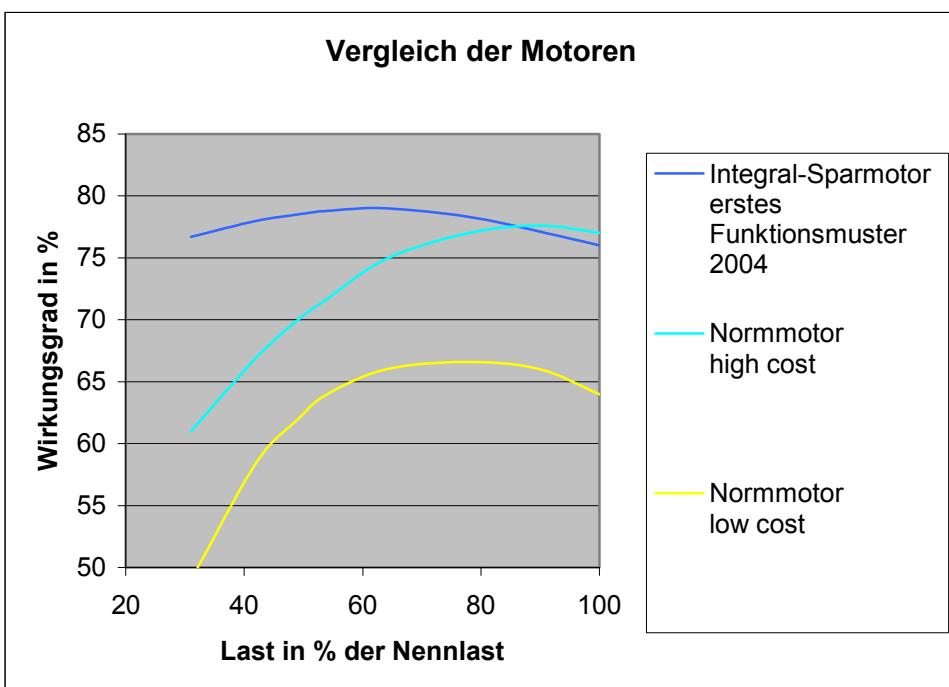


Abb 23 / 24. zeigen den Wirkungsgrad bei Belastung

4.3 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)

4.4 Standortbestimmung zur elektromagnetischen Verträglichkeit EMV

Die ersten EMV Messungen zeigten keine Probleme auf, sowohl im Betrieb mit Pulsweiten - Modulation PWM und im Vollblockbetrieb.



Abb 25. Messungen im EMV Labor

Measurement Type : Voltage Interference
 Supply : Neutral
 Other :
 Equipment Under Test : Integral-Spamotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : PWM 40% last
 Remarks :



Measurement Type : Voltage Interference
 Line 1
 Other :
 Equipment Under Test : Integral-Spamotor
 Set-Up : Komplet
 Operating Conditions : Ohne PWM 70% last
 Remarks :

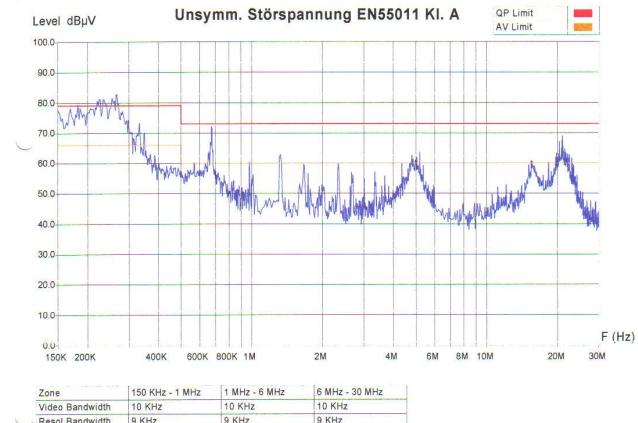
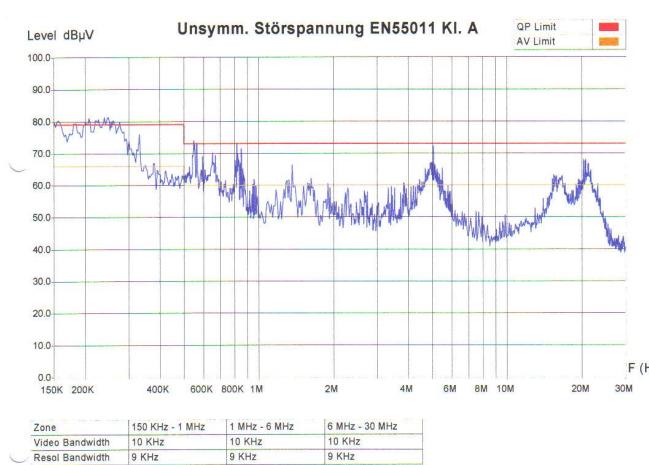


