



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B

Wärmetauscher und Motgen

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Philipp Brückmann, Brückmann Elektronik**  
Bahnhofstrasse 17, 7260 Davos Dorf,  
[brueckmannelektronik@bluewin.ch](mailto:brueckmannelektronik@bluewin.ch) , [www.brueckmann-el.ch](http://www.brueckmann-el.ch)

**Iván Cyphelly, Cyphelly & Cie**  
POB18, 2416 Les Brenets,  
[cyphe@ran.es](mailto:cyphe@ran.es) , [www.alternativascmr.com](http://www.alternativascmr.com)

**Markus Lindegger, Circle Motor AG**  
Tannackerstrasse 25, 3973 Gümligen,  
[info@circlemotor.ch](mailto:info@circlemotor.ch) , [www.circlemotor.ch](http://www.circlemotor.ch)

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

BFE-Bereichsleiter, [felix.frey@bfe.admin.ch](mailto:felix.frey@bfe.admin.ch)

BFE-Projektnummer: 100985

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) und [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Ausgangslage</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Funktionsnachweis der Wärmetauscher</b> .....	<b>6</b>
Übersicht über das BOP-B-Interface .....	6
Der Plattentauscher .....	6
Der Sprühtauscher .....	10
<i>Flüssigkeitströpfchen als Wärmeträger</i> .....	11
<i>Flüssigkeitsmanagement, Auflösung der Luft in der Flüssigkeit</i> .....	12
Die Geräte an der Peripherie .....	13
Schlussfolgerungen.....	13
Kooperationen .....	14
<b>3. Motgen 24V / 1500W</b> .....	<b>15</b>
Ziel der Arbeit.....	15
Vorgehen.....	15
Ergebnisse .....	16
<i>Mechanischer Aufbau des Motgens</i> .....	16
<i>Die Wicklungen</i> .....	17
<i>Messeinrichtung</i> .....	18
<i>Messergebnisse</i> .....	19
Auswertung der Messergebnisse.....	20
Schlussfolgerungen.....	21
<b>Referenzen</b> .....	<b>22</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>23</b>
Zeichnung des Motgen.....	23
Messresultate Modell-Motor 1:2.....	24
Messresultate mit Wellenwicklung .....	25
Messresultate Motgen mit 18-Spulenwicklung.....	26
Messresultate Circle Motor Prototyp genutzt.....	27
Stromversorgung.....	27
Elektronik.....	29
Drehmomentwaage .....	32

## Zusammenfassung

Frühere Arbeiten zum Thema Energiespeicherung mit Druckluft haben gezeigt, dass im wesentlichen zwei Baugruppen des Wandlers BOP-B einer näheren Untersuchung bedürfen: Der **Wärmetauscher in den Arbeitsräumen** sowie der **Motor/Generator (Motgen)**.

Beim BOP-B handelt es sich im Prinzip um einen hocheffizienten Kompressor bzw. Druckluftmotor. Dieser kann aber nur dann effizient arbeiten, wenn die Kompression und Expansion der Luft weitgehend isotherm erfolgen. Deshalb sind in den Arbeitsräumen Wärmetauscher zu integrieren, welche in Verbindung mit Flüssigkolben den erforderlichen Wärmetransport gewährleisten.

Erste Versuche haben gezeigt, dass die gewählten Wärmetauscher thermisch den Anforderungen genügen. Es hat sich aber auch gezeigt, dass es im Umfeld des Flüssigkolbens noch einige unerwartete Effekte gibt, welche eine Weiterentwicklung der Versuchsanordnung erfordern. In einem Zusatzauftrag werden diese Effekte näher untersucht.

Als zweiter Teil des Projektes sollte im Hinblick auf eine mögliche Anwendung des BOP-B Speichers in autonomen Stromversorgungen ein Motor/Generator (Motgen) mit möglichst über 90% Wirkungsgrad (inkl. Elektronik) für eine 24V / 1500W-Anlage entwickelt werden kann.

Der gewählte Ansatz einer eisenlosen Maschine brachte leider nicht den gewünschten Erfolg. Die Eliminierung der Eisenverlusten wurde durch andere Verluste (Luft und Wirbelströme im Kupfer) wieder aufgehoben. Dennoch konnten wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden.

Als Nebenprodukte der Motgen-Entwicklung entstanden eine praxistaugliche EC-Motorelektronik für bis zu 70A Dauer-Ausgangstrom sowie eine unkonventionelle Drehmoment-Messeinrichtung, welche sich beim Ausmessen der Prototypen sehr gut bewährt hat.

## Abstract

Earlier projects about compressed air energy storage revealed two elements that need further development: The **heat exchanger in the working chambers** and the **motor/generator (motgen)**.

The BOP-B is in fact a high efficient compressor or air motor. But it can only work efficiently if the compression or expansion of the air takes place in a mostly isothermal way. Therefore heat exchangers have to be placed in the working chambers for a good heat exchange to the environment.

First tests revealed that the chosen heat exchanger fulfils the thermal expectations. But there are some strange effects around that liquid piston system, which need further development of the test infrastructure. Therefore a further project is launched for finding out more.

For a possible application of the BOP-B as a storage in small stand alone systems, in a second part a high efficient motor/generator (motgen) should be developed. The goal was set to 90% efficiency (including power electronics) in one direction at a rated voltage of 24VDC and 1500W input power.

The chosen approach of a ironless machine was not successful. The elimination of the iron losses was abolished by other losses (aerodynamic and eddy losses in copper). Nevertheless substantial perceptions could be gained.

As a by product of the actual motgen development a reliable 70A EC-motor control and an unconventional torque measurement equipment were developed. They proved to be very useful for testing the prototypes.

## 1. Ausgangslage

Die Berichte "Einsatz von Druckluftspeichersystemen" sowie "Technische Grundlagen der Druckluftspeicherung" ([1] und [2]) haben aufgezeigt, dass die Druckluft-Speichertechnik vom Prinzip her sehr geeignet ist, einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Energiewirtschaft zu leisten. Alle regenerierbaren Energien (Sonne, Wind, Wellen, Erdwärme etc.) sind nämlich auf eine wirtschaftliche Speichertechnik zwingend angewiesen, da sich Energieerzeugung und -verbrauch naturgemäß nie vollständig synchronisieren lassen.

Vorteile der Druckluft-Speichertechnik sind insbesondere die relativ einfache, robuste Technik, die auf vielen bereits gut eingeführten Bauteilen basiert, sowie die gute Oekoverträglichkeit, da praktisch keine toxischen Materialien benötigt werden. Dazu kommen weitere Vorteile wie etwa die einfache Überwachung des Ladezustandes, die Entkopplung von Leistungsteil und Speicher, die einfache Erweiterbarkeit usw.

Als künftige Haupt-Einsatzgebiete präsentieren sich der Ersatz von Bleibatterien in dezentralen Stromversorgungen (was vor allem für Entwicklungsländer interessant ist) sowie die dezentrale Netzpufferung zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und zur Entlastung der Verteilnetze. Dazu kommen weitere Anwendungen, wie etwa unterbrechungsfreie Stromversorgungen für Computer- und Sicherheitssysteme, die auf einen zuverlässigen Energiespeicher zwingend angewiesen sind.

Kernstück einer solchen Druckluft-Speicheranlage ist der Wandler, in welchem die Luft verdichtet bzw. entspannt wird (Interface BOP-B). Das an sich sehr einfache Speicherprinzip kann aber nur dann effizient funktionieren, wenn die Kompression bzw. Expansion der Luft weitgehend isotherm erfolgen. Daran scheiterte diese Technologie bisher. Theoretisch sind in den vorangehenden Arbeiten Konzepte für einen effizienteren Wärmetausch in den Arbeitsräumen des Wandlers bereits erarbeitet worden, mit diesem Projekt soll nun der experimentelle Funktionsnachweis erbracht werden.

Im weiteren hat sich gezeigt, dass der Motor-Generator (Motgen) als Schnittstelle zwischen elektrischem Teil und Hydraulik wirkungsgradmäßig das schwächste Glied ist, vor allem im Leistungsbereich unter 2 kW (als Batterieersatz in Inselanlagen). Hier sollte im Rahmen dieses Projektes neue Konzepte erprobt werden.

Dem Umstand von zwei relativ unabhängigen Teilprojekten Rechnung tragend, wird der Schlussbericht in zwei Teile aufgeteilt, nämlich einen ersten Teil "Funktionsnachweis der Wärmetauscher" und einen zweiten Teil "Motgen 24V / 1500W".

## 2. Funktionsnachweis der Wärmetauscher

Federführung und Autor: Iván Cyphelly

Ein Schlüsselement für die erfolgreiche Realisierung des BOP-B-Wandlers sind die Wärmetauscher in den Arbeitsräumen. Bei Projektbeginn existierten bereits drei konkrete Ideen, wie diese Wärmetauscher realisiert werden könnten (Plattenstapel, Wickel, Sprühsystem).

Projektziel war, eine Antwort auf folgende Fragen zu erhalten:

1. Welche Wärmetauscher-Bauart ist die geeignetste für BOP-B ?
2. Gibt es unerwartete Schwierigkeiten, welche eine Realisierung massiv erschweren?
3. Welcher Gesamtwirkungsgrad kann aufgrund der Versuche erwartet werden?

### Übersicht über das BOP-B-Interface

Für das bessere Verständnis der folgenden Ausführungen soll hier kurz das BOP-B-Interface vorgestellt werden (siehe auch Fig. 1) und zwar nur für den Pumpbetrieb (also Laden des Speichers).

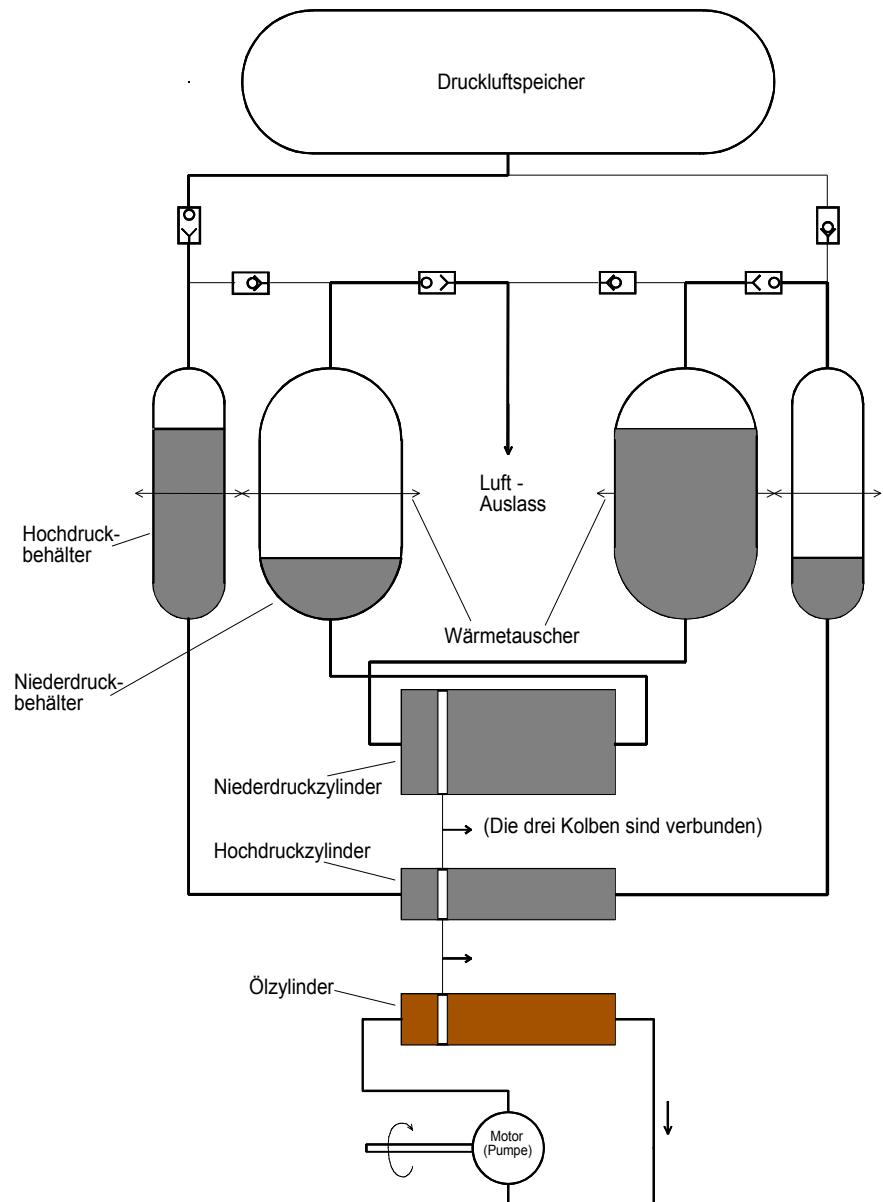
Es handelt sich im Prinzip um einen zweistufigen Kompressor mit Flüssigkolben. Das Verhältnis von Hoch- und Niederdruck-Zylindervolumen ist dabei noch nicht fest gegeben, verschiedene Variationen sind möglich und Gegenstand weiterer Optimierungsschritte.

