

Schlussbericht **August 2005**

Projekt Integraldrive II:

Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsoptimierter Energieaufnahme

ausgearbeitet durch

Dr. A. Stoev
Integral Drive Systems AG
Technoparkstrasse 1
8005 Zürich

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage, Vorgehen	4
1.1 Bedeutung	4
1.2 Einsparpotenzial	4
1.3 Projektziele	4
1.4 Projektpartner	5
1.5 Vorgehen	5
2 Technik.....	5
2.1 Funktionsprinzip	6
2.2 Konstruktives Design	6
2.3 Elektrisches Design	8
2.3.1 Leistungsteil	8
2.3.2 Rotorwiderstand	9
2.3.3 Signalübertragung	10
2.4 Prüfstand und Testmessungen	10
2.5 Energiebilanz	11
2.6 Steuergerät	13
2.6.1 Aufbau	13
2.6.2 Steuer- und Regelverfahren	13
3 Kostenziele	15
3.1 Leistungsbereich 100 ... 1000 W	15
3.2 Leistungsbereich 3 ... 20 kW	15
3.3 Leistungsbereich 1 ... 3 MW	15
4 Effizienzziele.....	16
4.1 Leistungsbereich 100 ... 1000 W	16
4.2 Leistungsbereich 3 ... 20 kW	16
5 Markt, Umsetzungsmöglichkeiten und Anwendungen	16
5.1 Kleinantriebe 100 ... 1000 W	16
5.2 Lüfterantriebe 1 ... 20 kW	17
5.3 Grossantriebe 1 ... 3 MW	18
6 Quellenverzeichnis.....	19
7 Anhang: Messergebnisse.....	20
7.1 Auslegung und Funktion der Elektronik	20
7.2 Auslegung von externem Widerstand und Kühlung	22
7.3 Rotorgrossen	23
7.4 Drehzahlstellung und Leistungsbilanz	23

Zusammenfassung

Das **Ziel des Entwicklungsprojektes** war es, einen Low-Cost-Antrieb auf Asynchronmotor-Basis mit integrierter Energiedrosselung für Strömungsmaschinen zu realisieren, der kosten- und volumenmässig alle marktbekannten Lösungen für drehzahlverstellbare Antriebe unterbietet und eine echte Motivation für den Einsatz derartiger Antriebe darstellt.

Die **Realisierung** des Integraldrive II beruht auf dem Prinzip der Drehzahlstellung von ASM mittels gepulstem Läuferwiderstand. Dazu wird ein neuartiges Umrichterkonzept eingesetzt, dessen neue Qualität darin besteht, den Läuferzusatzwiderstand und die Leistungselektronik in den rotierenden Teil des Motors zu integrieren. Dadurch entsteht ein extrem kompaktes Design und es wird eine bisher nicht erreichte Kosteneffizienz erreicht.

Für Leistungsteil, Speisung und Signalübertragung wurden kostengünstige und neuartige Lösungen entwickelt. Diese stellen z.T. einen Technologiesprung gegenüber dem Stand der Technik dar, z.B. wird für den Rotorzusatzwiderstand eine 10 mal höhere Energiedichte als konventionell erreicht. Für die mechanische Ausführung und das Packaging der gesamten Motor-Umrichter-Baugruppe liegt eine hochkompakte und robuste Lösung vor. Der Prototyp wurde umfangreichen Testmessungen zur Verifizierung des mechanischen, elektrischen und thermischen Designs unterzogen.

Das konstruktive und elektrische Design ist skalierbar für einen weiten Leistungsbereich. Damit kann aus dem vorhandenen Basisdesign eine Produktreihe für einen breiten Zielmarkt abgeleitet werden.

Die **Anwendung** der im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien bietet sich für folgende Produkte und Marktsegmente an:

- a. Kleinantriebe grosser Stückzahlen mit modifiziertem Läufer im Bereich 100 ... 1000 W, die z.B. für Heizungspumpen (Haushalt) eingesetzt werden
- b. Gegenwärtig ungeregelt betriebene Lüfterantriebe im Bereich 3 ... 20 kW
- c. Robuste Grossantriebe mit hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsforderungen, speziell als Generatorsysteme im Windenergiebereich

Résumé

Le **but de ce projet** était de réaliser un entraînement électrique bon marché d'un nouveau type se basant sur la technique des moteurs asynchrones et permettant de varier la vitesse de rotation et ainsi la puissance de ces derniers. Cet entraînement devait de plus être meilleur marché et moins volumineux que les entraînements à vitesse variable que l'on peut actuellement trouver sur le marché, et ainsi représenter une vraie alternative à ces derniers.

Le principe „Integraldrive II“ est de varier la vitesse de rotation de la machine asynchrone en variant sa résistance rotorique. Pour cela la **réalisation** d'une résistance rotorique pulsée, dont une des particularités est d'intégrer la résistance additionnelle ainsi que l'électronique de puissance nécessaire dans la partie tournante du moteur, a permis d'obtenir un entraînement dont le volume et les coûts ne peuvent être réalisés par les technologies d'entraînements à vitesse variable actuels.

Des solutions nouvelles et bon marchées ont été développées pour l'électronique de puissance, l'alimentation et la transmission des signaux. Celles-ci représentent en partie une avancée technologique par rapport à l'état actuel de la technique (la résistance rotorique additionnelle atteint par exemple une densité d'énergie 10 fois supérieure à la normale). L'intégration mécanique du module moteur-electronique a été réalisée de manière très compacte et robuste. Le prototype réalisé a été testé de manière approfondie pour valider les designs mécanique, électrique et thermique.

Le design existant peut être adapté à un large domaine de puissances, ce qui rend possible son utilisation pour une vaste gamme de produits.

Les techniques développées dans le cadre de ce projet ainsi que les connaissances acquises peuvent être utilisées dans les domaines d'**applications** suivants:

- d. Petits entraînements (100 ... 1000 W) à rotor modifié, économes en énergie et produits en grandes séries (par exemple pour des pompes à chaleur).
- e. Entraînements pour ventilateurs actuellement non réglés (4 ... 12 kW).
- f. Entraînements robustes de haute puissance avec de hautes exigences de fiabilité et de sécurité, en particulier dans le domaine de la production d'énergie éolienne.

Abstract

The **aim of the development** was to design a low-cost drive with integrated power restriction based on the induction machine principle. This integrated drive shall beat any speed variable solutions currently available in the market regarding cost and volume, and should provide a true motivation to utilize such drives in the industry.

The **realization** of Integralsdrive II is based on the principle of speed variation of induction machines through pulsed rotor resistor. The new quality of this solution consists in integrating the additional rotor resistor and power electronic components into the rotating part of the motor. In doing this, a very compact design will be achieved with so far unrivalled cost efficiency.

For power electronics, power supply and signal transmission innovative and cost-efficient solutions have been developed. They partly constitute a significant technology jump compared to state-of-the-art products, for example the design of the additional rotor resistor provides a 10 times higher energy density as with conventional solutions. For mechanical design and packaging of the overall motor-converter assembly a highly compact and robust solution has been achieved. The prototype has been submitted to extensive test measurements to verify the mechanical, electrical and thermal design.

Construction and electrical design may be scaled up to a wide power range. Thus, from the basic design a class of products can be derived for a broad target market.

The **application** of the developed technologies proffers for the following market segments and products:

- a. Low-power drives (100 ... 1000 W) with modified rotor, e.g. for heating pumps (home applications)
- b. Constant-speed industrial drives for pumps and air flow control in the power range 3 ... 12 kW
- c. Robust high-power drives with high safety and reliability requirements, especially in generator system for wind turbines

1 Ausgangslage, Vorgehen

1.1 Bedeutung

Die grössten Verbraucher elektrischer Energie in der Industrie in der Schweiz und im EU-Raum sind Pumpen und Lüfter, welche von Asynchronmotoren (ASM) angetrieben werden. Der Energieanteil beträgt etwa 30 % des industriellen Stromverbrauches.

Ein Grossteil der Motoren für Pumpen und Lüfter (P&L) laufen ungeregelt, d.h. Ihr Energiekonsum kann nicht an den Bedarf angepasst werden. Dadurch werden grosse Mengen elektrischer Energie unnötig verbraucht.

Herkömmliche drehzahlverstellbare Antriebe sind entweder aus Kostengründen für den Massenmarkt ungeeignet (Antriebe mit Frequenzumrichter) oder weisen schlechte energetische Eigenschaften und ungünstige Netzurückwirkungen auf (Drehstromsteller/Sanftanlasser mit Thyristor-Phasenanschnittsteuerung).

1.2 Einsparpotenzial

Das Einsparpotenzial für den verstärkten Einsatz geregelter P&L-Antriebe in der Industrie kann für die Schweiz überschlägig folgendermassen abgeschätzt werden [1]:

Bei einem Energieverbrauch in der Industrie im Jahr 2002 von 18'200 GWh (entspricht 34 % des Gesamtverbrauchs) entfallen auf

- P&L-Antriebe etwa 5500 GWh (30 %),
- davon auf geregelte Antriebe etwa 440 GWh (8 %).

Gelänge es, diesen Anteil zu verdoppeln, ergibt sich bei ca. 50 % Energieeinsparung gegenüber ungeregelten Antrieben ein Potential von ca. 220 GWh.

Geht man im EU-Bereich von anteilmässig ähnlichen Verhältnissen aus, ergibt sich hier bei einem Gesamtverbrauch von ca. 2600 TWh für 2001 [2] ein Einsparpotenzial von ca. 11000 GWh.

Vgl. auch Abschnitt 2.1 für das Einsparpotenzial bezogen auf einen Antrieb.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Entwicklungsprojektes war es, einen Low-Cost-Antrieb (**Integraldrive II**) auf Asynchronmotor(ASM)-Basis in den Leistungsbereichen 100 ... 1000 W (einphasig) und 3 ... 12 kW (dreiphasig) mit integrierter Energiedrosselung für Strömungsmaschinen zu realisieren, der kosten- und volumenmässig alle marktbekannten Lösungen für drehzahlverstellbare Antriebe unterbietet und eine echte Motivation für den Einsatz drehzahlvariabler Antriebe darstellt.

Das **Kostenziel** für den integrierten Antrieb besteht darin, die Mehrkosten für den geregelten Motor auf etwa 70...100% der Motorkosten zu limitieren. Für gegenwärtige Antriebe mit Frequenzumrichter liegen die Mehrkosten bei ca. 200%.

Ein wichtiges Ziel des Projekts besteht weiterhin darin, die bei der Bearbeitung gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Technologien auf andere Produkte in Schlüsselanwendungsbereichen zu übertragen (siehe Abschnitt 3).

1.4 Projektpartner

Folgende Partner wurden in das Projekt einbezogen:

Motordesign:

- Antriebstechnik KATT Hessen GmbH (Deutschland); Entwicklung des 3 kW Prototyps
- Elin EBG Motoren GmbH (Österreich); Motorentwicklung für Megawatt-Anwendungen

Marketing:

- Elektron AG (Schweiz)

1.5 Vorgehen

Das Konzept des Integraldrive II beruht auf dem Prinzip der Drehzahlstellung von ASM mittels gepulstem Läuferwiderstand. Die neue Qualität des Integraldrive II besteht darin, den Läuferzusatzwiderstand und die Leistungselektronik in den rotierenden Teil des Motors zu integrieren. Dadurch entsteht ein extrem kompaktes Design und es wird eine bisher nicht erreichte Kosteneffizienz erreicht.