Abb 26. Sparmotor belastet mit PWM und Vollblock

5. Diskussion

5.1 Effizienz

Das erste Funktionsmuster des Integral-Sparmotors erreichte einen Wirkungsgrad von knapp unter 80%. Mit einbezogen sind die Verluste des Ventilators und der integrierten Antriebselektronik (Standby und Pulsweitenmodulation). Gegenüber den Normmotoren (Asynchronmotoren) zeigt sich sehr schön der signifikant höhere Wirkungsgrad im Teillastbereich des Integral-Sparmotors (Permanent- Magnet-Technik).

Aufgefallen beim Integral-Sparmotor ist die Verlustleistung von 79W bei Nennlast. Die Leerlaufverluste betragen 21 Watt. Die Kupferverluste betragen etwa 20 W ($1.08A^2 * 15\Omega$), würde absolut geglätteter Gleichstrom durch die Wicklung fliessen. Gemäss Erfahrung 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 kann.

Es wird vermutet, dass diese Verluste durch Vibrationen entstehen. Durch die Bearbeitung des IEC Gehäuses des Funktionsmusters gab es einen Fluchtungsfehler zwischen Welle und Flansch, was zu Vibrationen des Funktionsmusters auf dem Prüfstand führte. Für die zweite Projektphase ist deshalb vorgesehen, einen eigenen Prüfstand mit Drehmomenten - Waage zu bauen und einen Bremsgenerator direkt an die Welle des Integral-Sparmotors zu befestigen.

Ebenfalls sind die Verluste des DC/DC Wandler noch um 2-3 Watt zu verringern.

5.2 Kosten

Der Aufwand der mechanischen Teile: Gehäuse, Kugellager, Welle, Ventilator, Rotor ohne Magnete, gewickelter Stator, Montage, Test sind vergleichbar mit dem für CHF 91.- gekauften low cost Normmotor Baugrösse IEC 63.

Die Zusatzkosten 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.-

Dazu kommen noch das Leistungsmodul CHF 10.-, die Filter CHF 10.-, die drei Hallsensoren mit Magnetscheibe und deren Montage CHF 50.-

Der Verkaufspreis eines 250 Watt Integral-Sparmotors mit IEC 63 Gehäuse würde, bei vergleichbarer Fertigung, zwischen 200.- und 300 CHF liegen! Also durchaus konkurrenzfähig zum Normmotor mit Umformer. (Stand Ende 2004)

Zwischen 2004 und 2006 sind die Rohstoffpreise, besonders von Kupfer und Aluminium stark gestiegen. Das Magnetmaterial NdFeB blieb etwa konstant. Diese Tatsache spricht für einen Integral – Sparmotor in PM – Technik, da im Bezug zu einem Asynchronmotor bedeutend weniger teures Kupfer und Aluminium verbraucht wird. Siehe auch die Studie [4] Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent – Magnet – Motoren.