Gemeinsam ist beiden Zylindern jedoch, dass in ihnen Wärmetauscher integriert sind, welche die anfallende adiabatische Erwärmung der Luft auffangen und an die Verdrängerflüssigkeit weitergeben. In den getätigten Untersuchungen interessierte vor allem das Verhalten im (kleineren) Hochdruckzylinder, da dort die grösste Wärmeleistung auf kleinem Volumen anfällt. Deshalb ist im Versuchsaufbau auch nur ein Hochdruckzylinder vorhanden, der Vordruck wird durch eine Stickstoff-Druckflasche mit einstellbarem Druckreduzierventil bereitgestellt (s. Schema Fig. 2).

### Der Plattentauscher

Die Wärmetauscher-Problematik wurde von mehreren Seiten angegangen, und zwar experimentell für den *Plattentauscher* (Stapel und Wickel), analytisch für den *Sprühtauscher* und konstruktiv für die *Peripherie des Flüssigkolbens* (*Ventiltechnik, Aufbereitung der Flüssigkeit, Ankoppelung an Krafteinheit*). Alle Arbeiten sind im Wesentlichen abgeschlossen, bis auf die Variationen in der Plattentauschertechnik, wo bisher nur mit einer Flüssigkeit und einer (Wärmetauscher-)Patrone gefahren wurde. Die anderen Kombinationen werden Gegenstand des erwähnten Anschlussprojektes, da z. B. nur die Wicklung eines neuen Blechtyps samt Beschaffung oft einen Monat in Anspruch nimmt. Allerdings sind nun die Ausgestaltungen bekannt und können auf breiterer Front in Auftrag gegeben werden.

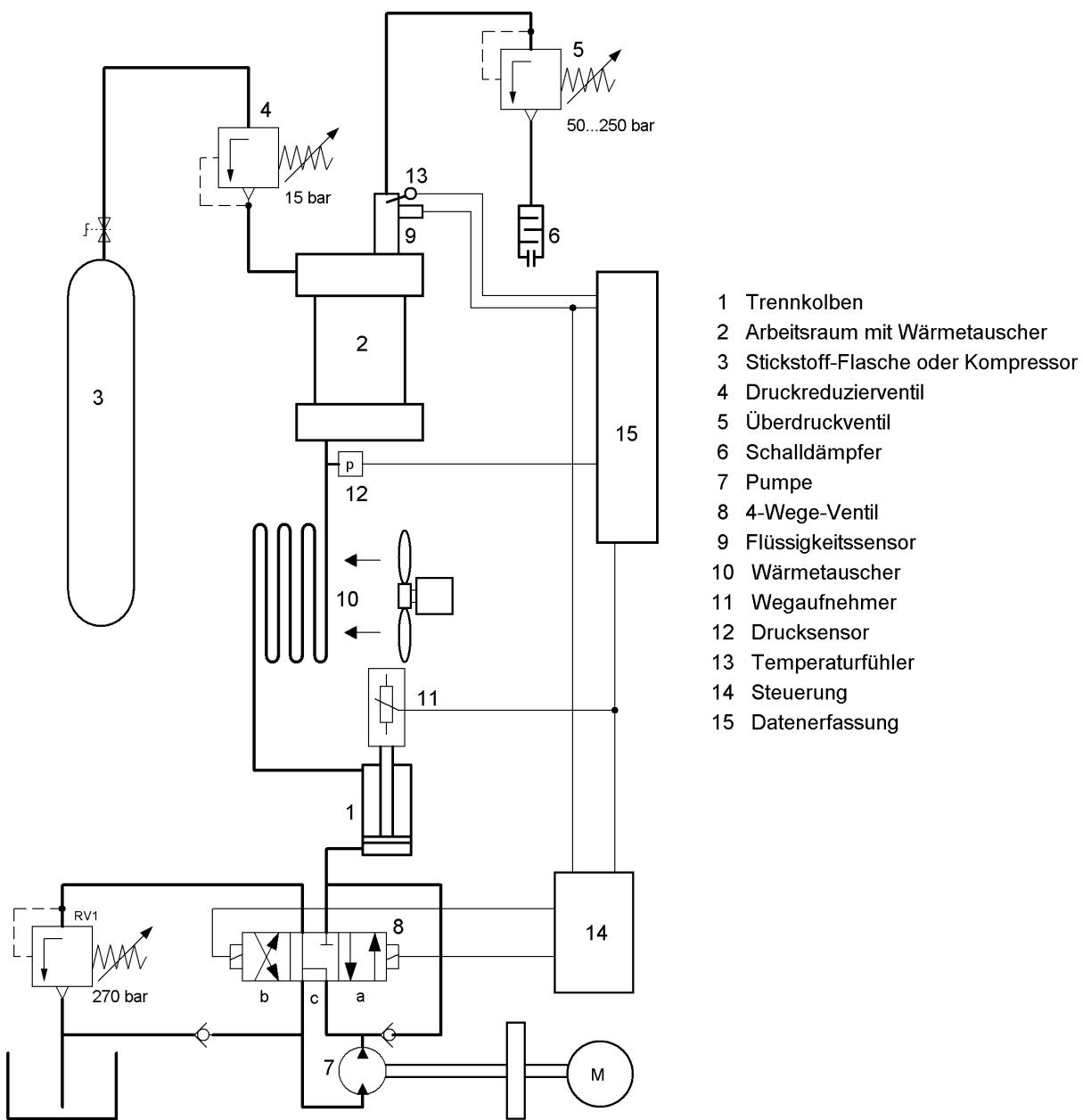
Trotz der erheblichen Verzögerung in der Inbetriebnahme des Tauscherprüfstandes konnte die Thematik dieses zentralen Elementes und die verschiedenen Hürden aufgelistet werden und in Vorversuchen klassifiziert werden, allerdings nur mit Wasser als Kolbenflüssigkeit (der Einsatz anderer möglicherweise besser geeigneten Flüssigkeiten wird dank der Konstruktion eines speziellen Weichenvents für den Flüssigkeitsanschluss des Tauscherkolbens erleichtert, der für eine drucklose Aufbereitung der Flüssigkeit sorgt und somit auch Kondenswasser abweisende Flüssigkeiten ermöglicht). Der Aufbau erlaubt den Betrieb von verschiedenen Rollenpatronen aus Blech mit unterschiedlichen Spalt- und Blechdicken, Wickelverfahren (freitragend oder durch Noppen auf Abstand gehalten) und Materialien.



*Fig. 1: BOP-B Interface (gez. Menhardt)*

Die wichtigsten zu untersuchenden Themen sind:

- Temperaturmessung der Luft am druckseitigen Austritt
- Volumetrische Messung der austretenden Luft (Erfassung von Lösungsverlusten)
- Hygroskopische Messung der austretenden Luft
- Flüssigkeitsdruckabfall in axialer Richtung und beim Zuströmen zum Ventil
- Luftdruckabfall in axialer Richtung und beim Zuströmen zum Ventil
- Isothermiegrad während des ganzen Hubes (mittels Hub/Druck-Messung)
- Einfluss der Luftfeuchte auf die Hauptparameter
- Einfluss der Temperatur auf die Hauptparameter
- Dichtheit der Ein- und Auslassventile in Funktion der Bauart
- Veränderungen der Hauptparameter in Abhängigkeit der Taktfrequenz
- Konstruktive und chemische Unterdrückung der Blasenbildung



**Fig. 2 Hydraulics schema Versuchsaufbau** (gez: Brückmann)

Der Plattenauscher als Teil des Flüssigkolbens ist also in seiner Ausgestaltung ein entscheidender

Qualitätsfaktor des Systems, auch im direkten Zusammenhang mit dem Zylinder und der Peripherie. Viele Aspekte erheischen originelle Lösungen zwecks Erfassung der internen Vorgänge und Messung der relevanten äusseren Parameter; so ist die Temperaturmessung am Austritt wegen der kurzen Zeitspanne von unter 0.25s nur indirekt messbar, ebenso wie die volumetrische Messung, die hier durch das Aufblasen eines Kinderballons vorgenommen wird (gepaart mit dem Einfügen eines Hygrometers im Ballon, der durch die durchsichtige Ballonwand einsehbar ist und durch jeweilige Abkopplung eine genügende Messzeit erreicht). Die direkte Messung des Isothermiegrades bedingt sehr genaue Hub- und Druckmessungen, wogegen globale Aussagen durch das Aufpumpen eines kleinen Speichers gemacht werden können.

Um den Hochdruckteil getrennt vom Vordruckteil und mit variablem Vordruck untersuchen zu können, wird als Vorkolben-Ersatz eine Druckgasflasche eingesetzt, deren Reglereinstellung zwischen 5 und 15 bar alle Kolbenverhältnisse (= Verhältnis von Anfangs- zu Enddruck) simulieren kann. Hierbei muss

der Einlass einen aufwirbelnden Einspritzeffekt vermeiden, da bei Flüssigkeiten wie Wasser (wo die Luftlöslichkeit gross ist, aber die Diffusionsgeschwindigkeit klein) jegliche Blasenbildung die Diffusionsfläche ungemein vergrössert und zu volumetrischen Verlusten führt.