Die Entwicklung erfolgte mit folgenden Schwerpunkten und Teilprojekten:

- Spezifikation und elektrisches Design: Design von Leistungsteil, Speisung und Signalübertragung
- Simulation von Elektronik, Netzurückwirkungen und Energiebilanz
- Konstruktives Design: Modifikation des Motors, Design des Gesamtaufbaus und der Komponenten (Zusatzwiderstand, Kühlkörper, Lüfterrad)
- Design der rotierenden Steuerelektronik, Integration des Leistungsteils
- Integration von Speisung und Signalübertragung
- Bau eines Prototyps
- Prüfstandaufbau und Messungen zur mechanischen, thermischen und elektrischen Auslegung
- Überarbeitung der Konstruktion, Komplettierung und Redesign des Prototyps mit dem Ziel der Weiterentwicklung zu einer Produktreihe
- Entwicklung der externen (stationären) Steuerung, Design, Implementierung und Test der Steueralgorithmen, Komplettierung mit intelligenten Funktionen
- Fortsetzung der Messungen für verschiedene Baugrößen und Steuerverfahren
- Übertragung der entwickelten Technologien und Erkenntnisse auf weitere Produkte und Marktsegmente

2 Technik

Im Zuge der Projektentwicklung wurden mehrere Schaltungslösungen und Prototypen für die ein- und dreiphasige Lösung gebaut und untersucht, wobei sich das Funktionsprinzip für beide Varianten nicht unterscheidet. Die im folgenden näher beschriebene dreiphasige Lösung wurde letztlich bis zum komplett konstruierten Prototyp geführt, da sich die hier gewonnenen Ergebnisse und konstruktiven Lösungen am effektivsten auf andere Leistungen und Baugrößen übertragen lassen.

2.1 Funktionsprinzip

Das Konzept des Integraldrive II beruht auf dem Prinzip der Drehzahlstellung von ASM mittels gepulstem Läuferwiderstand. Hierbei wird in Reihe zur Läuferwicklung einer ASM ein Zusatzwiderstand geschaltet, der durch einen gepulsten elektronischen Schalter überbrückt ist und damit stufenlos verändert werden kann. Mit dieser Schaltung kann, unter Beibehaltung des Kippmoments, die Drehzahl lastabhängig stufenlos zwischen Leerlaufdrehzahl und Stillstand eingestellt werden. Da es sich um eine Schlupfverstellung handelt, treten Zusatzverluste auf, die überwiegend im Zusatzwiderstand anfallen. Hervorstechendes Merkmal dieser Lösung ist der gegenüber anderen Drehzahlstellmethoden (Frequenzumrichter, Drehstromsteller) extrem geringe leistungselektronische Aufwand.

Dieses Prinzip wird angewandt zur Drehzahlstellung für Antriebe mit Schleifringläufermotor im Hebezeug-Bereich, wobei Zusatzwiderstand und Steller als externe Geräte ausgeführt sind. Integraldrive II unterscheidet sich von bisherigen Lösungen durch folgende wesentliche Merkmale:

- Zusatzwiderstand und elektronisches Stellglied sind im Rotorteil des Motors (Lüfterrad) konstruktiv integriert. Damit entfällt jegliche zusätzliche Kabelverbindung nach aussen (einschliesslich Schleifringe), Zusatzkosten und Raumbedarf für die Stelleinrichtung sind minimal.
- Die Übertragung des Steuersignals für das Stellglied erfolgt elektromagnetisch über Transformator.
- Die Auslegung erfolgt vorrangig für die Zielgruppe P&L-Antriebe. Unter Berücksichtigung der Lastcharakteristik dieser Antriebe lässt sich zeigen, dass das vorgeschlagene Lösungskonzept trotz Zusatzverlusten im Läuferzusatzwiderstand energetisch tragfähig ist und eine wesentliche Energieeinsparung garantiert. Bild 1 stellt zur Veranschaulichung die drehzahlabhängig vom Netz bezogene elektrische Leistung für einen 5.5 kW P&L-Antrieb für den geregelten und ungeregelten Fall gegenüber.

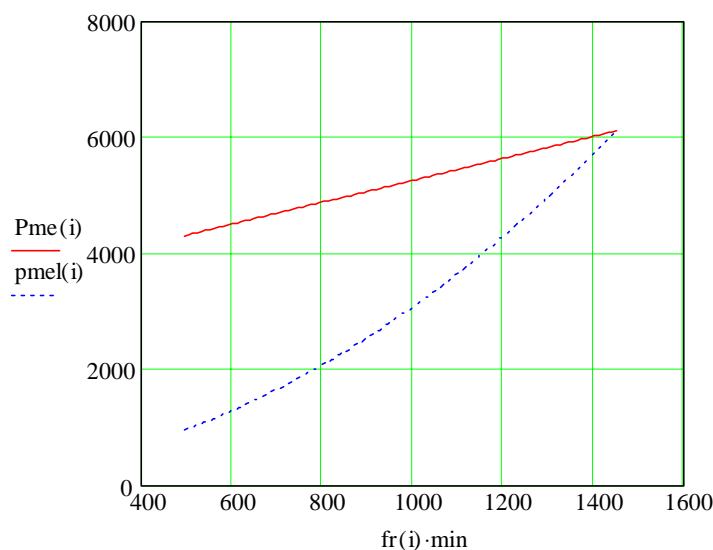


Bild 1: Aufgenommene Netzleistung $P_{me}(i)$ ohne Regelung (durchgehend) und $p_{mel}(i)$ mit Regelung (unterbrochen), Leistung in W, vgl. auch [3]

2.2 Konstruktives Design

Bild 2 zeigt die Motor-Umrichter-Einheit in komplettierter Form, Bild 3 zeigt eine Explosionsdarstellung. Die Umrichtereinheit ist eine kompakte Baugruppe aus Kühlstern, Elektronikgehäuse, Zusatzwiderstand mit Kühlkörper und Signaltrafo. Sie ersetzt das ursprüngliche Lüfterrad des Motors. Der Kühlstern umschliesst radial den Elektronikzylinder. Axial ist auf der Motorseite der Zu-

satzwiderstand (als Printwiderstand) aufgeschraubt und wird durch eine Aluminium-Kühlplatte an den Kühlstern angepresst. Zwischen Kühlstern und Lagerschild des Motors sind die Signaltransformator-Prints angeordnet, bestehend aus feststehendem (am Lagerschild fixiert) und rotierendem Teil. Kühlstern, Elektronikgehäuse und Widerstandskühlkörper bilden eine Einheit aus Aluminiumguss. Die Elektronik-Leiterplatten werden direkt an den Innenwänden des Elektronikgehäuses befestigt.

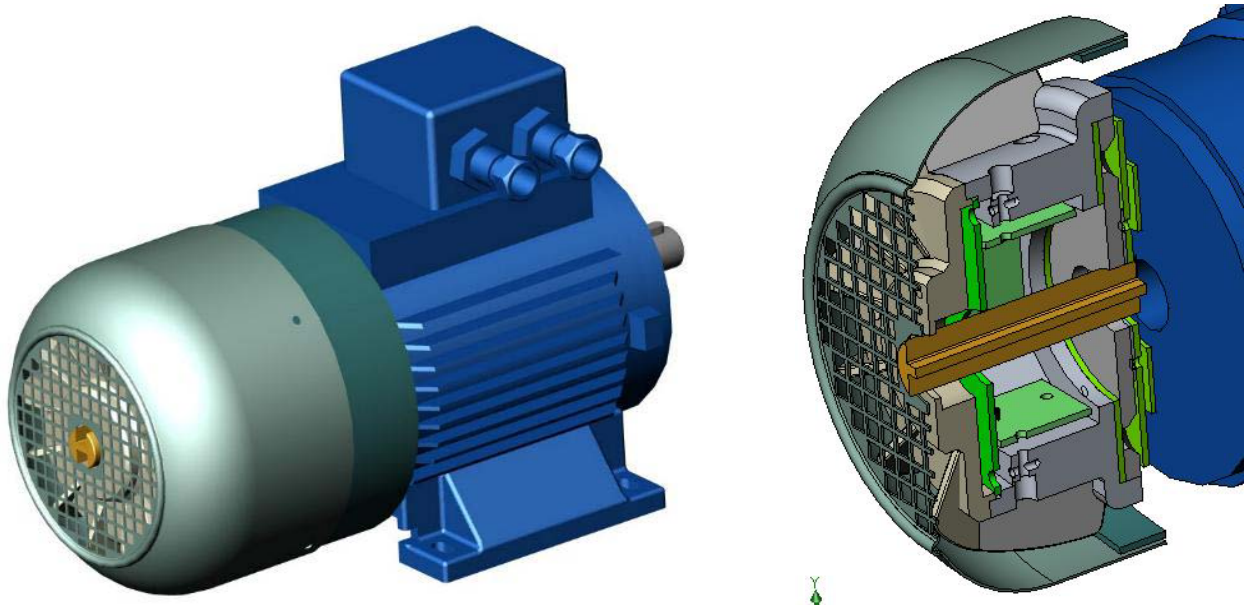


Bild 2: Integraldrive II, Gesamtansicht und Schnitt durch Umrichtereinheit

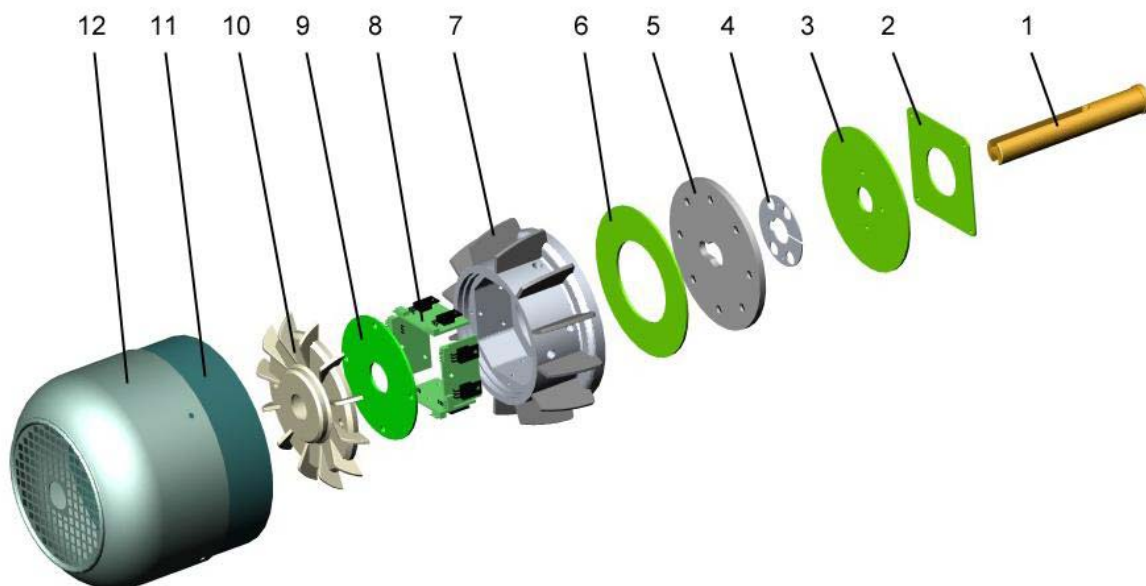


Bild 3: Integraldrive II, Explosionsdarstellung

- | | |
|--|---|
| 1 – Wellenaufsatz | 2 – Signaltransformator, feststehender Teil |
| 3 – Signaltrafo, rotierender Teil | 4 – Halterung |
| 5 – Andruck- und Kühlplatte für Widerstand | |
| 6 – externer Widerstand | 7 – Elektronikgehäuse und Kühlstern |
| 8 – Elektronikbaugruppen | 9 – Basisprint für Elektronik |
| 10 – Lüfterrad | 11, 12 – Lüfterhaube |

Die Elektronikkomponenten sind als Bestandteil des Kühlsterns nahe an der Welle in einem zylindrischen Gehäuse angeordnet, wodurch Exzentrizitäten vermieden werden. Die Elektronikkomponenten sind auf 4 Leiterplatten angeordnet, die wiederum auf einer Trägerplatine befestigt sind. Die Leistungsbauteile (IGBTs) befinden sich aussen und werden zur Wärmeableitung auf Vorsprünge im Inneren des Elektronikzylinders geschraubt (Bild 4). Nach Montage wird der Elektronikzylinder vergossen und im Kühlstern befestigt.