6. Weiterführung des Projekts mit Industriepartnern 2005 - 2006

6.1 Die Suche nach Industriepartner

Für die Weiterführung des Projekts Integral-Spamotor 2005 – 2006 war die Beteiligung von Industriepartnern am Projekt nötig. Die Suche nach Industriepartnern erwies sich als schwierig. Das erste Funktionsmuster und die Messdaten dazu standen erst gegen Ende der ersten Projektphase zur Verfügung. Ab diesem Zeitpunkt konnten geeignete Werbemittel erstellt werden. Bis zur mündlichen Zusage von drei Industriepartnern dauerte es bis anfangs Februar 2005. Als Werbemittel diente eine Zusammenfassung des Projektes Integral Sparmotor in deutscher und englischer Sprache, sowie eine CD über Circle Motor AG mit einem Kapitel Integral - Sparmotor. Die Zusammenfassung mit dem Foto des ersten Funktionsmusters, wurde auch auf der Internetseite www.circlemotor.com veröffentlicht. Einige namhafte Firmen wurden angesprochen und Informationsmaterial versandt. Die meisten Firmen reagierten nicht. Beim Nachfragen wurde das Projekt zwar als interessant bezeichnet und für den Entscheid zur Beteiligung am Projekt noch Bedenkzeit gewünscht. Die *Technologievermittlung TEVE* hat die Circle Motor AG mit gezielten Recherchen unterstützt und auch die *Wissens- und Technologietransferstelle des Kantons Bern „innoBE“*, wurde zur Beratung bei gezogen. Ende Januar 2005 wurde der Integral – Sparmotor am *Swissmem - Workshop* zum Thema „Effiziente Elektromotoren“, vorgestellt. Der „Energie-Cluster“ veröffentlichte Ende Januar, per Mail, ein Firmenporträt über Circle Motor AG, mit dem Schwerpunkt Energiesparmor. Dieser Artikel wurde von Herrn Jürg Wellstein, Fachjournalist, Therwil, verfasst. Herr Wellstein gelang es, in der Ausgabe 4/2005 der Technischen Rundschau [5], zwei Seiten zum Thema Integral - Sparmotor zu platzieren.

Circle Motor AG arbeitet in einem Netzwerk mit drei Firmen zusammen:

Kottmann Technik AG, Sumpfstrasse 26, CH – 6312 Steinhausen, spezialisiert in der Herstellung von mechanischen Dreh- und Frästeilen.

EMT Ingenieurbüro für Elektro-Maschinen-Technik GmbH, Theresienstrasse 1, D-71384 Weinstadt-Grossheppach, spezialisiert in der weltweiten Beschaffung für Materialien und Werkstoffe für el. Maschinen.

EMB Elektromaschinenbau GmbH, Industriestrasse 32, D-88441 Mittelbiberach, spezialisiert in der Herstellung von el. Maschinen.

Diese drei Firmen haben sich am Projekt Integral – Sparmotor beteiligt und verpflichteten sich, mit Circle Motor AG zusammen, einen Integral – Sparmotor < 1kW bis 2006 zur Serienreife zu bringen. Als weitere Geschäfts- und Vermarktungsaktivität haben die Projektpartner beschlossen unterschiedliche Integral-Motoren an der Antriebs- und Automationsmesse *SPS/IPC/Drives* in Nürnberg vom 22 – 24. Nov. 2005 auszustellen.

Zum **Themenkreis Integral – Motoren an der Messe SPS/IPC/Drives** gehören folgende, alle in Permanent - Magnet – Technik und im 2005 als Prototypen gebauten, bzw. weiterentwickelten Motoren: Bild 1 von links nach rechts

1. Erstes Funktionsmuster des 250 W Integral-Spamotors mit IEC 63 Normgehäuse und neuer Elektronik.
2. Prototyp eines 500 W 24V Integral – Motors. Da es sich um einen 24 V Motor handelt, kam bereits eine Light – Version der Antriebssteuerung aus den BFE Auftrag, Druckluftspeicher Projekt Nr 100985 [6] zum Einsatz.
3. Prototyp eines 250 W Integral – Sparmotors mit Rundgehäuse und genutetem Stator.
4. Ein Integral – Motor TOTAL, also auch kabellos. Bedienungssignale über Funksteuerung (bei Erfolg *Bluetooth*), Stromversorgung mit eingebautem Akku.
5. Prototyp eines 24W Integral-Kleimotors mit einer Nenndrehzahl bis 20'000 U/min.