*Fig. 3 Versuchsaufbau (Foto: Brückmann)*

Die eigentliche Tauscherfunktion erlaubt eine flexible interne Dimensionierung der Patrone, da lediglich die Tauschfläche vorgegeben ist: die Blechdicke (bedingt die thermische Kapazität der Wicklung, sowie deren axiale Leitfähigkeit) ist frei wählbar (Grenze: Preis, Gewicht, Volumen), ebenso die eigentliche Kolbenfläche (Grenze: Druckverluste bei grossen Hub-zu-Kolbenfläche-Verhältnissen, grosse Diffusionsfläche bei grossen Kolbenflächen). Schon bescheidene Massnahmen wie die freitragende Bauweise (also ohne Noppungen oder anderen Hürden, die eine saubere Trennfläche zwischen Luft und Flüssigkeit verhindern) verbessern merklich die allgemeine Funktionstüchtigkeit des Flüssigkoltbens, so dass eine Verschiebung der jeweiligen Anteile der Kompressionsarbeit von der Vordruckseite auf die Hochdruckseite bis auf solche Vordruckwerte möglich erscheint, bei denen die Vordruckthermik ohne besondere Tauschermassnahmen möglich wird, wie dies in der Simulation mit verschiedenen Kolbenverhältnissen (jeweils im Kompressorbetrieb) zum Ausdruck kommt:

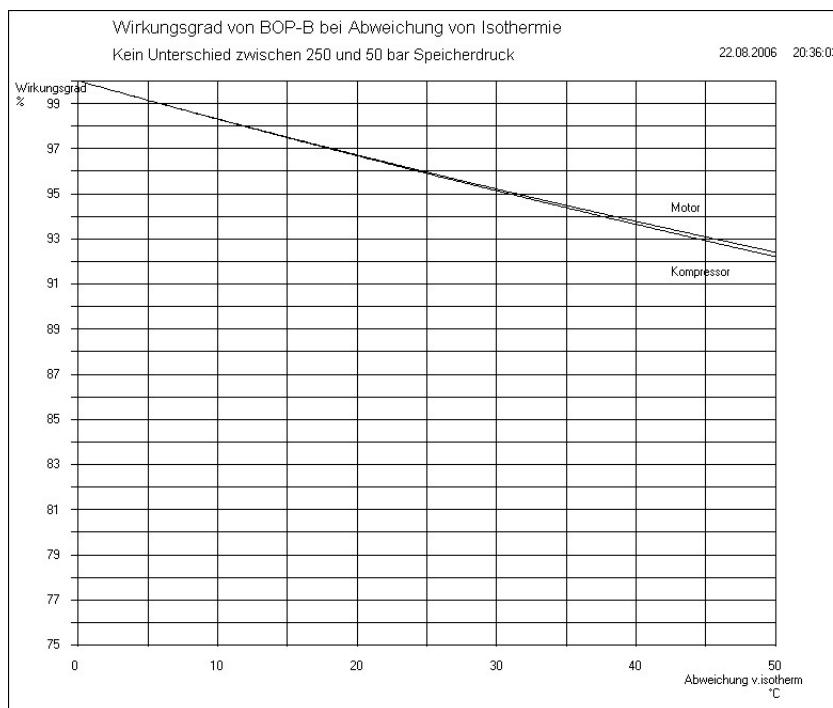
Kolbenverhältnis	Niederdruck-Temp.	Druck Phase 1	Eta
15	431 °C	15,3 bar	82,6%
7,5	285	7,6	90,5
5	214	5,1	93,8

Wir sehen also, dass bei einem Vordruck von 5 bar ein thermodynamischer Wirkungsgrad von 93,8% ohne Wärmetauscher im Niederdruckzylinder möglich wird, vorausgesetzt dass der Tauscherteil die Kompression von 5 auf 200 bar mit einem  $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$  bewältigt. Die Temperaturspitze von 214 °C bezieht sich auf ein sehr kleines Luftvolumen bei reinster adiabatischer Simulation, in Wirklichkeit dürfte dieser Wert kaum funktionsbestimmend sein. Das Ziel sollte also sein, den Tauscher auf ein Kompressionsverhältnis von 1:40 zu trimmen (jetzt: 1: 15) indem man noch die Verbesserungsreserven der Rolle sowie der Peripherie voll ausschöpft, dies wird vermutlich nur mit einer angepassten Flüssigkeit möglich sein.



*Fig. 4: Blick auf den Wärmetauscher durch das Loch für das Ausgangsventil (Foto: Brückmann)*

Abschliessend soll die Charakterisierung der Rolle des Wärmetauschers bezüglich des Wirkungsgrades eingefügt werden, um die verschiedenen Aussagen zu untermauern: in Fig. 5 wird der globale Zusammenhang zwischen kompressiver Erwärmung bzw. motorischer Kühlung dargestellt, wobei z.B. eine Temperaturschwankung von 5 °C einem thermodynamischen Wirkungsgrad von 99% entsprechen würde, wobei die Annahme eines rein adiabatischen Vorkompression auf 5 bar einer mittleren Temperaturschwankung von 40 °C gleichkommt. Bemerkenswert ist hierbei, dass diese Kurven druckunabhängig sind, d.h. dass diese Diagramm ebenso für 50 bar Betriebsdruck gilt wie für 200 bar.



*Fig. 5: thermodynamischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperaturschwankung (gez. Menhardt)*

## Der Sprühtauscher

Eine Tauschermöglichkeit besteht darin, die Wärmekapazität von Flüssigkeitströpfchen eines Sprühnebels zu benutzen. Dies kann z.B. dadurch geschehen, dass in die bei der Kompression erwärmte Luft ein Sprühnebel aus Tröpfchen eingespritzt wird.

Thermodynamisch scheint dies zunächst ein gangbarer Weg. Die Tröpfchen stellen allerdings im Ablauf des Flüssigkeits- und Luftransportes ein Problem dar. Sie bilden neben der Flüssigkeit, dem „Flüssigkolben“ und der Luft, um die es eigentlich geht, eine dritte Phase, die bald in allen Räumen des Systems auftritt. Die Probleme sind im Abschnitt „Flüssigkeitsmanagement“, dargestellt. Wenn dieses Problem überhaupt zu lösen ist, dann nur mit großem apparativem Aufwand und Verlusten an Wirkungsgrad. Zudem stellt im mechanischen Aufbau der Einbau von Spritzdüsen eine beträchtliche Schwierigkeit dar.

### **Flüssigkeitströpfchen als Wärmeträger**

Die Tröpfchen bieten eine große Fläche für Wärmeübergang.  $100 \text{ cm}^2$  Flüssigkeit, verteilt in Tröpfchen mit  $10\mu$  Durchmesser, bieten eine Oberfläche von  $108 \text{ m}^2$ . Nimmt man eine Wärmeübergangszahl von  $3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  an, so nehmen diese Tröpfchen aus einer um  $10^\circ\text{C}$  wärmeren Luft  $3200 \text{ W}$  Wärme auf. Diese Zahl ist nur eine sehr grobe Schätzung. Einerseits ist der Temperaturunterschied nicht über den gesamten Zyklus gleich, andererseits ist die Tröpfchengeschwindigkeit, die anfangs vielleicht hoch ist, nicht berücksichtigt. Die Zahl liegt aber in der Nähe der theoretisch benötigten Wärmeübertragung von etwa  $2500 \text{ W}$ .

Die Problematik eines Sprühtauschers soll anhand eines Beispieles dargestellt werden (siehe dazu die Anordnung in Fig. 1, BOP-B).

Betrachten wir den Motorbetrieb, und starten in dem Moment, wo bei komplett mit Flüssigkeit gefülltem Hochdruckzylinder (mit 1 Liter Nutzvolumen) das Ventil zum Druckspeicher (welcher mit 200 bar gefüllt ist) geöffnet wird. Durch den Druck wird nun der Flüssigkolben nach unten gedrückt (wobei mechanische Leistung abgegeben wird). Sobald nun  $75\text{cm}^3$  Wasser ausgestossen worden sind, wird das Einlassventil geschlossen und der eigentliche Entspannungsprozess der Luft beginnt. Dabei wird angenommen, dass der Volumenstrom der Kolbenflüssigkeit über den ganzen Entspannungsvorgang (Dauer 1.5s) konstant bleibt (durch ein Schwungrad am Hydromotor gewährleistet). Bei ideal isothermer Entspannung würde somit am Ende des Zyklus, also wenn alle Flüssigkeit aus dem Zylinder verdrängt worden ist, ein Restdruck von etwa 15 bar übrigbleiben.

Es ist nun die Aufgabe der eingesprühten Wassertröpfchen, die adiabatische Abkühlung während dieser Entspannung aufzufangen. Rechnerisch kann gezeigt werden, dass bei einer zulässigen Abkühlung des eingespritzten Wassers von  $10^\circ\text{C}$  während dem Hub insgesamt  $180 \text{ cm}^3$  eingespritzt werden müssen, was immerhin 18% des Nutzvolumens entspricht! Da die erforderliche thermische Leistung am Anfang der Entspannung wesentlich grösser ist als gegen Ende, sollte die Einspritzung idealerweise mit variabler Sprühleistung erfolgen, was konstruktiv sehr aufwendig ist. Figur 6 zeigt den simulierten Verlauf einer solchen Entspannung mit angepasster Einspritzleistung.

Wird hingegen mit einer konstanten Einspritzleistung von  $8 \text{ l/min}$  gearbeitet, so ergibt sich ein Verlauf nach Figur 7. Am Anfang der Entspannung kommt es zu einem Einbruch der Temperatur, welcher allerdings nur kurz andauert und noch keine Vereisungsscheinungen zur Folge haben dürfte.

Ein Sprühnebel kann mit Hilfe von Sprühdüsen erzeugt werden, die in vielen Varianten für die unterschiedlichsten Anwendungen angeboten werden. Um Tröpfchen mit einem Durchmesser von  $10 \mu\text{m}$  herzustellen, wird ein Düsendruck von grösstenteils  $10 \text{ bar}$  benötigt. Um ein Volumen von  $0,18 \text{ Liter}$  in  $1.5\text{s}$  zu zerstäuben werden nach diesem Beispiel etwa  $200 \text{ W}$  benötigt. Vom Standpunkt des Wirkungsgrades ist der Einsatz von Wassertröpfchen also gerade noch vertretbar. Mechanisch bereitet der Einbau von Düsen wahrscheinlich Schwierigkeiten, da Einzeldüsen nur einen Durchsatz von  $1 \text{ Liter/min}$  schaffen. Selbst bei konstanter Einsprühung werden im besprochenen Fall  $8 \text{ Liter/min}$  benötigt.

Was den Wärmetransport betrifft, dürfte der Einsatz von Sprühnebel also zu befriedigenden Resultaten führen.