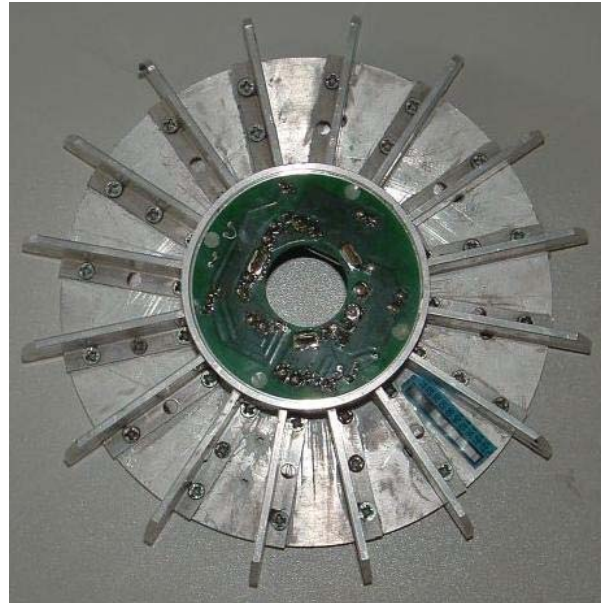


Bild 4: Rotorelektronik, links Elektronikgehäuse, rechts Kühlstern mit eingebauter und vergossener Elektronikeinheit

2.3 Elektrisches Design

2.3.1 Leistungsteil

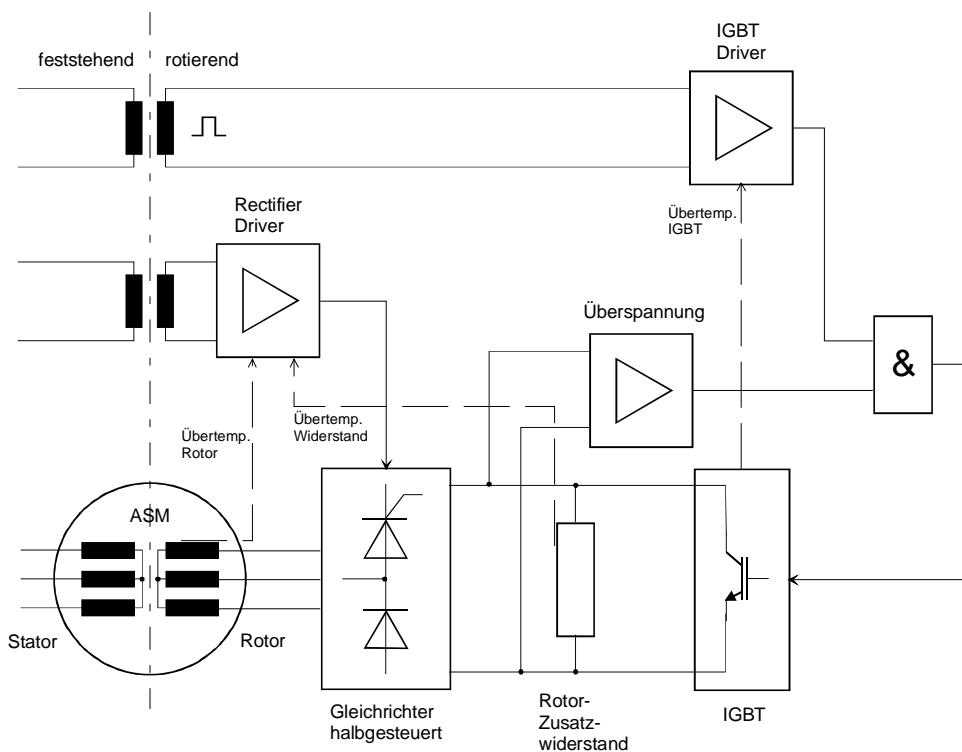


Bild 5: Übersichtsschema der mitrotierenden Rotorelektronik

Bild 5 zeigt das Blockscha von Leistungsteil und Steuerelektronik für den mitrotierenden Teil. Hauptkomponenten sind der Rotorzusatzwiderstand zur Schlupfverstellung und der IGBT zur Modulation und damit kontinuierlichen Verstellung des Zusatzwiderstandes. Der Rotorstrom wird gleichgerichtet und teilt sich je nach Modulationsverhältnis zwischen IGBT und Zusatzwiderstand auf. Der Rotorgleichrichter ist halbgesteuert ausgeführt, damit der Rotorstromfluss im Fehlerfall unterbrochen werden kann. Die Steuersignale werden induktiv über Übertrager eingekoppelt. Neben der Funktion der Schlupfverstellung durch Widerstandsmodulation sind Schutzfunktionen wie Übertemperaturschutz für Widerstand und IGBTs, Anlauf- und Überstromschutz integriert.

Das Leistungsteilkonzept zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Robustes Design, hohe Zuverlässigkeit da nur passive Komponenten
- Geschlossenes Antriebs- und Schutzkonzept: Überlast-, Spannungs-Arbeitsbereichsüberwachung-, Temperaturschutz sind integriert
- CE konform ohne zusätzliche Filter
- Stossfreier Anlauf, keine Startup-Prozedur
- Geräuscharm durch hohe Schaltfrequenz ($> 12 \text{ kHz}$)

2.3.2 Rotorwiderstand

Der Zusatzwiderstand wird zwischen zwei scheibenförmige Kühlkörper montiert, wobei einer fest mit dem Kühlstern verbunden ist. Die Anordnung und Ausführung des Lüfterrades gewährleistet eine ausreichende Kühlung von Zusatzwiderstand, Elektronik und Motor. Der Zusatzwiderstand besteht aus Standard-Printmaterial, auf dessen gesamte Fläche eine Leiterbahn geätzt ist. Durch die direkte Montage zwischen die Kühlkörper ist eine optimale Wärmeabfuhr gewährleistet. Bild 6 zeigt den Kühlstern von der Widerstandsseite mit teilweise montierter Elektronik.

Mit der entwickelten Ausführung des integrierten Zusatzwiderstandes werden **Stromdichten bis 100 A/mm^2** erreicht, das ist eine 10 mal höhere Leistungsdichte als mit üblichen Ausführungen, die dem Stand der Technik entsprechen. Mit diesem Design werden technologisch neue Perspektiven für die Realisierung von Systemen vor allem im Hochleistungsbereich eröffnet.

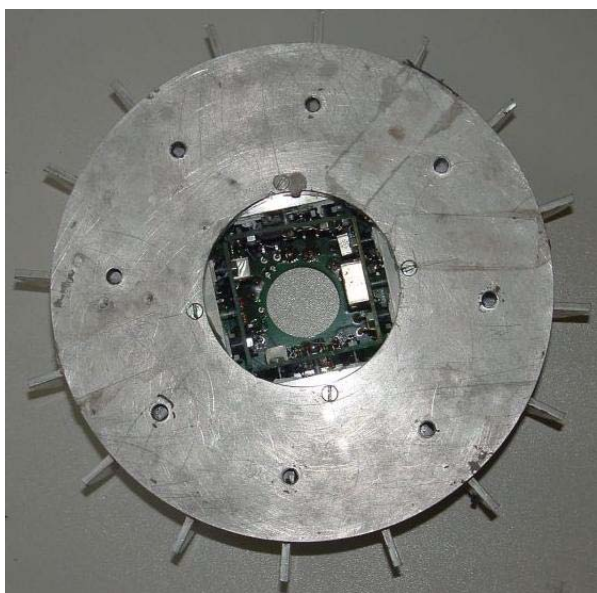


Bild 6: Kühlstern und Zusatzwiderstand

2.3.3 Signalübertragung

Der Signaltransformator überträgt die Ansteuersignale für die IGBTs des Pulsstellers von der externen Steuereinheit auf die rotierende Elektronik. Nach intensiven Vorarbeiten und Versuchen erhielt das Prinzip der induktiven Übertragung gegenüber optischen Verfahren den Vorzug aus Gründen der Zuverlässigkeit, mechanischen Robustheit und der Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung.

Alle Bauelemente sind auf zwei Prints lokalisiert (Bild 7), wobei einer am Lagerschild fixiert ist und der zweite mit der Elektronik rotiert (siehe auch Bild 3). Die Transformatorwicklungen sind als geätzte Printspulen ausgeführt.

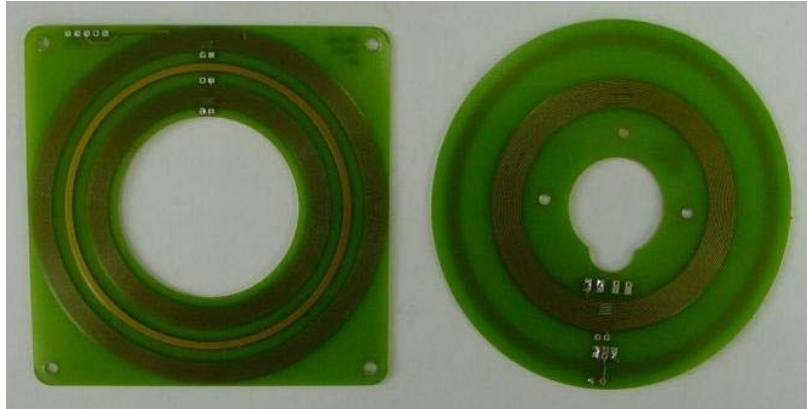


Bild 7: Signaltransformator, links: feststehender Teil, rechts: rotierender Teil

2.4 Prüfstand und Testmessungen



Bild 8: Prüfstand mit Prototypmotor

Für Messungen und Tests wurde der in Bild 8 dargestellte Prototyp-Prüfstand aufgebaut. Es wird ein 3 kW Asynchronmotor der Firma *KATT Motoren* mit gewickeltem Läufer ohne Schleifringe verwendet, der speziell für das Projekt ausgelegt wurde. Der Motor entspricht dem Eff1 Standard. Die Anschlüsse der Läuferwicklung sind herausgeführt und für die Verschaltung mit der Integral-drive-Elektronik vorbereitet.