*Abb 27. Integral – Motoren für die Ausstellung SPS/IPC/Drives vom 22 – 24. Nov 05 in Nürnberg.
Alle Motoren in Permanent – Magnet - Technik gebaut.*



Abb 28 – 30. Ausstellung SPS/IPC/Drives vom 22 – 24. Nov 05 in Nürnberg.

6.2 Entwicklungsarbeiten im 2005

6.2.1 Arbeiten an der el. Maschine

Bei den Statoren der el. Maschinen gibt es zwei grundlegende Bauweisen, die genuteten und die ungenuteten Statoren. Die genuteten Statoren weisen eine hohe Leistungsdichte auf, haben aber als Nachteil ein magnetisches Rastmoment an der Welle. Ungenutete Statoren (gebaute Jochwicklung im 2004 und alle Luftspaltwicklungen) haben eine geringere Leistungsdichte, aber als Vorteil kein Rastmoment. Das fehlende Rastmoment auf der Welle und der ruhige Lauf eröffnen in vielen Marktbereichen Vorteile. Wir haben uns entschlossen, Integral-Spamotoren mit genuteten und ungenuteten Statoren zu bauen.

Motor mit Jochwicklung (ungenutetem Stator)

Das erste Funktionsmuster aus der Projektphase 2004 ist mit einem ungenuteten Stator, (Jochwicklung) aufgebaut. Da sich der Aufbau - Stator, Rotor, IEC 63 Normgehäuse - bewährt hat, wurde eine Weiterentwicklung dieses Funktionsmusters beschlossen. Untersucht wurde die Einbaumöglichkeit der gesamten Elektronik in einem vergrösserten Klemmenkasten.

Die deutschen Industriepartner investierten in die rationelle Fertigung der jochbewickelten Statoren.

Motor mit genutetem Stator

Ein genuteter Stator ist mit einer konventionellen 6 poligen, dreiphasigen Wicklung ausgeführt. Als Blechschnitt ist der Typ *BDC71/6.6236* der deutschen Firma *Kienle+Spies* [7] eingesetzt. Dieser Blechschnitt wurde speziell für brushless DC Maschinen entwickelt. Die Reduktion des magnetischen Rastmoments wird durch schrägstellen der Nuten des Statorblech's erreicht. Der 6 polige Rotor ist mit 5 Stück *NdFeB* - Magnet Stäbchen pro Pol hergestellt. Aussparrungen am Rotor reduzieren das Massenträgheitsmoment. Die achsiale Eisenlänge des Stators und des Rotors betragen 20mm. Die Studie „Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent – Magnet – Motoren“ [4] betrachtete ausschliesslich genutete Motoren. Die in der Studie untersuchten genuteten PM-Motoren wurden alle im *Maxwell 3D /RMxprt* [4] berechnet. Das Programm erlaubt sehr schnell die Auslegung von PM-Motoren in der Art von Innen- und Aussenläufern, verschiedenen Wicklungsarten und Magnetformen. Die dadurch erarbeitete Erfahrung verstärkte natürlich das Interesse an genuteten effizienten PM – Motoren.