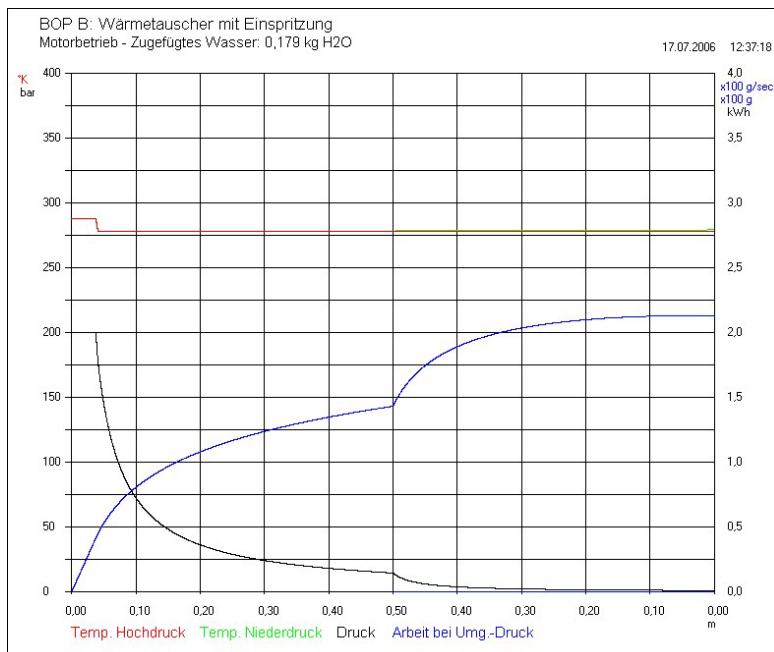


Fig. 6: Einspritzung I (gez. Menhardt)

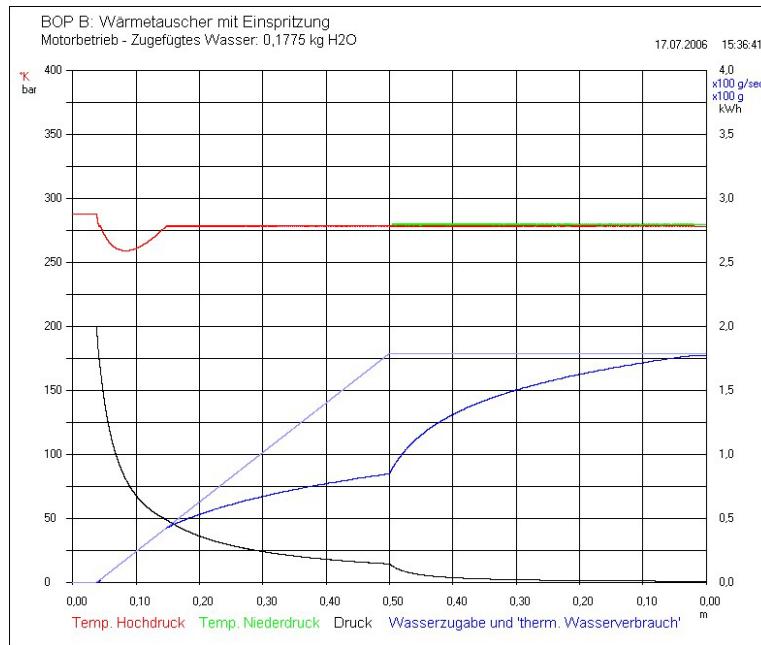


Fig. 7: Einspritzung II, konstanter Strom (gez. Menhardt)

### Flüssigkeitsmanagement, Auflösung der Luft in der Flüssigkeit

Das Einsprühen bedeutet eine wesentliche Veränderung der Volumina. Um im Motorbetrieb ein Delta-T von 10°C einzuhalten sollen z.B. 180 cm<sup>3</sup> Wasser eingesprührt werden. Dem steht gegenüber, dass das Volumen der eingespeisten Hochdruck-Luft nur 75 cm<sup>3</sup> bei 200 bar beträgt.

Während der Einspritzung verändert sich der Druck von 200 bar auf etwa 15 bar. Die Düse soll aber mit einer gleichbleibenden Druckdifferenz beaufschlagt werden. Die einzusprühende Flüssigkeit muss demnach aus dem Hochdruckteil des Systems, d.h. aus der Arbeitsflüssigkeit entnommen werden und über einen zusätzlichen Pumpvorgang der Düse zugeführt werden. So erreicht man, dass die Flüssigkeitsbilanz im System konstant bleibt.

Im Gegensatz zum Plattspeicher – wo die der Luft zugewandte diffusionsaktive Fläche klein gehalten werden kann um die reduzierte Diffusionsgeschwindigkeit auszunutzen – kann bei der Sprühung eine weitgehende Lösung der Luft nur durch die Wahl geeigneter Flüssigkeiten begegnet werden, beim Einsatz von Wasser mit einem Ostwald-Koeffizienten von  $\alpha = 0,023 \text{ g/Liter}$  ( $27,6 \text{ cm}^3$  pro Liter und bar bei  $25^\circ\text{C}$ ) würde bei den besagten  $180 \text{ cm}^3$  Sprühvolumen um 200 bar die Luft praktisch verschwinden. Somit ist lediglich bei tiefen Drücken ein Sprühbetrieb auf Wasserbasis mit annehmbaren Verlusten zulässig, wie z. B. beim isothermen Kompressor auf 8 bar von Herrn Laszlo Simon (BFE-Projekt 2712 aus dem Jahre 1999) oder in der Vordruckstufe der BOP-B, wobei letztere bei günstigen Kolbenverhältnissen gemäss der Darstellung im Abschnitt „Plattentauscher“ unter Umständen adiabatisch betrieben werden kann.

## Die Geräte an der Peripherie

Der Flüssigkolben – insbesondere im Plattentauschermodus – scheint also eine Lösung für isotherme Verdichtung und Entspannung auf höhere Drücke mit annehmbaren Wirkungsgraden zu sein.

Leider ist die Flüssigkeitsübertragung nicht so anspruchslos wie eine Pleuel-Kolben-Verbindung: nicht nur muss die Flüssigkeit thermisch stabilisiert werden (z.B. mit Wärmetausch mit der Umgebung) *ohne Hochdruck-Wärmetauscher* der eine unerwünschte Erhöhung der Elastizität einbrächte, es soll aber auch eine ununterbrochene Aufarbeitung stattfinden, die eine permanente Entlüftung und Reinigung der Säule gewährleistet. Hierzu wurden besondere Ausgestaltungen von Weichenventilen konzipiert, die bei jeder Umkehrung der Säulenbewegung ein definiertes Flüssigkeitsvolumen auf Umgebungsdruck schalten, so dass ein Niederdrucktauscher samt Dekantierbecken eingesetzt werden kann. In einer solchen Wartungseinheit können je nach Flüssigkeitstyp alle Verunreinigungen oder Kondenswassereinschlüsse ausgeschieden werden, was eine lange Lebensdauer ohne Betriebsunterbrüche sichert.

Auch an den anderen zwei Anschlüssen des Tauscherzyinders muss in totvolumenfreie Ventilkonzepte investiert werden: auf der Niederdruckseite muss das Sitzventil (nur diese Bauart ist mit Hochdruckluft zulässig) in das Blechpaket hinein öffnen, was zu einigen topologischen Klimmzügen zwecks Vermeidung des Bewegungsraumes des Sitzellers zwingt. Auf der Hochdruckseite muss diese Totraumvermeidung mit einer sparsamen elektrischen Ansteuerung kombiniert werden, was bei Sitzventilen eine Öffnung durch den Flüssigkeitsstrom bedingt, auch bei **motorischem Betrieb**: hier wird das Eindringen der Flüssigkeit durch Umspülung über das Ventil hinweg vorgesehen, mit dem Festhalten des Tellers mittels Haftmagneten in offener Stellung, so dass das Ausströmen der Luft aus dem Speicherteil auch nach der Richtungsumkehr der Säule entsprechend der Speisedauer des Haftmagneten aufrechtgehalten werden kann; beim **Kompressionsbetrieb** muss der Sitzteller erst nach dem Rückfluss der Umspülmenge aufliegen, was am einfachsten dank schwimmfähiger Ausgestaltung erreicht werden kann.

Es sei schliesslich darauf hingewiesen, dass die Steuerung der Tauschzyylinder-Ventile direkt an den Druckkammern der Triebkolben abgegriffen werden kann; werden jedoch die Tauschzyylinder mittels drehendem Pleueltrieb beaufschlagt liefert der Telleranschlag an den Haftmagneten das genaue Synchronisierungszeichen samt Füllgradinformation des Flüssigkolbenstranges, da der Zeitunterschied zwischen Telleranschlag und Totpunkt ein genaues Mass der Flüssigkeitsreserve darstellt.

## Schlussfolgerungen

Die ersten Kompressions-Versuchsreihen auf 150 bar mit Wasser als Flüssigkolbenmedium haben einen guten Wärmetausch bestätigt und eine überraschende Trockenheit am Ausstoss gebracht; die Schwierigkeiten liegen z.Zt. bei der luftfreien Füllung des Flüssigkolbenraumes, die eher bei dem Prüfungsaufbau denn im eigentlichen Tauscherzyylinder zu suchen sind, obschon einige innere Ausgestaltungen im Bereich der Ventile Lufteinschlüsse begünstigen, die Blasendispersierung zur Folge haben. Die Blasenbildung erhöht die Elastizität des Kolbens und begünstigt infolge erhöhter Trennfläche Luft/Flüssigkeit das Lösen der Luft in der Flüssigkeit, insbesondere wenn die Löslichkeit (wie bei Wasser) relativ gross ist. Somit kann bei Wasser nur dann ein zufriedenstellender Betrieb aufrechterhalten werden, wenn der Flüssigkeitsspiegel sauber definiert ist und damit die äusserst geringe Diffusionsgeschwindigkeit die Lösungsvorgänge fast zum erliegen bringt. Es sind Versuche mit anderen Medien vorgesehen, da mit Wasser durch die Frostgefahr eine klare Grenze zu tieferen Temperaturen gezogen ist. Dank dem Überhang an thermischer Effizienz des Plattentauschers wird das mögliche Spektrum der Betriebsflüssigkeiten erweitert, zumal lediglich ca. 1 Liter Flüssigkeit pro kW erforderlich sind.

Das Thema dieses Projektes ist ja die Abklärung des eigentlichen Tauscherzyinders mit seinen Hilfstrieben. Ist erst einmal dieses Element klar definiert, soll es in einen Wandler integriert werden. Hier

sind sehr viele Wege in der Gestaltung offen, es muss vorerst aus einigen Kombinationen gewählt werden, die natürlich auf die Feinabstimmung des Tauscherzylinders Einfluss nehmen; die Thematik des Kolbenverhältnisses und des harmonischen Bewegungsablaufes (Drehbewegung) wurden schon im obigen Text erwähnt.

## Kooperationen

Die Versuchsreihen in der Wickeltechnik wurden von der Fa. NEWROCK in Zruc (CZ) im Lohnverhältnis ausgeführt (nicht abgeschlossen).

Die Nachforschungen bezüglich Luft und Flüssigkeiten führt Prof. RELLER (Uni Augsburg, nicht abgeschlossen)

Die analytischen Untersuchungen und die Simulationen wurden von Dr. MENHARDT (Fa. Philoceram) in Wien im Lohnverhältnis ausgearbeitet (abgeschlossen)

Die Werkstattarbeiten am Zylinder/Prüfaufbau wurden im Lohnverhältnis von der Fa. COMEPRI in Baume-les-Dames (F) ausgeführt (abgeschlossen)

Nach den ersten Schritten bei der EPFL in Lausanne wurde die Erneuerung des Prüfaufbaus und die Versuchsreihen unter der Obhut von Herrn KUNZ an den Sitz von Cyphelly & Co in Cudrefin (VD) verlegt.

### **3. Motgen 24V / 1500W**

Entwicklung und Bau: Philipp Brückmann und Markus Lindegger

Autor: Ph. Brückmann

#### **Ziel der Arbeit**

Der Motgen ist zur Zeit dasjenige Glied der Kette, welches bei kleinen Leistungen (Inselanlagen) den Wirkungsgrad eines Druckluft-Speichersystems am stärksten einschränkt. Dies ist wesentlich durch die Ummagnetisierungsverluste im Stator-Eisenpaket bedingt. Alle bisher auf dem Markt erhältlichen Motoren sind bezüglich Grösse und Preis optimiert, nicht jedoch auf den Wirkungsgrad.

Ziel des Projektes ist es, ein oder mehrere Funktionsmuster eines hocheffizienten Motgens mit dazugehörender Elektronik zu entwerfen, zu bauen und auszumessen. Zur Diskussion stehen dabei sowohl eisenlose Konzepte sowie Varianten mit Eisenpulverkernen (in Anknüpfung an bereits getätigte Arbeiten (DIS 100 487)). Dabei wird ein Gesamtwirkungsgrad von Motor und Elektronik von über 90% (in eine Richtung) anvisiert, dies bei einer Brückenspannung von 24VDC (bzw. 22...28V) und einem Ausgangsleistungsbereich von 1.0 bis 1.5 kW. Die Drehzahl soll dabei im Bereich um 4500 U/min liegen.