Als Lastmaschine wurde ein drehzahl geregelter 3 kW Motor verwendet (im Bild nicht dargestellt). Es wurden umfangreiche Messungen durchgeführt mit den Schwerpunkten:

- Auslegung der Elektronik: Schaltverhalten des Pulstransistors (IGBT), Ansteuerleistung in Funktion der Frequenz / Duty cycle, maximale Schaltfrequenz, thermische Belastung der Bauelemente, Verluste (siehe Anhang)
- Überlastschutz für Halbleiter, Wicklungen und externen Widerstand
- Mechanische Auslegung: Robustheit der Steuerelektronik, Messung der Zusatzverluste durch den Lüfter, Funktionstest bei verschiedenen Aussteuerungen der IGBTs, Test der mechanischen Festigkeit bei verschiedenen Drehzahlen und Aussteuerungen
- Thermische Auslegung: Thermische Eigenschaften von externem Widerstand (siehe Anhang), Lüfter und Gehäuse, Messung von Leistungsdichte und thermischer Zeitkonstante des externen Widerstandes, Messung des Temperaturkoeffizienten der mechanischen Komponenten und des Gehäuses (Anhang)
- Signalübertragung: Optimale Übertragungsfrequenz, Optimales Design (Luftspalt, Spulenordnung, Leiterquerschnitt, Verstärkereinheit)
- Anlaufverhalten, Stromüberschwingungen und Zusatzverluste (siehe Anhang)
- Zuverlässigkeitsmessungen
- Messungen zu Energiebilanz und zum energetischen Vergleich mit konventioneller Lüftersteuerung und Umrichterlösung (siehe Anhang und Abschnitt 2.5)

2.5 Energiebilanz

Aus den Testmessungen am Prototyp können genauere Aussagen zum Einsparpotential gegenüber herkömmlichen Antrieben und zum Vergleich mit Umrichterantrieben hergeleitet werden. Für die Messungen wurde die Lastcharakteristik eines Lüfterantriebs an einem programmierbaren Prüfstand nachgebildet (siehe Anhang). Die Ergebnisse sind mit relativen Grössen dargestellt und damit auf andere Leistungsbereiche hochrechenbar (Bild 9a-c).

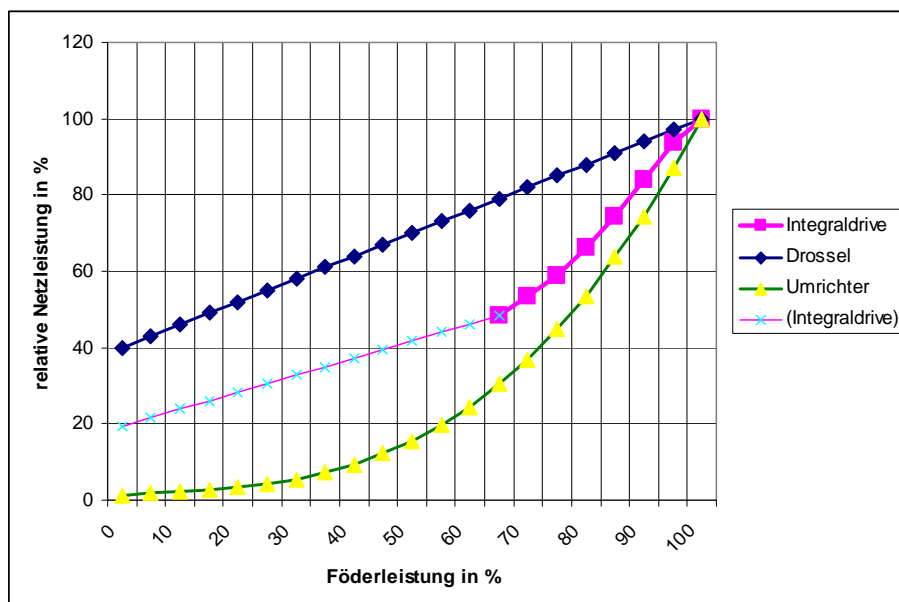


Bild 9a: Energiebilanz eines Lüfterantriebs mit Integraldrive 2, Umrichtersteuerung und Drosselsteuerung bei Nenndrehzahl = 100 %

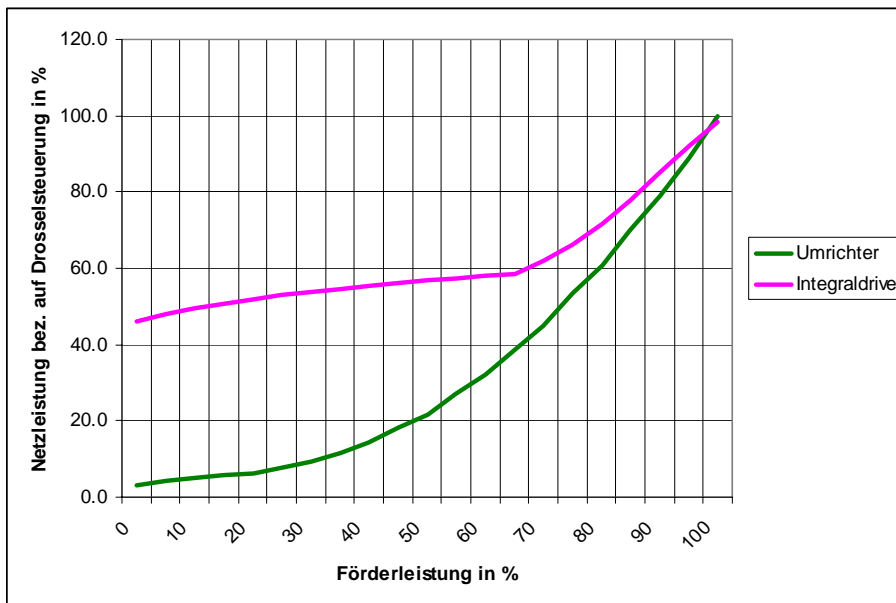


Bild 9b: Relative Netzleistung für Umrichtertrieb und Integraldrive bezogen auf Drosselsteuerung (=100 %)

In Bild 9a wird jeweils die vom Antrieb aufgenommene Netzleistung in Bezug zur Förderleistung des Lüfterantriebs dargestellt (mit Netzleistung bei Nenndrehzahl = 100 %). Unterhalb des Integraldrive-Drehzahlstellbereichs wurde zur Volumenstromstellung bis Null eine Drosselsteuerung angenommen (dünne Linie in Bild 9a).

Bild 9b zeigt die relative Netzleistung für Umrichtertrieb und Integraldrive II bezogen auf die drehzahlabhängige Leistungsaufnahme mit Drosselsteuerung (= 100 %). Demnach liegt das Einsparpotential mit Integraldrive im Drehzahlstellbereich bei bis 60%, darunter bei Fortsetzung der Leistungsstellung mit Drosselsteuerung bei 40 ... 50 %.

Das absolute Einsparpotential bezogen auf die Nennleistung kann Bild 9c entnommen werden. Hier sind die Differenz der aufgenommenen Netzleistung zur Drosselsteuerung für Umrichter- und Integraldrivebetrieb, bezogen auf die Nennleistung des Antriebs, dargestellt. Im Drehzahlstellbereich werden mit Integraldrive noch 60 ... 80 % des Einsparpotentials der Umrichterlösung erreicht, unterhalb des Stellbereichs etwa 50 %.

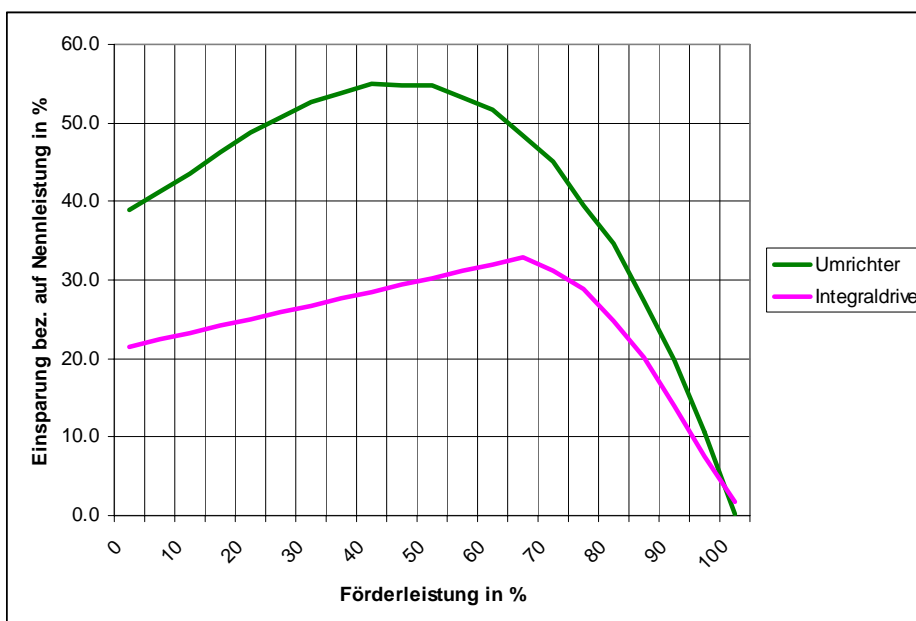


Bild 9c: Einsparpotenzial gegenüber Drosselsteuerung bezogen auf Nennleistung

2.6 Steuergerät

2.6.1 Aufbau

Bild 10 zeigt die externe Steuerelektronik in verschiedenen Ausführungsformen. In der einfachsten Form ("Basic") sind die wesentlichen Funktionen

- Generierung eines pulsbreitenmodulierten Signals zur Ansteuerung der IGBTs im Umrichter
- Generierung eines Signals zur Ansteuerung der Thyristoren im Umrichter
- Kodierung und Aufbereitung der Signale (Modulation) zur transformatorischen Übertragung auf die rotierende Einheit

auf einem Print integriert, welches im Motorklemmkasten untergebracht wird. In der intelligenten Version ("Intelligent") kann über eine serielle Schnittstelle ein hand-held Bediengerät angeschlossen werden, über welches sich komfortablere Steueralgorithmen abrufen lassen.



Bild 10: Steuerelektronik, links Baugruppen für Basic und Intelligent Version, rechts Hand-Held Bediengerät

2.6.2 Steuer- und Regelverfahren

In der Ausführungsform ohne intelligente Elektronik wird über ein Potentiometer bzw. über einen externen Spannungseingang der Modulationsgrad des IGBT vorgegeben und damit der Zusatzwiderstand gesteuert moduliert. Über den externen Spannungseingang kann der Antrieb in eine übergeordnete Anlagensteuerung eingebunden werden.

Mit Verwendung der intelligenten Steuerelektronik lassen sich eine Vielzahl von Regel- und Steuerungsverfahren und Bedienfunktionen abrufen, wovon eine Auswahl im folgenden aufgeführt werden soll:

- Programmierte Drehzahl/Widerstandskennlinien für verschiedene Lastfälle und Stellbereiche zur direkten gesteuerten Drehzahlvorgabe (vgl. Bild 11),
- Wahlweise Drehzahl- oder Leistungsstellung,
- Verbesserung des Anlaufverhaltens durch Einschaltung des externen Widerstands beim Hochlauf, dadurch Vermeidung bzw. Reduzierung des Einschaltstromstosses des Motors und

Vergrößerung des Anlaufmoments (Widerstandsanlauf). Die Anlaufkennlinie ist programmierbar (Zusatzwiderstand als Funktion des Schlupfes bzw. der Drehzahl).