6.2.2 Antriebselektronik als Einplatinenlösung

Als hochgestecktes Ziel stand im 2005 die Entwicklung einer sehr kompakten Antriebselektronik für den Einbau in den Klemmenkasten des Motors an. Der Markt bietet für die Sensortechnik Prozessoren an, die sehr wenig Strom benötigen. Die Idee bestand nun darin einen Prozessor über einen Vorwiderstand aus dem 325V Zwischenkreis, mit geringem Strom zu versorgen. Die Wahl fiel auf den Prozessor *MSP 430 von Texas Instruments* [8]. Dieser kostengünstige Prozessor wurde für batteriebetriebene Geräte entwickelt. Die Stromaufnahme liegt im Betrieb mit allen eingeschalteten Funktionen unter 1 mA. Die getaktete Stromversorgung, welche bei der Elektronik im Jahr 2004 mit schlechtem Wirkungsgrad lief, entfällt damit. Deshalb erfolgte die Spannungsversorgung der oberen Leistungstransistoren über Bootstrap Dioden. Hallsensoren sind Bauelemente, die relativ viel Strom benötigen. Da die gesamte Stromversorgung über den 325V Zwischenkreis erfolgt, werden deshalb zur Leistungseinsparung, die drei Hallsensoren nur dann mit Strom versorgt, wenn deren Signale vom Prozessor gelesen werden. Die Bedienung, Hoch- Tieflauf, erfolgt über zwei Taster.



Abb 31. kompakte Elektronik auf einer Platine

Die geschriebene Software beinhaltet die Steuerungsart brushless DC, sowie den Betrieb als Synchronmotor mit dem Aufbau eines Dreiphasen – Systems.

Die Einplatinenlösung mit Prozessor war leider ein Fehlschlag. Die Schwierigkeiten waren zu gross, so dass aus zeitlichen- und finanziellen Gründen, das Konzept verlassen werden musste. Die Hauptschwierigkeiten waren die korrekte Spannungsversorgung der oberen Leistungstransistoren. Diese brach ab 50% der PWM ein und ungenügende Festigkeit der Prozessorumgebung gegen EMV Störungen, was zu Programmausfällen führte und einige Leistungsmodule zerstörte.

6.3 Entwicklungsarbeiten im 2006

6.3.1 Antriebselektronik

Auf der SPS/IPC/Drive sind verschiedene Demoboards für Motoren von *Toshiba* [9] aufgefallen. Zwei dieser Boards wurden gekauft. Eines bildet den Controllerteil, das andere den Leistungsteil für 325DC. Der Hersteller verspricht einen Motor in kurzer Zeit zum Laufen zu bringen. Diese Lauffähigkeit bestätigte sich, aber es zeigte sich auch das bekannte Problem unserer Entwicklung im 2005. Der Strombedarf des Motors störte, durch elektromagnetische Feder, die Überstromsicherung der Elektronik. Die Folge ist eine ungenügende Belastbarkeit des Motors. Bei geringer Belastung fällt die Wellendrehzahl stark zusammen.



Abb 32. gekaufte Demoboards

Die gemachten Erfahrungen führte dazu, unser Elektronikkonzept nochmals gründlich zu überdenken. Die beste Funktionsfähigkeit zeigte die ursprüngliche Schaltung aus dem Jahr 2004. Ein Schaltregler für die Spannungsversorgung bildete ein zentrales Element. Seit 2004 haben auch die Hersteller von geschalteten Netzteilen bei ihren Produkten in die Effizienz investiert. Die überarbeitete Antriebssteuerung beinhaltet einen effizienten Schaltregler. Mit diesem Element beträgt die gesamte el. Aufnahmleistung im Standbybetrieb 1.5W. (gemessen mit dem Wattmeter *Infratek 105A*). Die 6 Spannungszweige der überarbeiteten Antriebssteuerung sind entweder galvanisch voneinander getrennt oder über einen einzigen Massepunkt auf der Printplatte, miteinander sternförmig verbunden. Nur auf diese Weise ist es uns gelungen die EMV Probleme zu bändigen.

Die mechanische Konstruktion ist so gehalten, dass viereckige Printplatten möglich sind, die über einen runden Aluminium Rahmen in das IEC Normgehäuse eingeschoben werden. Mit der runden Rahmen – Konstruktion ist auch das Positionieren der Hallsensoren gelöst, welche eine kleine Magnetscheibe auf der Welle abtasten.