#### **Vorgehen**

Am Anfang stand eine Konzeptstudie [4], in welcher bei Circle Motor AG verschiedene mögliche Bauformen auf ihre Eignung untersucht wurden. Parallel dazu wurde bei Brückmann Elektronik ein Konzept eines eisenlosen Axialfluss-Motors entworfen und ein 1:2-Modell davon gebaut und ausgetestet [4].

Aufgrund der Ergebnisse dieser Vorarbeiten entschlossen wir uns, den eisenlosen Axialfluss-Motor weiterzuverfolgen, konnte doch mit dem Modell bereits ein Wirkungsgrad von 84% erreicht werden (inkl. Elektronik).

Zur Durchführung der Messreihen musste zudem eine Mess-Infrastruktur aufgebaut werden, die der anvisierten Leistung gerecht wird:

- Stromversorgung 24V 80A mit Bremschopper
- Motor-Elektronik , Drosselpulen
- Bremse mit Drehmoment-Messeinrichtung für das Ausmessen der Kennlinien

Diese Hilfseinrichtungen sind bereits in den Teilberichten [2], [3], [4] und [5] beschrieben, werden aber der Einfachheit halber hier noch einmal im Anhang beschrieben.

Nach Abschluss der Vorabklärungen wurde ein Motor in Originalgrösse gebaut, welcher eine identische Wicklungsanordnung wie der Modellmotor aufwies (konventionelle, dreiphasige Wellenwicklung). Dieser erreichte praktisch den gleichen Wirkungsgrad wie der Modellmotor (84% inkl. Elektronik), was nicht den Erwartungen entsprach. Zudem erwies sich die Wellenwicklung wegen der erforderlichen Kreuzungen als schwierig herzustellen.

Aus diesen Erfahrungen heraus wurden andere Wicklungskonzepte untersucht: Spulenwicklungen mit 9 oder 18 Einzelspulen, welche geeignet zusammengeschaltet werden. Rechnerisch erwies sich, dass mit der 18-Spulen-Wicklung der geringste Innenwiderstand und der beste Kupfer-Füllfaktor erzielt werden kann.

Eine neue Wicklungsscheibe wurde gebaut, welche gegenüber der ersten Wicklung einen 40% geringeren Innenwiderstand aufweist. Um so enttäuschender war das Ergebnis: der Motor erreicht nur etwas über 80% Wirkungsgrad (inkl. Elektronik). Da die Zeit und die Mittel nicht mehr ausreichten, weitere Prototypen zu bauen, beschränkt sich diese Arbeit auf einen Versuch, die einzelnen Verluste zu analysieren und quantifizieren und Schlussfolgerungen daraus abzuleiten.

Als sich abzeichnete, dass das gewünschte Ziel nicht mit der eisenlosen Bauart zu erreichen ist, hat Herr Lindegger die genutete Bauart weiter untersucht und nach Optimierungen im Magnetkreis und in der Wickeltechnik gesucht. Als Folge davon wurde mit der gleichen Versuchseinrichtung ein Prototyp ausgetestet, welcher auf Anhieb 84% Gesamtwirkungsgrad erreichte, dies notabene bei wesentlich geringerem Bauvolumen. Dieser Motor entstand im Zusammenhang mit dem BFE-Projekt "Funktionsmuster eines Integral-Sppermotors im Leistungsbereich <1kW" (DIS 100915).

## Ergebnisse

### Mechanischer Aufbau des Motgens

Der Motgen ist als Axialfluss-Maschine aufgebaut, d.h. die Feldlinien des Erregerfeldes verlaufen parallel zur Drehachse. Im Zentrum des Motgens steht eine Wicklungsscheibe, in welcher die Wicklung ohne zusätzliche Eisenkerne in Epoxyharz vergossen ist. Der Rotor besteht aus zwei Stahlscheiben, auf welchen je 12 Dauermagnete plaziert sind. Dadurch entsteht ein magnetischer Kreis nach Fig. 8. Die Magnete werden dabei durch einen Aluminium-Ring mit entsprechenden Bohrungen in ihrer Position gehalten.

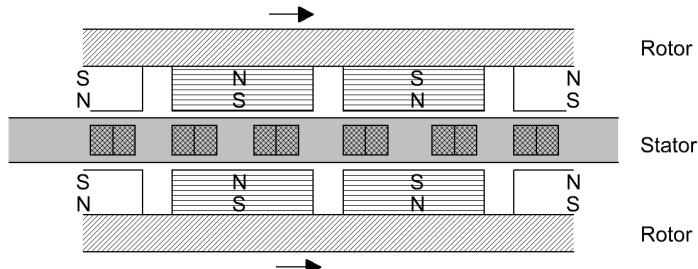


Fig. 8: Magnetkreis (gez. Brückmann)

Bei einem Luftspalt von  $2 \times 8\text{mm}$  und einer wirksamen Magnetlänge von  $4 \times 6\text{mm}$  wird so eine magnetische Induktion von etwa 0.73 Tesla im Luftspalt erreicht. Bei den Magneten handelt es sich um Neodym-Magnete mit einem Durchmesser von 30mm und 6mm Dicke.

Im Anhang ist eine Schnittzeichnung des Motgens zu finden.

Die folgenden Bilder zeigen den Motgen in verschiedenen Demontage-Stufen:



Fig. 9: Rotor mit Wicklungsscheibe (Brü)

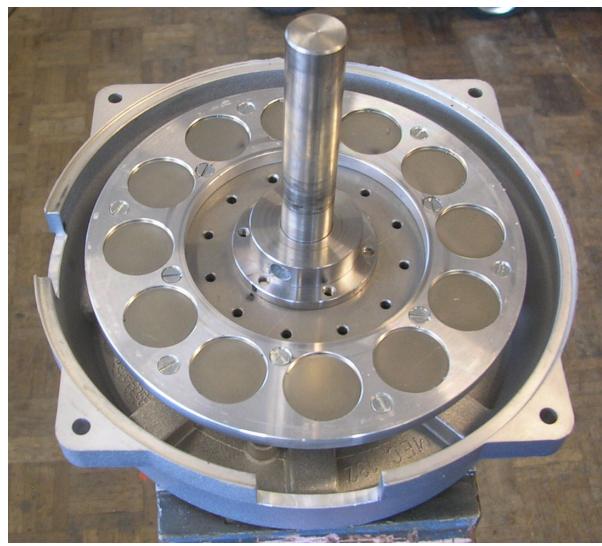


Fig. 10: eine Rotorhälfte mit Magneten (Brü)

Da sich die beiden Rotorhälften mit etwa 1800N anziehen (bei 8mm Luftspalt!), musste eine spezielle Abziehvorrichtung gebaut werden, welche das gefahrlose Absenken und Anheben der einen Rotorhälfte ermöglicht.

Als Motorgehäuse werden zwei Normflansche Baugröße IEC 132 verwendet, zusätzlich ausgestattet mit Adapterringen für die kleineren Kugellager. Die Wicklungsscheibe lässt sich direkt zwischen den zwei Flanschen einklemmen.



**Fig. 11: Abziehvorrichtung (Brü)**



**Fig. 12: Motgen mit Spulenwicklung (Brü)**

### Die Wicklungen

Es wurden zwei verschiedene Wicklungsscheiben gebaut:

1. eine klassische Wellenwicklung
2. eine Spulenwicklung mit 18 Einzelpulnen

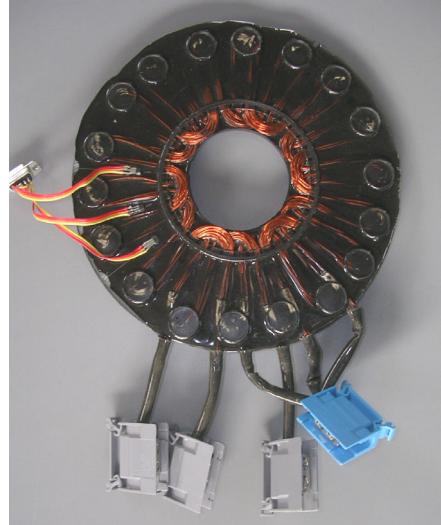
Die Wellenwicklung wurde in Anlehnung an den Modellmotor gebaut. Es zeigte sich, dass bei dieser Anordnung relativ viel Kupfer nicht an der Spannungszeugung beteiligt ist, einfach weil die Wicklungsköpfe mit ihren Kreuzungen viel Platz beanspruchen. Dementsprechend hoch war denn auch der Innenwiderstand der Wicklung mit  $15.5\text{m}\Omega$  (bei  $25^\circ\text{C}$ ), jeweils zwischen zwei Phasen gemessen und bei Sternschaltung (extern).

Nachdem die Wirkungsgradmessungen mit dieser Wicklung nicht überzeugten und der Motor zudem relativ laut war (lästige, hochfrequente Kommutierungsgeräusche), suchten wir nach anderen Wicklungs-Konstruktionen.

Nach diversen Studien und Modellwicklungen entschieden wir uns für eine Wicklung mit 18 relativ schmalen Einzelpulnen. Je drei folgende Spulen sind dabei zu einer Sternschaltung zusammengefasst, so dass der Motor schliesslich aus 6 parallel geschalteten Einzelmotoren besteht. Es zeigte sich, dass bei dieser Wicklungsart die verkettete Spannung einen eher runden Sinus-Buckel aufweist, wodurch wir uns einen kleineren Rippelstrom bei der Blockkommutierung erhofften.

Mit dieser Wicklung konnten die Wicklungsköpfe vermieden werden und zudem reduzierte sich der Anschlusswiderstand auf  $8.2\text{ m}\Omega$  bei  $25^\circ\text{C}$  (Klemme-Klemme). Allerdings ist die Induktivität mit etwa  $3.3\text{ }\mu\text{H}$  so klein, dass ohne zusätzliche Drosseln in den Motorzuleitungen kein vernünftiger Betrieb möglich ist (durch den grossen Rippelstrom spricht die Strombegrenzung schon unterhalb der Nennlast an).

Um so mehr erstaunten die Messresultate, welche eindeutig schlechter als bei der Wellenwicklung ausfallen. Positiv ist dagegen, dass der Motor mit Spulenwicklung deutlich leiser läuft (kaum noch Kommutiergeräusche).