- Einbindung in eine übergeordnete Steuerung oder Energiemanagement durch Feldbus- bzw. RS-485-Schnittstelle,

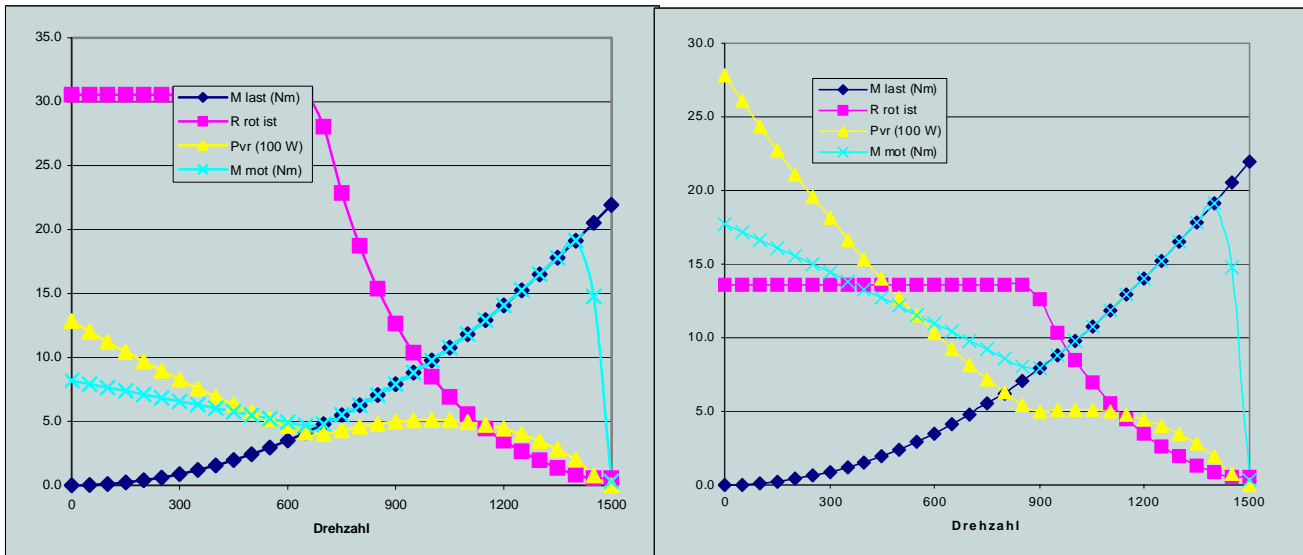


Bild 11: Widerstands/Drehzahlkennlinien, Drehmomente, Verluste für $R_z = 30 \text{ Ohm}$ (links) und $R_z = 13 \text{ Ohm}$ (rechts), 3 kW – Antrieb, P&L-Last

- Drehzahl- bzw. Schlupfregelung bei zusätzlicher Messung des Rotorstromes und Ermittlung der Schlupffrequenz über PLL,
- Verlustoptimaler Betrieb bei Anwendungen ausserhalb des P&L-Bereichs durch Drehmoment- bzw. Leistungsregelung,
- Regelung der eingespeisten Netzleistung bei generatorischen Anwendungen, wobei über die Verstellung des externen Widerstandes eine Regelung des Rotorstromes bzw. Drehmoments erreicht wird,
- Unterdrückung mechanischer Schwingungen durch Dämpfung von speziellen Drehmomentharmonischen bzw. Unterdrückung von anregenden Frequenzanteilen im Rotorstrom, speziell bei dynamischen und transienten Vorgängen,
- Dynamische Beeinflussung der Moment/Drehzahl-Charakteristik des Antriebs, indem z.B. bei Drehzahländerungen vorübergehend der Schlupf vergrößert und dadurch ein "weicher" Übergang auf den neuen Arbeitspunkt ohne Momentstöße erreicht wird. Ein solches Verhalten ist vor allem bei generatorischen Anwendungen zur Vermeidung von Leistungsstößen und Netzflicker erwünscht.

Eine Reihe Ergebnisse der Untersuchungen zum Integraldrive II Regelkonzept ist in andere Applikationen eingeflossen, z.B. zum Stabilitätsverhalten bei Anwendungen im Bereich hoher Leistungen und im generatorischen Betrieb.

3 Kostenziele

Das Kostenziel für den integrierten Antrieb bestand darin, die Mehrkosten für den geregelten Motor auf etwa 70...100% der Motorkosten zu limitieren. Für die verschiedenen Leistungsbereiche ergeben sich folgende Grobkalkulationen.

3.1 Leistungsbereich 100 ... 1000 W

Zu Anwendungsdetails vgl. Abschnitt 4.1, eine Losgrösse von 1000 St. wurde zugrunde gelegt.

Position	Konventionelle Lösung CHF	Neue Lösung (Integraldrive) CHF
Rotor	20.-	40.-
Stator	40.-	45.-
Umrichter	150.-	10.-
Summe	210.-	95.-
Vergleich gesamt		45 %

3.2 Leistungsbereich 3 ... 20 kW

Grundlage der Schätzung sind die Aufwendungen für den Prototyp. Diese können auf den gesamten Bereich hochgerechnet werden. Es wurde eine Losgrösse von 1000 St. zugrunde gelegt.

Position	Konventionelle Lösung CHF	Neue Lösung (Integraldrive) CHF
Motor	250.-	300.-
Elektronik (Umrichter)	650.-	190.-
Mechanik		85.-
Summe	900.-	575.-
Vergleich gesamt		64 %
Anteil Umrichter/Motor		91 %

3.3 Leistungsbereich 1 ... 3 MW

Sowohl konventionell als auch für die neue Lösung wird der gleiche Generator verwendet (vgl. Abschnitt 4.3).

Position	Konventionelle Lösung CHF	Neue Lösung (Integraldrive) CHF
Control-Elektronik	10'000.-	2'000.-
Umrichter	170'000.-	38'000.-
Summe	180'000.-	40'000.-
Vergleich gesamt		22 %

4 Effizienzziele

Ergänzend zum Vergleich der Energiebilanzen von Umrichterantrieb, konventioneller Lüftersteuerung (Drosselsteuerung) und Integraldrive II in Abschnitt 2.5 werden im folgenden aus den durchgeführten Messungen tabellarisch die Gesamt-Wirkungsgrade abgeleitet und gegenübergestellt.

4.1 Leistungsbereich 100 ... 1000 W

Drehzahl [1/min]	Förderleistung [%]	Wirkungsgrad Drosselsteuerung [%]	Wirkungsgrad Polumschaltung [%]	Wirkungsgrad Integraldrive [%]
1430	100	90	90	86
1250	85	63	-	75
1000	70	41	90	62
750	50	20	90	34
500	30	8	-	12

4.2 Leistungsbereich 3 ... 20 kW

Drehzahl [1/min]	Förderleistung [%]	Wirkungsgrad Drosselsteuerung [%]	Wirkungsgrad Umrichtersteuerung [%]	Wirkungsgrad Integraldrive [%]
1430	100	92	87	90
1250	85	64	86	78
1000	70	41	84	65
750	50	20	78	38
500	30	8.5	53	15

Die Überlegenheit der Integraldrivelösung gegenüber konventioneller Lüftersteuerung ist damit deutlich gezeigt und die Effizienzziele bestätigt.

5 Markt, Umsetzungsmöglichkeiten und Anwendungen

5.1 Kleinantriebe 100 ... 1000 W

Die besten Marktchancen in diesem Leistungsbereich werden bei Kleinantrieben mit Spezialmotoren mit modifiziertem Läufer gesehen, die in grossen Stückzahlen eingesetzt werden. Die mögliche Energieersparnis stellt hier einen entscheidenden Kostenfaktor dar.

Derartige Motoren werden beispielsweise bei Heizungspumpen in fast jedem Haushalt eingesetzt. Diese Motoren laufen in Wasser und besitzen einen speziell ausgeführten Kurzschlussläufer mit Stahlmantel. Aus diesem Grund kann die zusätzlich erforderliche Modifikation des Läufers (gewickelter Läufer) in Kauf genommen werden und ist leicht durchsetzbar.

Das Produkt wird auf der Basis des 3 kW Prototyps entwickelt. Der externe Zusatzwiderstand wird im Stahlrohr des Rotors integriert, die Senderplatine im Stator (Bild 12). Da der Rotor in Wasser läuft, ist die Kühlung unproblematisch und der Widerstand kann sehr klein gebaut werden, womit auch ein grosser Stellbereich bis 90% abgedeckt werden kann. Die Regelektronik ist mit Triacsteller ausgeführt und ebenfalls extrem einfach aufgebaut (vgl. Kostenschätzung Abschnitt 3.1).

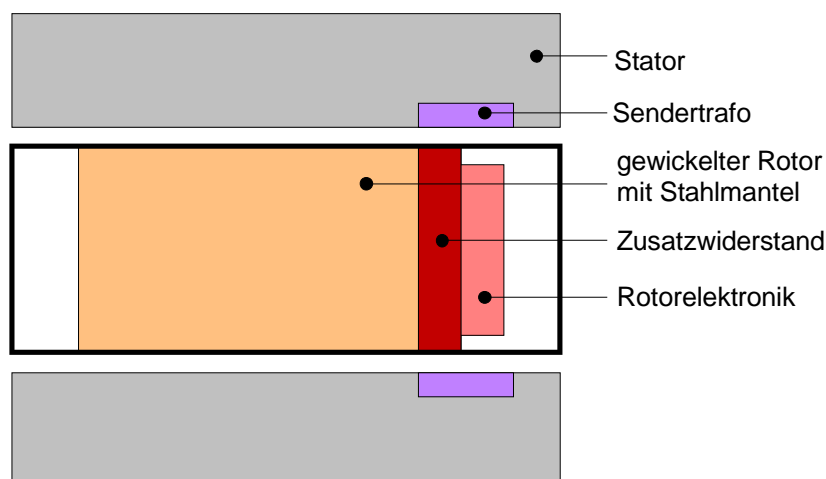


Bild 12: Wassergekühlter Heizungspumpen-Motor mit Integraldrive-Elektronik

Das Payback für ein derartiges Produkt wird auf ca. 1 Jahr geschätzt. Der Markt ist sensibilisiert, da bereits geregelte Antriebe mit Synchronmotor (brushless) zum dreifachen Preis des unregulierten Motors verkauft werden und mit einer weiter steigenden Tendenz bei den Energiepreisen zu rechnen ist.

IDS unterhält Kontakte mit einschlägigen Industrieunternehmen (Biral AG Münsingen CH).

5.2 Lüfterantriebe 1 ... 20 kW

Dieser Leistungsbereich betrifft Standard-Industrieantriebe, die das Gros der unreguliert betriebenen Antriebe in Europa darstellen. Dies umfasst auch den mit der dreiphasigen Lösung für Integraldrive II angestrebten Leistungsbereich.

Die von Integral Drive Systems und dem Antriebslieferanten Elektron AG Au ZH durchgeführte Marketingstudie hat ergeben, dass dieser Bereich für Standardmotoren wegen des starken Preisverfalls der Standard-Stromrichtertechnik immer schwerer für neue Lösungen erreichbar ist. Es ist abzusehen, dass sich die Kombination Standardmotor und Standardumrichter mittelfristig zunehmend durchsetzen wird. Im Bereich 1 ... 5 kW sind bereits kostengünstige Umrichterlösungen vorhanden, der Bereich darüber betrifft vor allem Insellösungen, die sich für eine Massenfertigung nicht anbieten.

Günstiger stellt sich die Situation bei Lüfterantrieben mit polumschaltbaren Motoren dar. Die Abklärungen mit Elektron AG haben hier gezeigt, dass die Integraldrive-Lösung im Bereich 1 ... 20 kW voll konkurrenzfähig ist. Elektron verkauft gegenwärtig ca. 1000 Lüfterantriebe mit polumschaltbaren Motoren pro Jahr in der Schweiz, was eindrucksvoll beweist, dass die Integraldrive-Technik eine grosse Zukunft im Bereich Lüfterantriebe hat. Entsprechende Marketingaktivitäten laufen an.

Weitere Kontakte bestehen zur Firma Pabst (Deutschland), wobei ein möglicher Vertrieb der Lösung in Deutschland diskutiert wird. Der Markt für polumschaltbare Lüfterantriebe in Deutschland beläuft sich auf etwa 10'000 ... 20'000 Stück pro Jahr.

5.3 Grossantriebe 1 ... 3 MW

Zielsegment sind Grossantriebe mit hohem Wertschöpfungsanteil, die eine einfache und robuste Lösung zur Drehzahl- bzw. Leistungsstellung benötigen. Dies betrifft z.B. grosse Lüftungsantriebe mit hohen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen. Hier ist eine Lösung nach dem Integraldrive-Prinzip von Vorteil, da sie wegen der wesentlich geringeren Anzahl an elektronischen Komponenten gegenüber herkömmlicher Stromrichtertechnik bessere Zuverlässigkeitswerte erreicht. Weiterhin fallen in dieses Segment Stand-Alone-Antriebe an entfernten oder unzugänglichen bzw. durch qualifizierten Service schwer erreichbaren Standorten (Offshore, Entwicklungsländer), die dennoch eine Verfügbarkeit von >99.9% aufweisen müssen.