Abb 33 / 34. neue Antriebselektronik zum Einbau in das IEC Normgehäuse

Das überarbeitete Konzept führte im laufenden Jahr zu einer funktionierenden und effizienten Antriebssteuerung für brushless DC Motoren mit Netzspannung. Im Härtetest auf dem Prüfstand zeigte sich, dass das eingesetzte Modul bis zur Hälfte des Nennstromes aus dem Datenblatt problemlos arbeitete. Den Test bei Nennstrom und Belastungsschwankungen haben einige Leistungsmodule nicht überstanden. Dazu sind in der kommenden Zeit noch Massnahmen zu realisieren, welche die Strom- und Spannungsfestigkeit des Leistungsteils verbessern.

6.3.2 Arbeiten an der el. Maschine 2006

Strömungsmaschinen (Pumpen, Lüfter, Kompressoren) bilden den grössten Anteil am Elektrizitätsverbrauch von Elektromotoren. Das Konzept des Integral – Sparmotos ist deshalb auf den Antrieb von Strömungsmaschinen zugeschnitten. Die Ansteuerung erfolgt mit einer 0 – 10V galvanisch getrennten Schnittstelle über ein M8 Sensorkabel. Bei der Freigabe ist eine leitende Verbindung von Enable zu Ground nötig. Für Strömungsmaschinen ist nur ein Drehrichtungssinn nötig. Deshalb und aus Kostengründen ist eine Funktion für Drehrichtungswechsel nicht vorgesehen.



Abb 35 zeigt die bereitgestellten IEC Normteile für die Integral - Sparmotoren

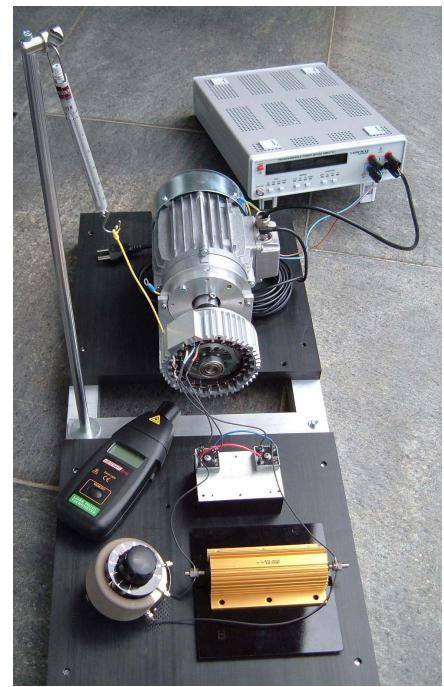


Abb 36 zeigt den Integral-Spamotor im IEC Normgehäuse mit dem M8 Interface zur Drehzahlverstellung.

Abb 37 zeigt den Prüfstand mit einem Generator, ausgebildet als Drehmomentenwaage.