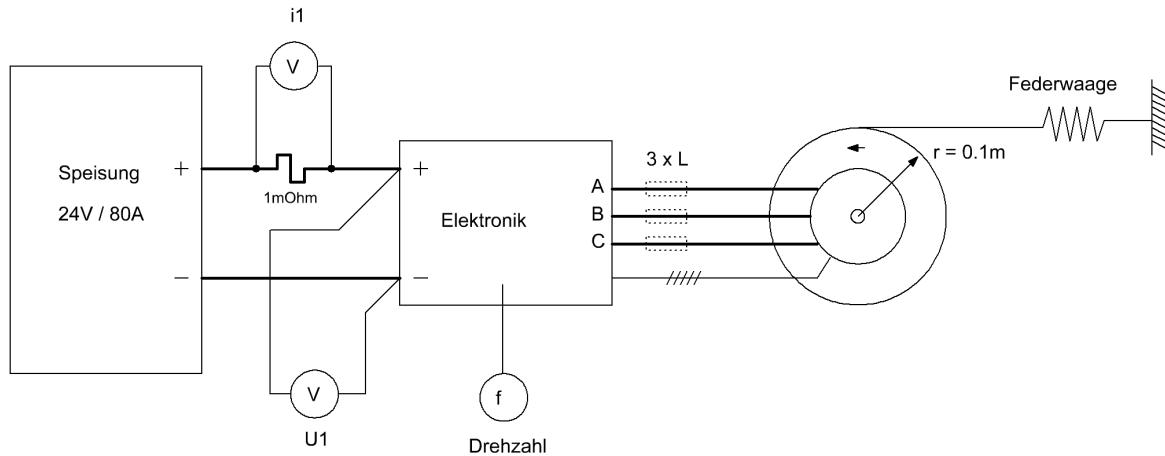
**Fig. 13: Wellenwicklung (Brü)**



**Fig. 14: Einzelpule (Brü)**

## Messeinrichtung

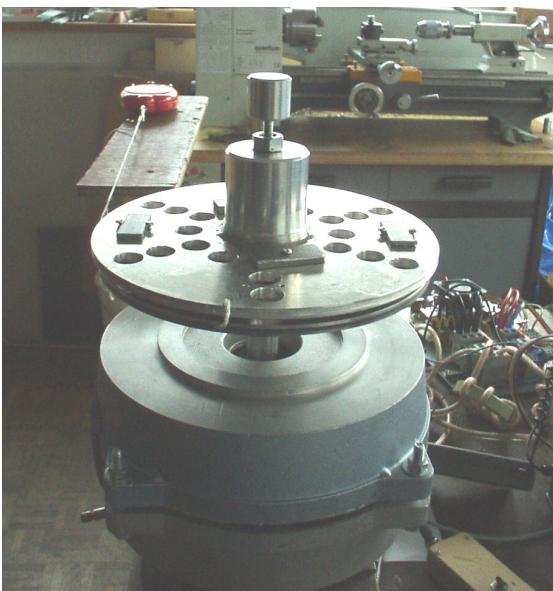
Alle Wirkungsgradmessungen wurden mit der gleichen Messeinrichtung durchgeführt. Das Schema sowie die Lage der Messpunkte zeigt das folgende Diagramm:



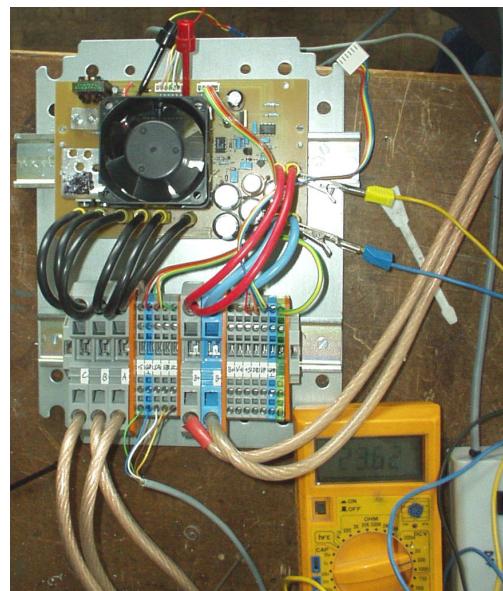
**Fig. 15: Messeinrichtung für die Wirkungsgradmessungen (gez. Brückmann)**

Folgende Messgeräte kamen zum Einsatz:

- i1: Messschunt 1mOhm mit Digital-Multimeter. Die Genauigkeit wurde mit einem weiteren Digital-Multimeter hoher Genauigkeit im Strombereich überprüft.
- U1: Digital-Multimeter
- f: Counter, quarzgenau, zur Erfassung der Hallsonden-Frequenz und damit der Drehzahl
- M: Drehmomentwaage (Beschreibung im Anhang), Federwaage mit Referenzgewicht geeicht



**Fig. 16: Drehmomentwaage am Motoren (Brü)**



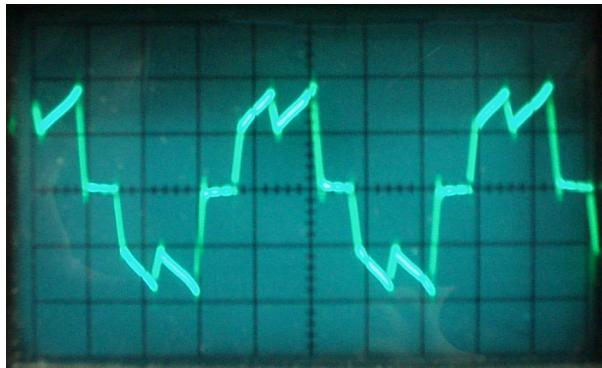
**Fig. 17: Motor-Elektronik (Brü)**

Für die Zuordnung der Verluste wurden zusätzlich die Leitungs- und Übergangswiderstände mittels Vierpunktschaltung gemessen, und zwar bei Raumtemperatur und betriebswarm.

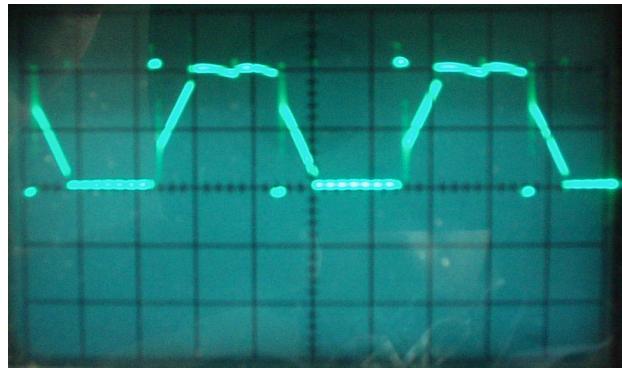
## Messergebnisse

Die Messergebnisse der Motoren mit den zwei unterschiedlichen Wicklungsscheiben sind im Anhang detailliert wiedergegeben. Zusätzlich sind dort der Vollständigkeit halber auch die Ergebnisse des 1:2-Modellmotors sowie des Circle-Motor-Prototypen wiedergegeben.

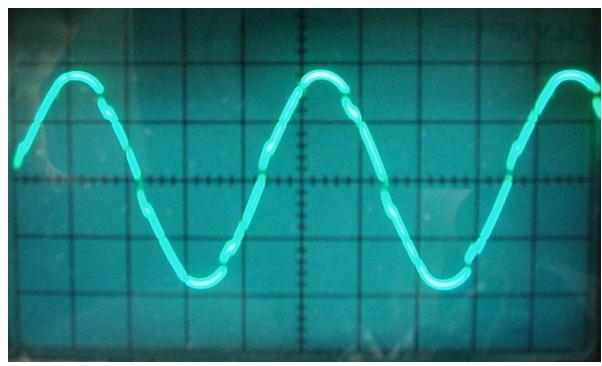
Für den Motor mit Spulenwicklung (Motoren2) werden hier noch einige Oszillogramme wiedergegeben, welche bei einem Drehmoment von 2.3 Nm und Vollaussteuerung aufgenommen worden sind. Dabei sind zwischen Elektronik und Motor in allen drei Motorleitungen Drosseln von je 5  $\mu\text{H}$  eingefügt, daher die fast perfekte Sinusspannung zwischen den Motorklemmen.



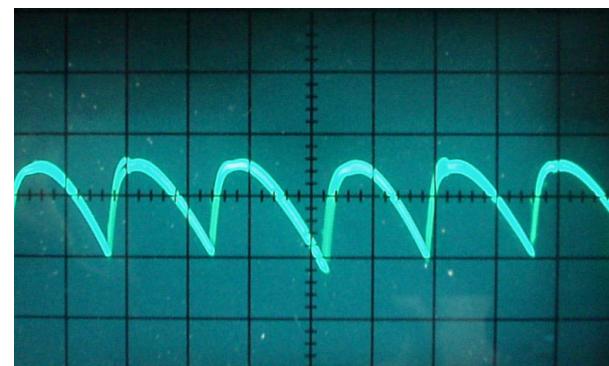
**Fig. 18:** Motorstrom 50A/div  
0.5 ms/div (Brü)



**Fig. 19:** Phasenspannung 10V/div  
0.5 ms/div (Brü)



**Fig. 20:** Motorspannung  $U(A-B)$  10V/div  
0.5 ms/div (Brü)



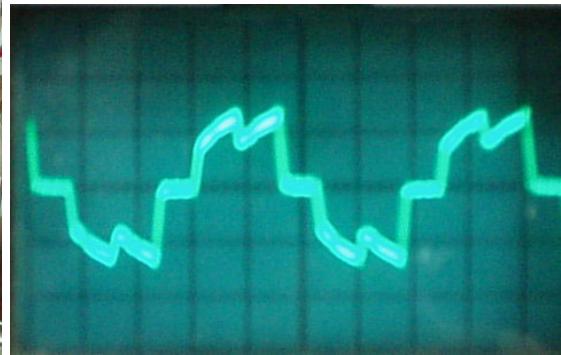
**Fig. 21:** Rippel auf  $U_1$ : 500mV/div  
0.2 ms/div (Brü)

Wer mit EC-Motoren vertraut ist, erkennt, dass der Stromverlauf durch "Vorzündung" (d.h. durch Drehung der Hallsonden gegen den Motordrehzinn) noch verschönert werden könnte (flacherer Verlauf). Dies ist bei der gewählten Konstruktion mit fest in der Wicklung eingegossenen Hallsonden nicht möglich und sowieso nur für den Betrieb in einer Drehrichtung geeignet. Eigene Messungen an anderen EC-Motoren haben jedoch schon mehrfach gezeigt, dass dadurch weder die Drehzahl noch der Wirkungsgrad wesentlich beeinflusst werden.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen hat Herr Lindegger einen Motor eher konventioneller Bauart, aber mit optimiertem Magnetkreis zusammengestellt, damit dieser als Vergleich ebenfalls mit der gleichen Versuchseinrichtung ausgemessen werden kann. Fig. 22 zeigt den Versuchsaufbau, die Resultate sind ebenfalls im Anhang ausführlich dargestellt. Der Motor zeichnet sich insbesondere durch eine angenehme Laufruhe (kaum Kommutiergeräusche) und ein kaum spürbares Rastmoment aus. Das ist nicht selbstverständlich für eine genutzte Maschine! Auch der Wirkungsgradverlauf ist erstaunlich flach: er liegt zwischen 0.9 und 3.6 Nm über 80%!



**Fig. 22: Versuchsaufbau genuteter Motor (Brü)**



**Fig. 23: genuteter Motor: Motorstrom 50A/div  
0.5 ms/div (Brü)**

## Auswertung der Messergebnisse

Die Ergebnisse liegen, wie bereits erwähnt, deutlich unter den Erwartungen. Speziell beim Motoren mit Spulenwicklungen erstaunt der magere Wirkungsgrad von lediglich etwas über 80%, auch wenn dieser über einen recht grossen Drehmomentbereich relativ konstant verläuft. Deshalb soll in einer Verlustanalyse herausgefunden werden, wo die einzelnen Verluste anfallen und wie gross sie sind. Daraus lässt sich schliesslich Ableiten, wo und in welchem Umfang Verbesserungen möglich sein werden.

Diese Verlustanalyse wird im folgenden für den Motor 2 mit Spulenwicklung bei 21V Betriebsspannung und einem Lastmoment von etwa 2 Nm durchgeführt.

$$\text{Eingangsleistung } P_1 = 21.34V * 62.2A = \quad 1327 \text{ W}$$

$$\text{Abgabeleistung } P_2 = 2.04 \text{ Nm} * 5010\text{rpm} * (2\pi/60) = \quad 1070 \text{ W}$$

$$\text{Differenz (= Verlustleistung)} \quad \underline{\underline{257 \text{ W}}}$$

*Die Verluste im Einzelnen (bei Effektivstrom von 70A in den Leitern):*

$$\text{Steuerung (aufgrund von Wirkungsgrad von 95\%)} \quad 66 \text{ W}$$

$$\text{Zuleitungen mit Drosseln (11mOhm)} \quad 54 \text{ W}$$

*innerhalb des Motors:*

$$\text{Motorwicklung warm (9.6mOhm)} \quad 47 \text{ W}$$

$$\text{Übrige Verluste (aerodynamische und Wirbelströme)} \quad \underline{\underline{90 \text{ W}}}$$

$$\text{Total} \quad \underline{\underline{257 \text{ W}}}$$

Aus dieser Zusammenstellung lässt sich der Wirkungsgrad des Motors alleine (ohne Elektronik und Zuleitungen) ermitteln. Er liegt in diesem Fall bei etwa 89%, was immer noch nicht besonders gut ist. Dabei sind es insbesondere die "übrigen" Verluste, die mit 90W ins Auge stechen.