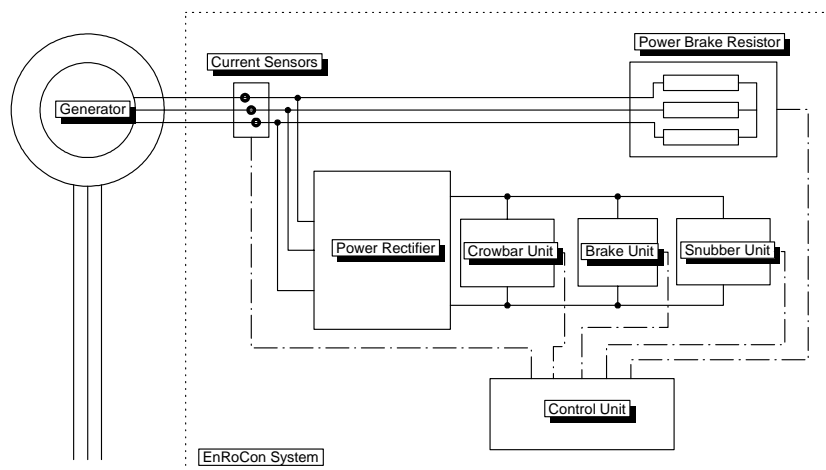


Bild 13: Integraldrive II Technologie für Generatorsystem im Megawattbereich

Der Haupt-Fokus liegt jedoch bei Generatorsystemen für Windenergieanlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren, die sich aufgrund der Generatortechnologie (gewickelter Schleifringläufer) besonders für diese Anwendung anbieten. Bild 13 zeigt ein derartiges System in der Übersicht, zum Kostenvergleich siehe Abschnitt 3.3.

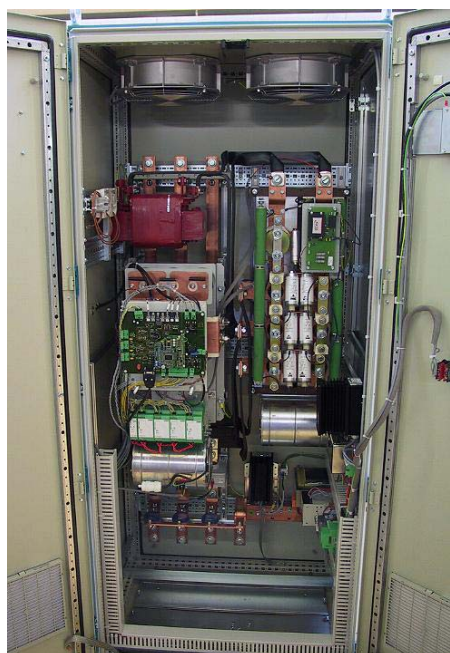


Bild 14: IDS-Umrichter für 2 MW Windgenerator nach Integraldrive II Technologie

Der Markt ist als sehr konservativ einzuschätzen, daher ist die Integration des Widerstands in den Generator erst in der 2. Projektstufe vorgesehen. Gegenwärtig wird der Zusatzwiderstand extern (Dach der Gondel) montiert. Die Technologie dieses Systems entspricht der des Integraldrive II, eingesetzt wird eine erweiterte Regelelektronik mit Mikrocontroller (vgl. Bilder 10, 14 und 15).

Für Entwicklung, Produktion und Vermarktung wurde im Jahr 2003 ein Konsortium aus den Firmen

- IDS AG als Umrichterhersteller mit Simatex AG Wängi SG als Zulieferer,
- Elin EBG Motoren GmbH (Österreich) als Entwickler und Produzent des Generators, der in Österreich und Indien produziert wird und
- Suzlon Energy Ltd. (GmbH) (Indien/Deutschland) als Systemanbieter

gegründet, welches das Ziel verfolgt, die Technologie des rotorwiderstandsgeregelten Asynchronantriebs für Windanlagen umzusetzen, in die Serienproduktion zu überführen und zu vermarkten. IDS ist es dabei gelungen, die Produkti-

on und Vermarktung des Umrichters in der Schweiz zu etablieren, womit Arbeitsplätze in Zürich und Wängi SG gesichert bzw. neu geschaffen wurden.

Ein Prototyp diese Systems befindet sich seit einem Jahr im Betrieb in einem Suzlon-Testfeld an der Südspitze Indiens (Bild 14, 15, [4]). Die Verfügbarkeit des Systems liegt bei nahe 100%, womit ein wesentliches Entwicklungsziel nachweisbar erreicht wurde.

Rechtzeitig zum Abschluss des Projekts Integraldrive II kann die Bestellung der ersten Systeme durch Suzlon und die Auslieferung der ersten Tranche von 40 Einheiten durch IDS verzeichnet werden. Das Auftragsvolumen für 2005 beläuft sich auf ca. CHF 1 Mio. (40 Einheiten), durch IDS wurden Zusatzinvestitionen von ca. CHF 500'000 getätigt. Für 2006 wird sich der Umsatz auf ca. CHF 1.5 Mio. (60 Einheiten) erhöhen. Systeme werden ab 2006 auch in Europa verkauft, für 2006 ist die erste Installation in Deutschland vorgesehen. Auf Grund des Preisdrucks im Windenergiemarkt und dem Wegfall von Subventionen werden grosse Marktchancen für das System in Europa gesehen. Ein weiterer bedeutender Markt sind die USA, da dort auf Grund der Patentsituation konventionelle Systeme mit doppelt gespeisten Generatoren von nicht-amerikanischen Herstellern nicht verkauft werden können.

Das Umrichter-Generator-System wird patentiert und ist in seinen Parametern und dem Preis-Leistungsverhältnis weltweit unerreicht.



Bild 15: Suzlon-Testfeld bei Kanyakumari, Tamil Nadu, Indien

6 Quellenverzeichnis

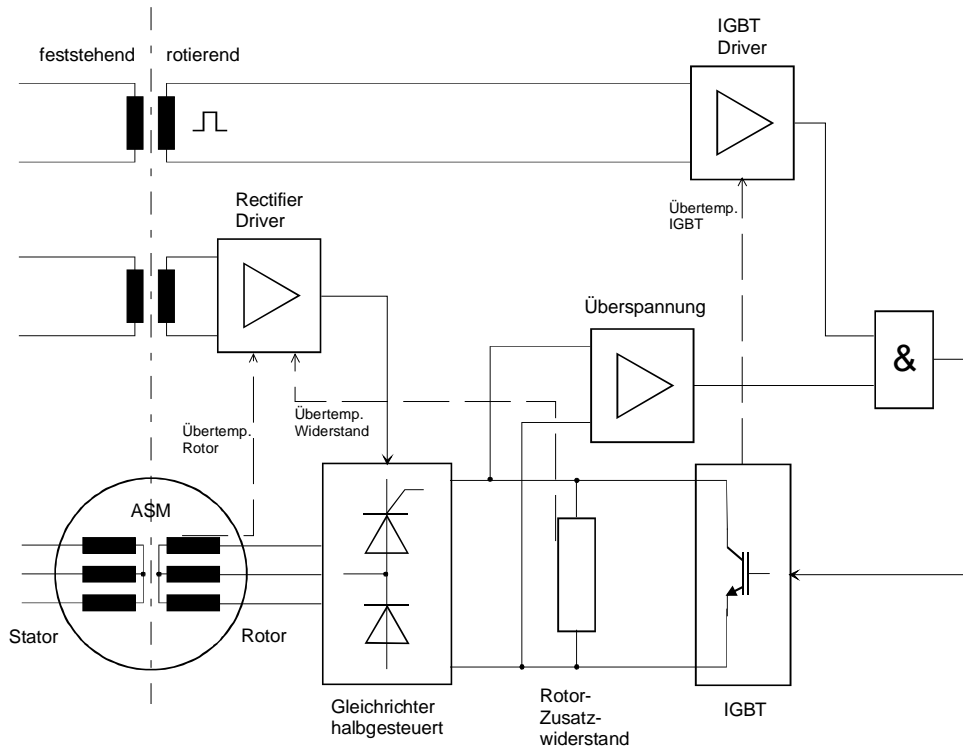
- [1] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2002,
<http://www.energie-schweiz.ch/internet/02360/index.html?lang=de>
- [2] eurostat-Statistik Energie – Elektrizität – Nettoerzeugung,
<http://europa.eu.int/comm/eurostat>
- [3] Endres, O.: Neue Frequenzumrichter mit hohem Energiesparungspotenzial für Pumpen und Lüfter, antriebstechnik 41 (2002) Nr. 4, S. 128 - 130
- [4] Renewable Energy World, September/October 2005

7 Anhang: Messergebnisse

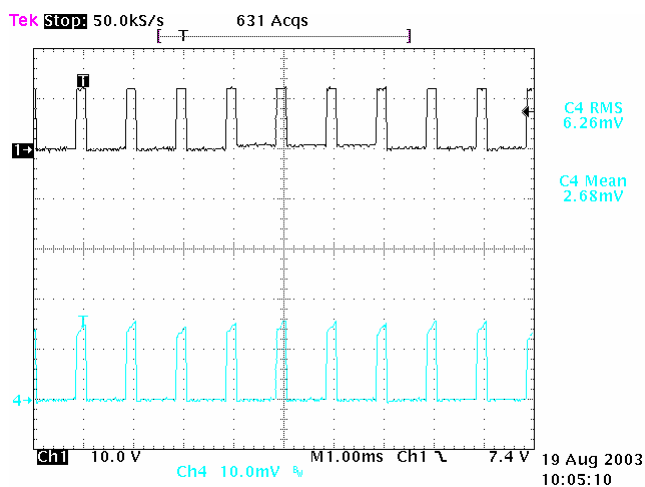
Im folgenden werden auszugsweise die Ergebnisse der wichtigsten Auslegungs- und Funktionsmessungen wiedergegeben.