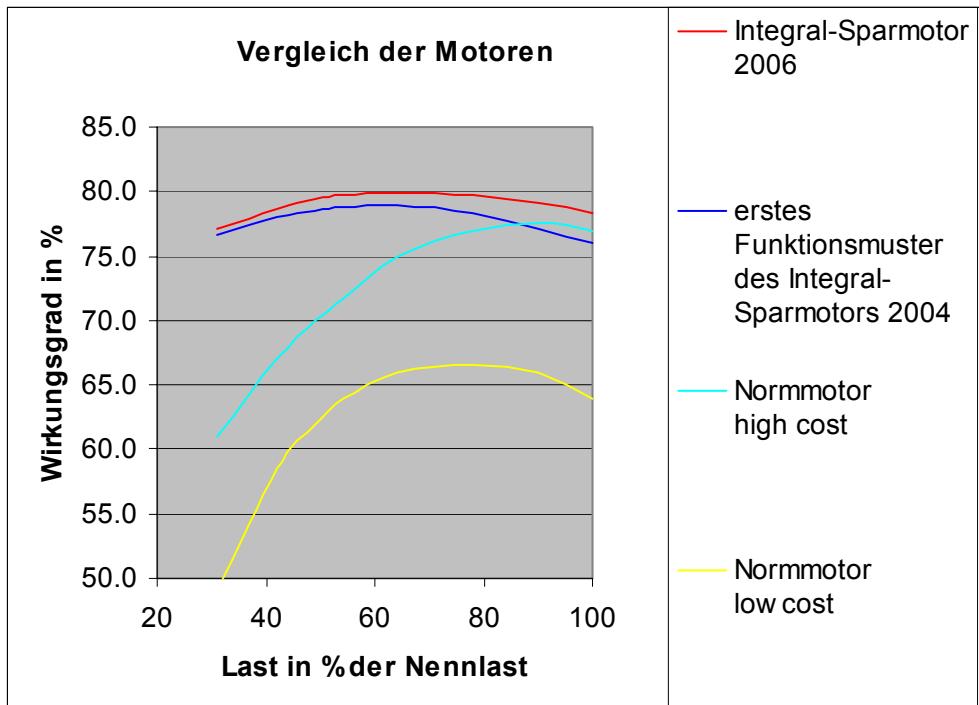


Abb 38 zeigt den Wirkungsgrad der in diesem Projekt entstandenen Integral – Sparmotoren im Vergleich zu Asynchronmotoren gleicher Wellenleistung (250W).

7. Ausblick

Das erarbeitete Wissen aus diesem Auftrag, wird im kommenden Jahr, von Circle Motor AG in der Produktion von kundenspezifischen el. Maschinen umgesetzt. Einbezogen werden ebenfalls die, aus dem Projekt Druckluftspeichersystem [6], hervorgegangenen 24V Antriebssteuerungen durch Brückmann Elektronik in Davos.

Der laufende BFE Auftrag „Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor (3kW)“ ist im Sinne von Scale Up aus dem Funktionsmuster des Integral-Spamotors keiner 1kW entstanden. Beteiligt sind die Fachhochschulen Wallis und Luzern. Das Wissen zum Integral-Spamotor, wie auch die effizienzbezogenen Verbesserungsmassnahmen aus der Studie „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“ [4] fliessen in die Auslegung des 3kW PM-Motors ein.

Zu Herstellern von Motoren mit hoher Fertigungskapazität werden bezüglich dem Integral-Spamotor, nach wie vor Kontakte und Diskussionen angegangen und auch gesucht.

Ebenfalls besteht ein Entwicklungsauftrag aus der Industrie mit dem Ziel die Effizienz der Produkte durch Integration von Permanent-Magnet-Motoren signifikant zu steigern.

Definitionen

Die Bezugsdaten für die Integral – Sparmotoren sind:

Nennleistung der Welle:	250W
Nenndrehzahl	3000 U/min
Polzahl	6

Die Asynchronmotoren im Vergleich:

Nennleistung der Welle:	250W
Nenndrehzahl	3000 U/min – Schlupf bei Nennleistung
Polzahl	2

Referenzen

- [1] Erster Auftrag Energiespamotor des Bundesamt für Energie BFE.
<http://www.electricity-research.ch>
- [2] Verwendeter Leistungsbaustein von Mitsubishi
<http://www.mitsubishichips.com/data/datasheets/power/pdfs/30000378.pdf>
- [3] Leistungsbaustein von Toshiba mit Controller- und Leistungsteil.
<http://www.ebv.com/en/>
- [4] Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent – Magnet – Motoren.
<http://www.electricity-research.ch>
- [5] Technischen Rundschau [5] Ausgabe 4/2005, Bericht über den Auftrag „Funktionsmuster eines Integral – Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1 kW“
- [6] BFE Projekt Druckluftspeicher Nr 100985
<http://www.electricity-research.ch>
- [7] Kienle + Spiess, Katalog, Spitzentechnologie und Know-how für den Bau el. Maschinen
- [8] Daten zum Prozessor MSP 430
<http://www.ti.com>
- [9] Demoboards von Thoshiba, The Semiconductor Times Magazin Aug 06 Seite 19

Quellen

Alle Bilder 1 bis 38 stammen gemeinsam von den beteiligten Projektpartnern.