Um diese besser zu verstehen, wurde die Leerlauf-Leistungsaufnahme bei verschiedenen Drehzahlen gemessen. Davon wurden die bekannten Verluste (Eigenbedarf Steuerung und  $I^2R$ -Verluste) abgezogen und aus dem Rest das Verlust-Drehmoment ermittelt. Das Ergebnis ist in Figur 24 dargestellt. Die Leerlaufmessung bestätigt bei 5000rpm Verluste von 90W (entspricht 0.172 Nm). Es handelt sich dabei offensichtlich um rein drehzahlabhängige Verluste, also unabhängig vom abgegebenen Drehmoment.

Die mechanische Reibung ist dabei offensichtlich vernachlässigbar klein, hat doch der Motor eine Auslaufzeit von über 2 min (ab 6000 U/min), was ausserordentlich lange ist für eine so kleine Maschine.

Es fällt auf, dass das Verlust-Drehmoment beinahe linear mit der Drehzahl zunimmt. Von rein aerodynamischen Verlusten würde man eher einen quadratischen Verlauf erwarten. Das quadratische Element kommt zwar vor, allerdings nicht sehr ausgeprägt.

Wie lässt sich das gemessene Verlustmoment also erklären?

Am ehesten kommt die Kurve durch eine Überlagerung von zwei Widerständen zustande: a) die aerodynamischen Verluste und b) die Wirbelstromverluste in den Kupferdrähten.

Die aerodynamischen Verluste haben bei den zweifellos turbulenten Strömungsverhältnissen im Luftspalt zwischen Wicklungsscheibe und Rotor einen rein quadratischen Verlauf.

Das Verlustmoment durch die Wirbelströme hat demnach einen ganz anderen Verlauf: Der Anstieg wird mit zunehmender Drehzahl flacher. Dies entspricht jedenfalls klar dem Verhalten der Wirbelstrombremse für die Drehmomentmessung, wo diese Charakteristik gut zu beobachten ist.

Figur 24 zeigt deshalb zusätzlich einen Versuch, aus der gemessenen Kurve die beiden Verlustanteile zu rekonstruieren. Daraus wird klar ersichtlich, dass die Wirbelstromverluste offensichtlich dominieren. Dennoch müssen beide Verlustquellen verringert werden, wenn der Wirkungsgrad signifikant verbessert werden soll.

Die aerodynamischen Verluste lassen sich durch glattere Oberflächen verringern. Beim Prototyp weisen sowohl die Wicklungsscheibe als auch die Rotorschiben erhebliche Unebenheiten auf. Die Löcher in der Wicklungsscheibe könnten ausgegossen werden, die Magnete müssten irgendwie bündig in den Halterung integriert werden (aber dennoch mit formschlüssiger Sicherung gegen Abheben). Zudem müssten die Löcher in den Rotorschiben verschlossen werden, damit kein Radialventilator-Effekt entsteht. Inwieweit das aus thermischen Gründen zulässig ist, müsste experimentell abgeklärt werden. Eventuell braucht es kleine Löcher für eine genügende Wärmeabfuhr aus der Scheibe.

Da in Motoren ohne Eisennuten die Wicklungen direkt dem Erregerfeld ausgesetzt sind, entstehen bei drehender Maschine in den Kupferdrähten Wirbelströme. Diese sind um so ausgeprägter, je dicker die verwendeten Leiter sind. Deshalb wurde die aktuelle Wicklung mit je vier parallelen Drähten von 0.56 mm Durchmesser hergestellt. Offensichtlich ist das aber immer noch so dick, dass die daraus resultierenden Verluste nicht zu unterschätzen sind. Da außerhalb des Rotors praktisch nichts von den Magneten spürbar ist, können Wirbelstromverluste im Gehäuse durch das Streufeld weitgehend ausgeschlossen werden.

## Schlussfolgerungen

Das anvisierte Ziel bezüglich Wirkungsgrad wurde leider verfehlt. Zwar konnten die Eisenverluste eliminiert werden, dafür traten aber aerodynamische Verluste und Wirbelstromverluste im Kupfer weit stärker in Erscheinung als ursprünglich angenommen. Da sich diese Verluste beim gewählten Konzept des Scheibenläufers nicht ohne weiteres entscheidend verringern lassen, kommen wir zum Schluss, dass eine optimierte, aber konventionelle Bauart (geblechter Stator, zylindrischer Rotor mit Permanentmagneten) insgesamt der bessere Weg ist.

Damit bleibt aber das Problem des Wirkungsgrades beim kleinen BOP-B (Ersatz von Bleibatterien in autonomen Stromversorgungen) vorhanden bestehen. 90% Wirkungsgrad (inklusive Elektronik)

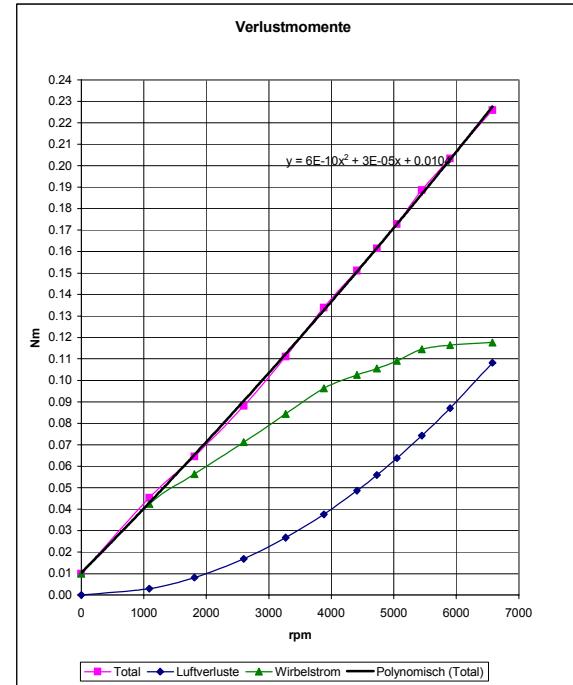


Fig. 24 Leerlauf-Verlustmoment

scheint also bei Leistungen unter 2kW immer noch so etwas wie eine Schallgrenze zu sein, die nicht ohne weiteres zu knacken ist.

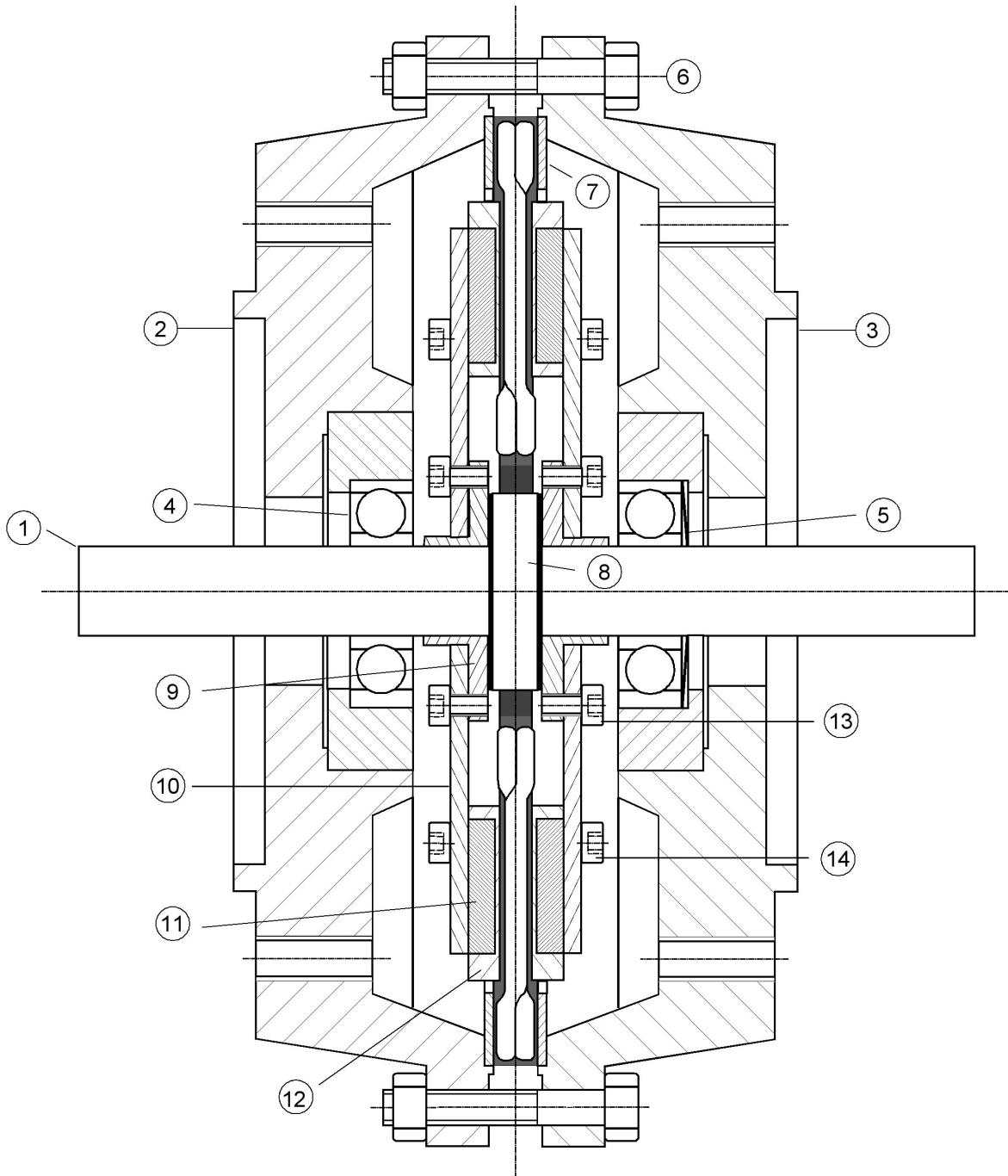
Da bei so kleinen Maschinen offenbar immer irgendwelche relativ grossen Leerlaufverluste auftreten, muss bei der Konzeption des BOP-B darauf geachtet werden, dass die Maschine möglichst nie unter 30% Nennleistung betrieben wird. Das bedingt aber für die Praxis zwingend ein Konzept mit einem elektrischen Pufferspeicher (Batterie oder Supercap), da dort immer wieder über längere Zeiträume sehr kleine Leistungen bei gutem Wirkungsgrad abgegeben werden müssen.