7.1 Auslegung und Funktion der Elektronik

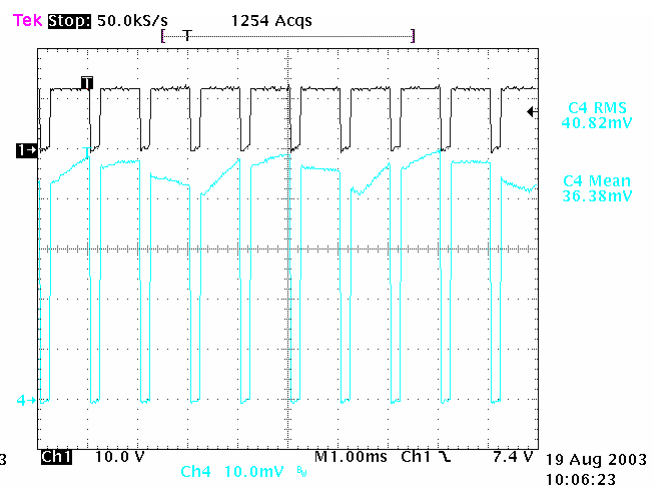
Übersichtsschema:



IGBT-Ströme in Abhängigkeit des duty cycles:

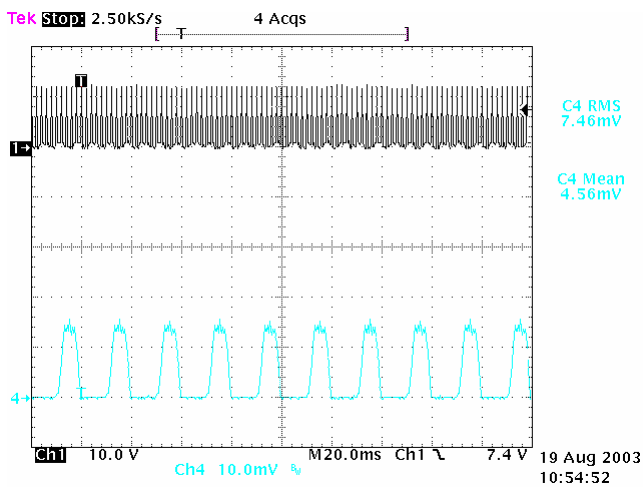


20 % duty
oben: Ansteuersignal, unten: IGBT-Strom

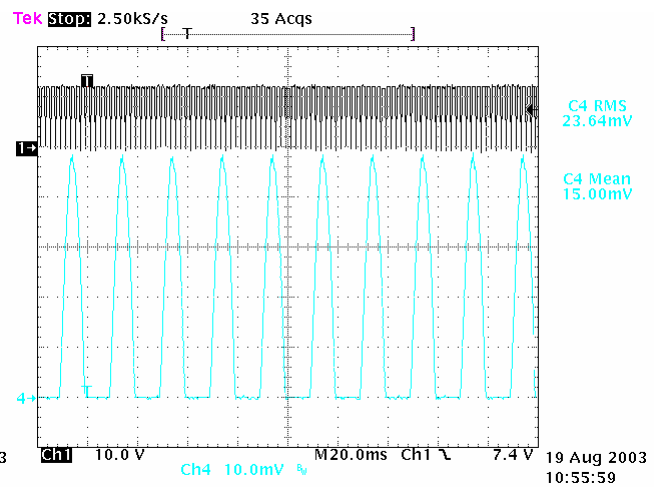


80 % duty

Ströme in Gleichrichterdioden in Abhängigkeit des duty cycles:



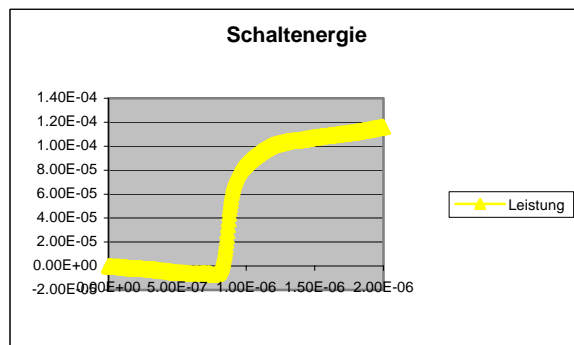
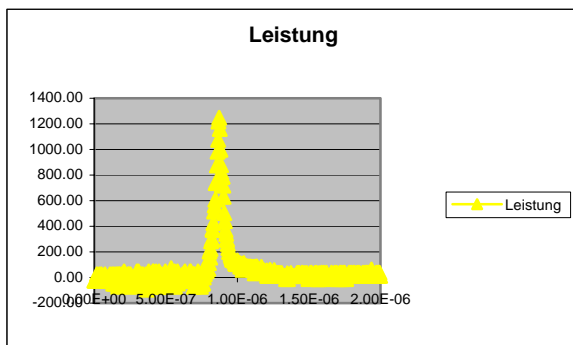
20 % duty



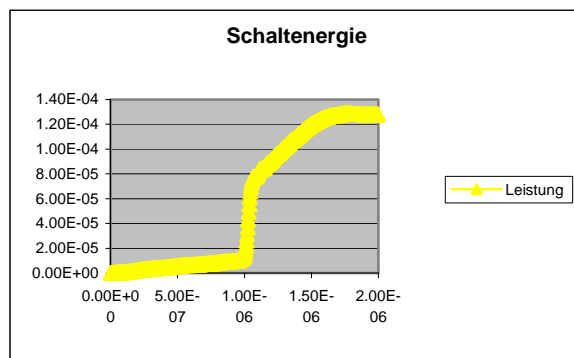
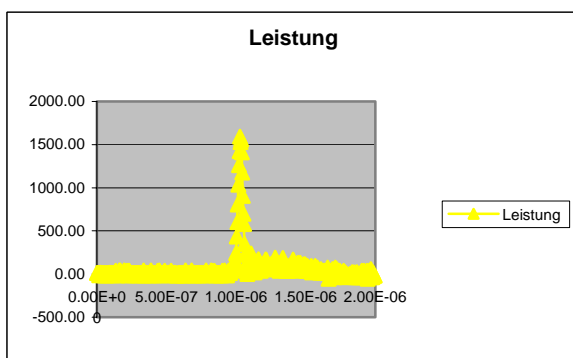
80 % duty

IGBT-Schaltverluste:

Einschalten, Verlustleistung und Schaltenergie:

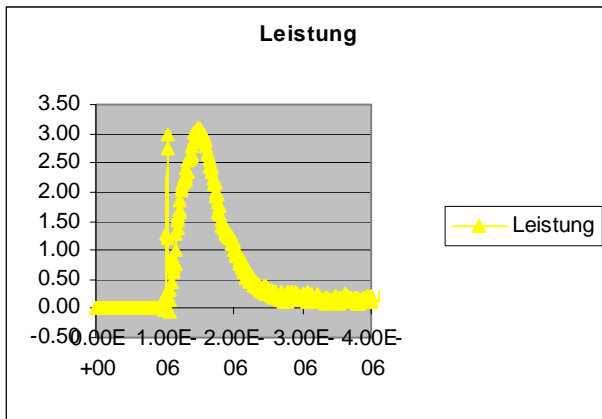


Ausschalten, Verlustleistung und Schaltenergie:

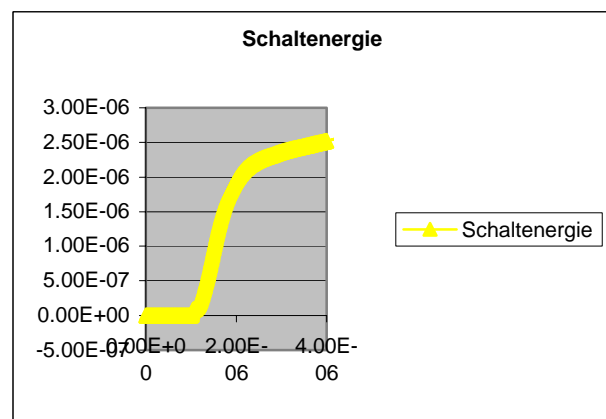


Ermittlung der Ansteuerleistung (zu übertragen über Signaltrafo):

Für 12kHz Schaltfrequenz und Duty cycle 100% (worst case) ergeben sich insgesamt 0.162W -> bei 18V entspricht dies einem Strom von 9 mA.



Leistung im Einschaltmoment



Schaltenergie für den Einschaltmoment

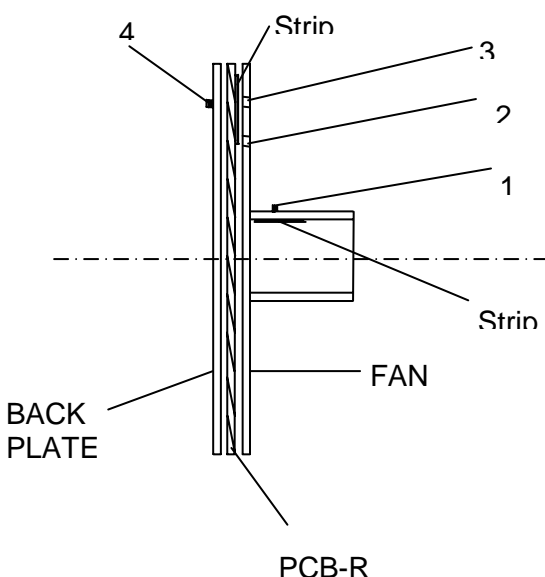
7.2 Auslegung von externem Widerstand und Kühlung

Im Test wurde das thermische Verhalten von externem Widerstand, Lüfterrad und Kühlplatte ermittelt. Es wurden weiterhin die maximal abführbare Verlustleistung und maximal zulässige Temperatur, effektive Leistungsdichte, thermische Zeitkonstante und Wärmekoeffizient der Konstruktion ermittelt.

Aufbau:

Die komplette Konstruktion von Kühlstern und Widerstand (Bild 6, Hauptteil) wurde auf die Motorwelle montiert. Der Widerstand wurde an einen Stelltrafo mit 110 V geschaltet (Simulation der Rotorspannung). Die Konstruktion wurde fremdbelüftet mit einem Luftstrom der etwa dem mit 1000 rpm rotierenden Motor entspricht.

Messpunkte und Ergebnisse:



Test point	1	2	3	4	Load	Ambient temp. [° C]
Time [min]	[° C]	[° C]	[° C]	[° C]		
00	25	25	25	25	30.4V, 2.25A	25
05		32			40V, 2.87A	
10	35	38	38		40V, 2.87A	
15	42	46	47	41	50.4V, 3.52A	
20	48	54	54	46	60.7V, 4.08A	
25	56.2	64	66	56	70V, 4.55A	29
30	65.3	79	78	63	80.8V, 5.05A	29.2
35	75.3	85	89	69	90V, 5.41A	29
40	83.4	98	98	77	100V, 5.75A	29.5
45	85.4	104	102	78	100.6V, 5.66A	
55	86.9	105	104	80	100.2V, 5.62A	29.6
65	86.7	105	104	80	100.8V, 5.64A	29.6
75	86	106	104	80	100.3V, 5.62A	28.9
80	86	106	104	80	110.1V, 6.24A	27.3
90	95	117	117	88	110.1V, 6.1A	27.3
95	97.3	117	117	91	110.4V, 5.95A	
105	97.5	118	118	92	110.4V, 5.95A	26.8

Leistungsdichte:

PCB diameter: 90 mm, Area: 254.34 cm²

Power applied at time 105 min: 654.5 W, temperature considered in steady state

Power density: $654.5 / 254.34 = 2.57 \text{ W/cm}^2$

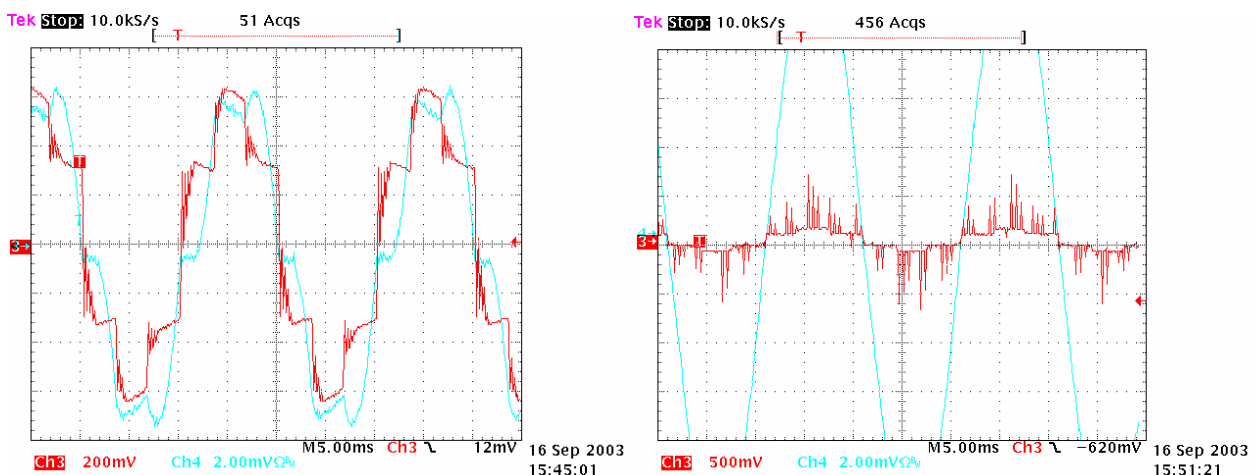
Unused area around the shaft, radius 35 mm: 38.465 cm²

Effective power density:

$654.5 / (254.34 - 38.465) = 3.03 \text{ W/cm}^2$

Schlussfolgerungen:

- Der externe Widerstand kann in dieser Konstruktion für Motorleistungen von 500 W bis 3 kW verwendet werden.
- Der Widerstand hat eine nutzbare Leistungsdichte von 2.61 W/ cm²
- Die thermische Zeitkonstante beträgt 2.43 min
- Der Temperaturkoeffizient beträgt $\alpha = 0.0034$

7.3 Rotorgrößen**Rotorstrom und -spannung bei unterschiedlichen Aussteuerungen (duty cycle):**

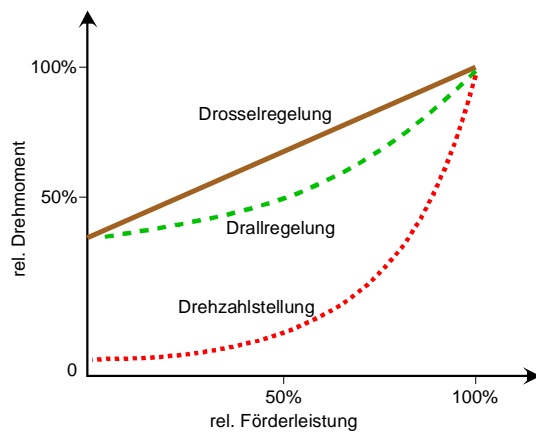
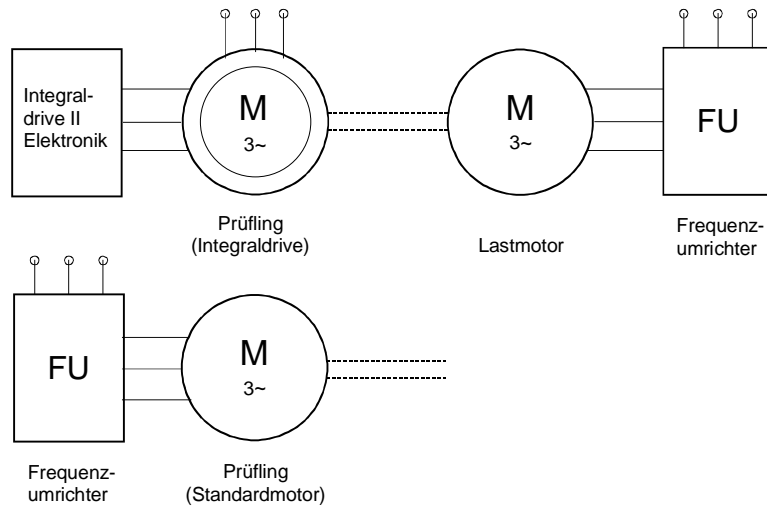
Strom (rot) und Spannung (blau) bei 20 % duty cycle bei 80 % duty cycle

Durch die Gleichrichtung im Rotorkreis entstehen Stromüberschwingungen von 6-facher Rotorfrequenz. Auf Grund dieser Stromüberschwingungen erhöhen sich die Rotorverluste um etwa 3%, was als unkritisch für die Energiebilanz des Gesamtsystems anzusehen ist.

7.4 Drehzahlstellung und Leistungsbilanz**Versuchsaufbau:**

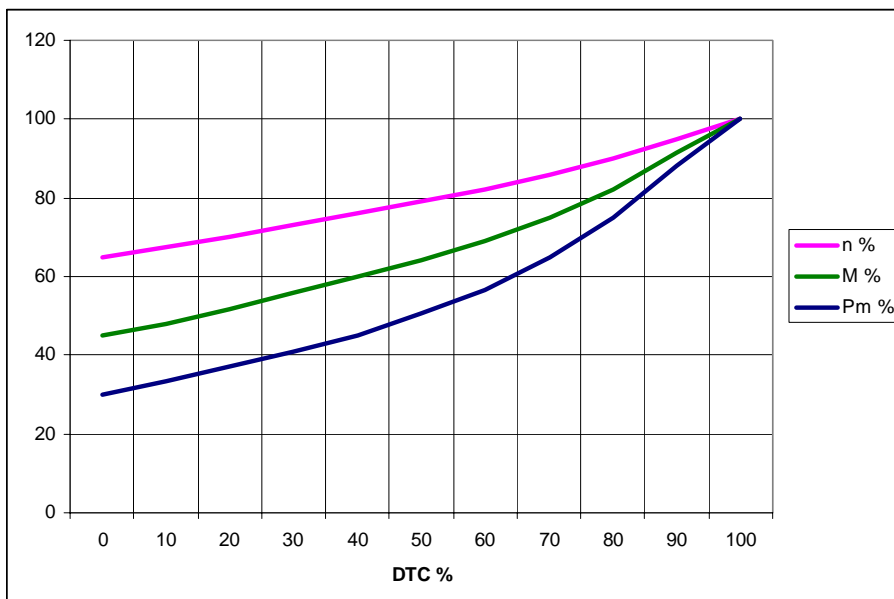
Der Prüfling (Integraldrive, Standardmotor) wird mechanisch mit einem umrichter gespeisten Asynchronmotor (Lastmotor) gekoppelt. Der Lastmotor wird moment geregelt betrieben. Damit können durch verschiedene in der Software hinterlegte Charakteristiken die Zusammenhänge zwischen Moment und Förderleistung für verschiedene Luftstrom-Steuerverfahren (Drehzahlstellung, Drall- oder Drosselregelung) nachgebildet und die Verfahren energetisch verglichen werden (vgl. Bild). Bei Prüfung des Standardmotors wird dieser mit oder ohne Frequenzumrichter betrieben.

Zur Auswertung der Leistungsbilanz werden die Netzgrößen des Prüflings (Ströme, Spannungen) und die im Last-Frequenzumrichter generierte mechanische Leistung, berechnet aus Drehmoment und Drehzahl, aufgezeichnet.



Moment-Volumenstrom-
Charakteristiken für verschie-
dene Luftstromsteuerverfah-
ren

Stellbereich:



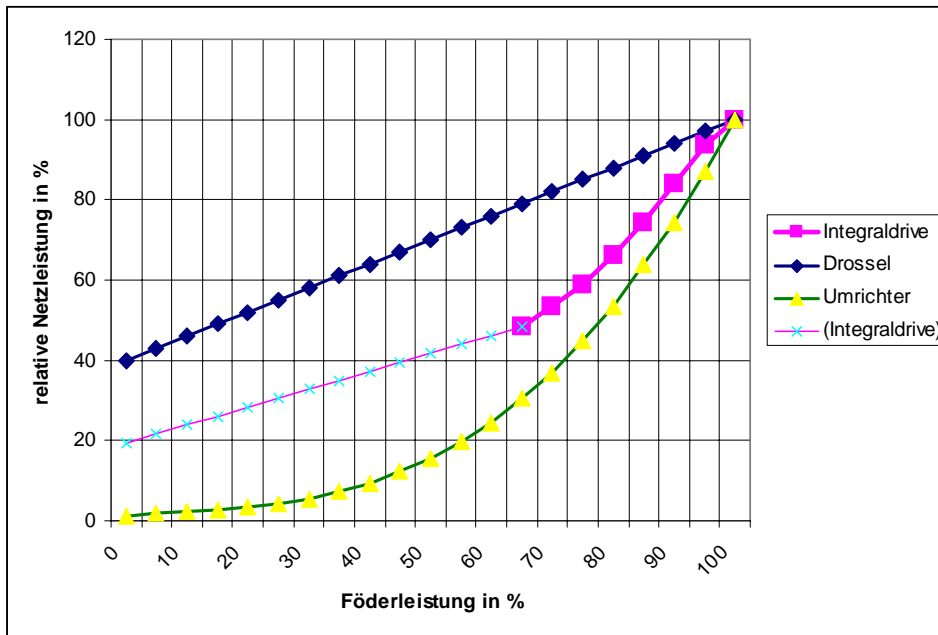
Drehzahl-, Moment- und
Leistungs-Stellbereich
über Duty-Cycle

Mit der für den Prototyp vorgenommen Dimensionierung des externen Widerstandes wird der im Bild gezeigte Stellbereich für Drehzahl, Moment und Leistung überdeckt. Für die zugrunde gelegte Lüftercharakteristik ergibt sich, dass, obwohl mit 35 % nur eine eingeschränkter Drehzahlbereich erreicht wird, mit dieser Dimensionierung 70 % der Antriebsleistung abgedeckt werden.

Energiebilanz

Das Integraldrive 2 Steuerverfahren ist verlustbehaftet, der Antrieb isoliert betrachtet weist daher einen schlechteren Wirkungsgrad als ein Umrichterantrieb oder ein Konstant-Drehzahlantrieb (bei Drosselsteuerung) auf. Zum energetischen Vergleich muss allerdings die Gesamtbilanz herangezogen werden mit der resultierenden Förderleistung als Bezugsgrösse. Die entsprechende Auswertung der Messungen zeigt das folgende Bild mit den Messwerten in angefügter Tabelle.

n [1/min]	Förder- leistung [%]	P _{mech} [W]	P _{netz} Drossel [W]	P _{netz} Drossel [%]	P _{netz} Umrichter [W]	P _{netz} Umrichter [%]	P _{netz} Integraldr. [W]	P _{netz} In- tegraldr. [%]
0	0	0	1342	40.0	40	1.2	620	18.8
71	5	1.5	1443	43.0	60	1.8	692	21.0
141	10	6.5	1544	46.0	80	2.4	763	23.1
212	15	12	1644	49.0	95	2.9	835	25.3
282	20	33	1745	52.0	111	3.3	906	27.5
353	25	48	1846	55.0	145	4.3	978	29.6
424	30	95	1946	58.0	179	5.3	1049	31.8
494	35	130	2047	61.0	240	7.2	1121	34.0
565	40	213	2148	64.0	306	9.1	1192	36.1
635	45	280	2249	67.0	410	12.2	1264	38.3
706	50	402	2349	70.0	513	15.3	1335	40.5
777	55	505	2450	73.0	665	19.7	1407	42.6
847	60	675	2551	76.0	818	24.4	1478	44.8
930	65	850	2651	79.0	1025	30.5	1550	47.0
1000	70	1056	2752	82.0	1239	37.0	1706	51.7
1065	75	1238	2853	85.0	1525	45.0	1885	57.1
1140	80	1505	2953	88.0	1791	53.4	2120	64.2
1210	85	1785	3054	91.0	2140	64.0	2378	72.1
1280	90	2120	3155	94.0	2491	74.3	2690	81.5
1360	95	2540	3255	97.0	2900	87.0	3000	90.9
1412	100	2845	3356	100.0	3352	100.0	3300	100.0



Energiebilanz eines Lüfterantriebs mit Integraldrive 2, Umrichter und Drosselsteuerung

Der Integraldrive 2 Stellbereich wurde durch eine Drosselsteuerung bis auf Drehzahl Null verlängert (dünne Linie). Mit dem Integraldrive-Verfahren werden im Drehzahlstellbereich bis zu 60 % des Optimums (Umrichter) erreicht, unterhalb des Drehzahlstellbereichs etwa 50 %.