## Referenzen

- [1] I. Cyphelly, A. Rufer, Ph. Brückmann, W. Menhardt, A. Reller: ***Einsatz von Druckluftspeichersystemen***, DIS-Projekt-Nr. 100406, Mai 2004
- [2] I. Cyphelly, Ph. Brückmann, W. Menhardt: ***Technisch Grundlagen der Druckluftspeicherung und deren Einsatz als Ersatz für Bleibatterien***, DIS-Projekt-Nr. 100406, September 2004
- [3] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Jahresbericht 2004***, DIS-Projekt-Nr. 100985, November 2004
- [4] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Zwischenbericht 2005***, DIS-Projekt-Nr. 100985, April 2005
- [5] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Jahresbericht 2005***, DIS-Projekt-Nr. 100985, Dezember 2005

## Anhang

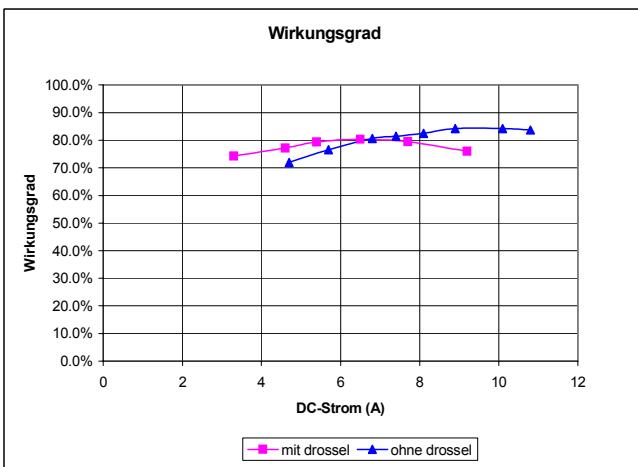
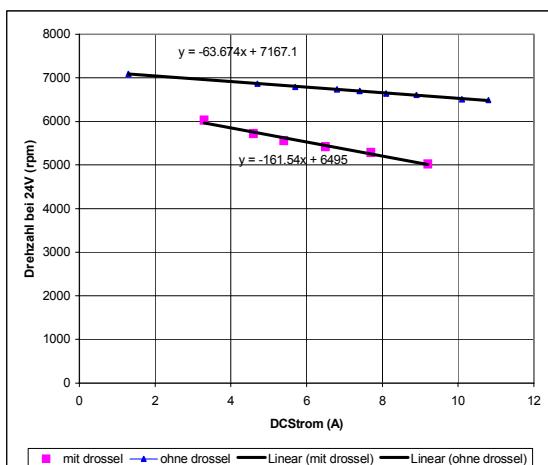
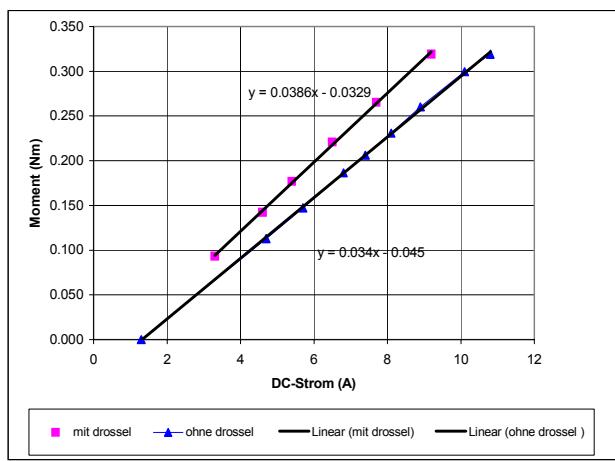
### Zeichnung des Motgen



<b>MOTGEN</b>		Brückmann Elektronik Bahnhofstrasse 17 CH - 7260 Davos Dorf		CIRCLE MOTOR AG Tannackerstrasse 25 CH - 3073 Gümpligen / Bern			
<b>Zusammenstellung auf A4</b>				<b>erstellt</b>			
<b>Material:</b>				<b>geprüft</b>			
<b>POS:</b>		nicht mass- stäblich	<b>Z Nr.</b>		<b>freigeg.</b> 24.Okt.05 mli		
				<b>Index</b>			

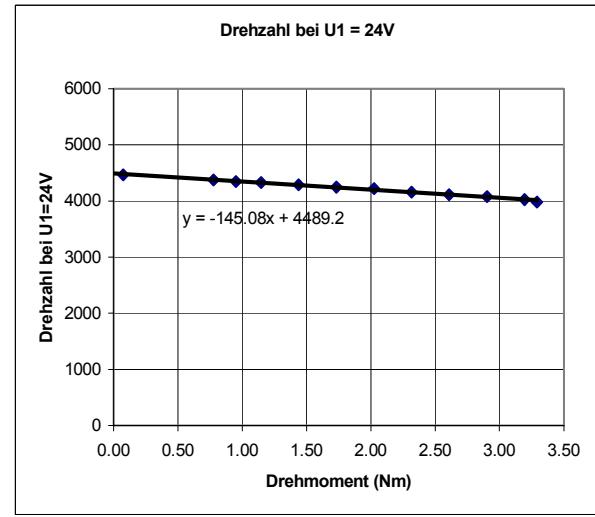
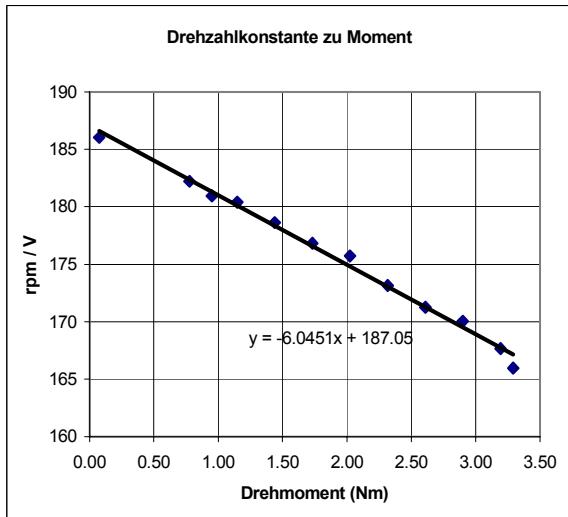
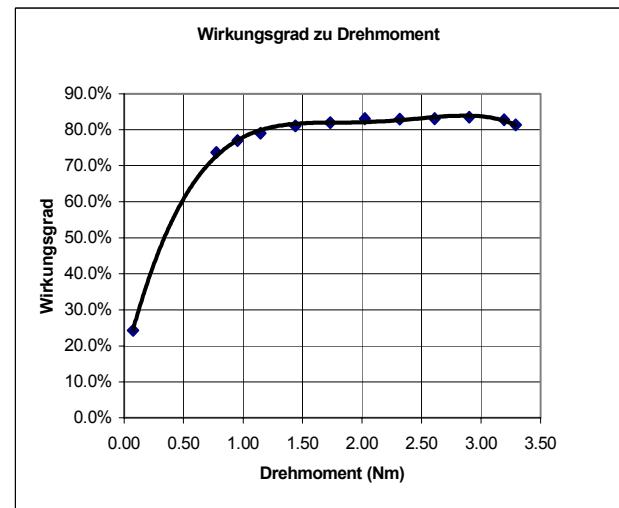
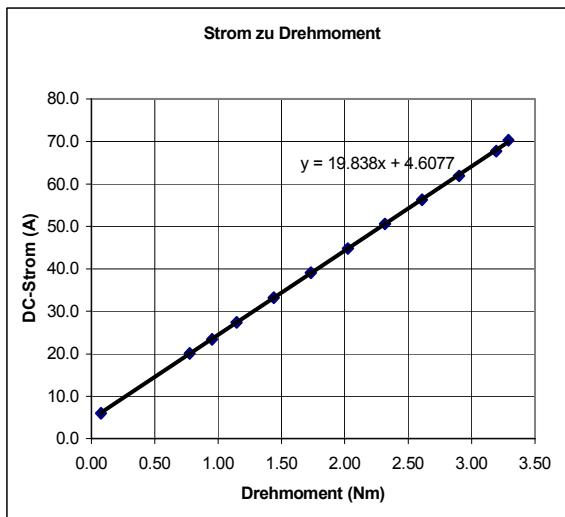
## Messresultate Modell-Motor 1:2

Wirkungsgradmessungen am EC-Motor-Modell vom 7.4.05												
					r=50mm						P1-P2-Pw	
U1 (V)	I1 (A)	P1 (W)	rpm	Waage (kg)	M (Nm)	P2 (W)	P2/P1	L	rpm 24V	Pw (W)	(W)	
24.1	3.3	79.5	6054	0.19	0.093	59.1	74.3%	3x100uH	6029			
24.1	4.6	110.9	5742	0.29	0.142	85.6	77.2%	3x100uH	5718			
24.1	5.4	130.1	5585	0.36	0.177	103.3	79.4%	3x100uH	5562			
24.0	6.5	156.0	5421	0.45	0.221	125.4	80.4%	3x100uH	5421			
23.9	7.7	184.0	5267	0.54	0.265	146.2	79.4%	3x100uH	5289			
23.7	9.2	218.0	4960	0.65	0.319	165.7	76.0%	3x100uH	5023			
24.2	1.3	31.5	7150	0.00	0.000	0.0	0.0%		7091	3.4	28.1	
24.1	4.7	113.3	6894	0.23	0.113	81.5	71.9%		6865	7.2	24.5	
24.1	5.7	137.4	6822	0.30	0.147	105.2	76.6%		6794	9.2	23.0	
24.0	6.8	163.2	6737	0.38	0.187	131.6	80.6%		6737	11.8	19.8	
24.0	7.4	177.6	6700	0.42	0.206	144.6	81.4%		6700	13.4	19.5	
24.0	8.1	194.4	6642	0.47	0.231	160.4	82.5%		6642	15.5	18.5	
23.9	8.9	212.7	6581	0.53	0.260	179.2	84.3%		6609	18.1	15.4	
23.9	10.1	241.4	6484	0.61	0.300	203.3	84.2%		6511	22.4	15.7	
23.8	10.8	257.0	6439	0.65	0.319	215.1	83.7%		6493	25.2	16.7	
zusätzliche Wickl.-Verluste Pw gerechnet mit Rippelstrom 4A												
offenbar grössere Unwucht-Verluste bei kleinen Drehmomenten												



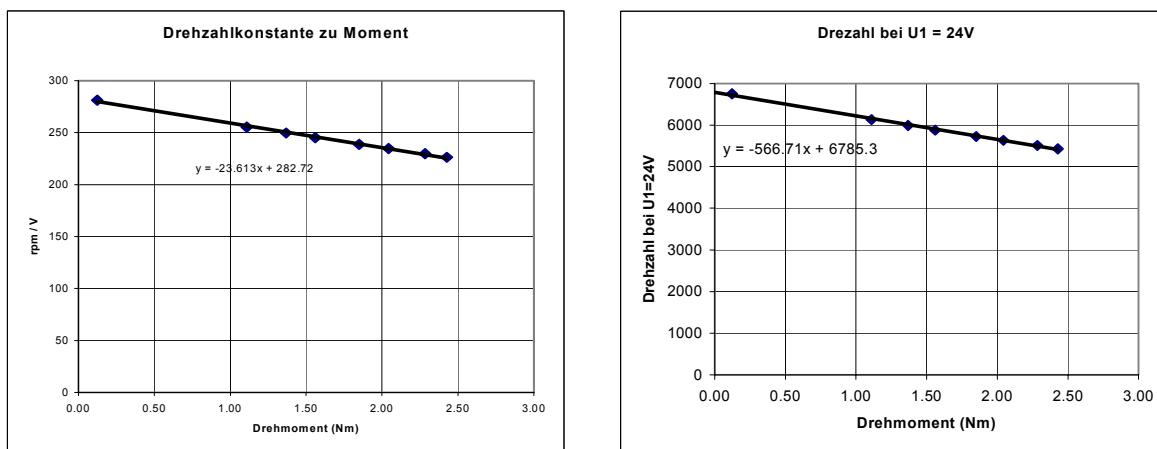
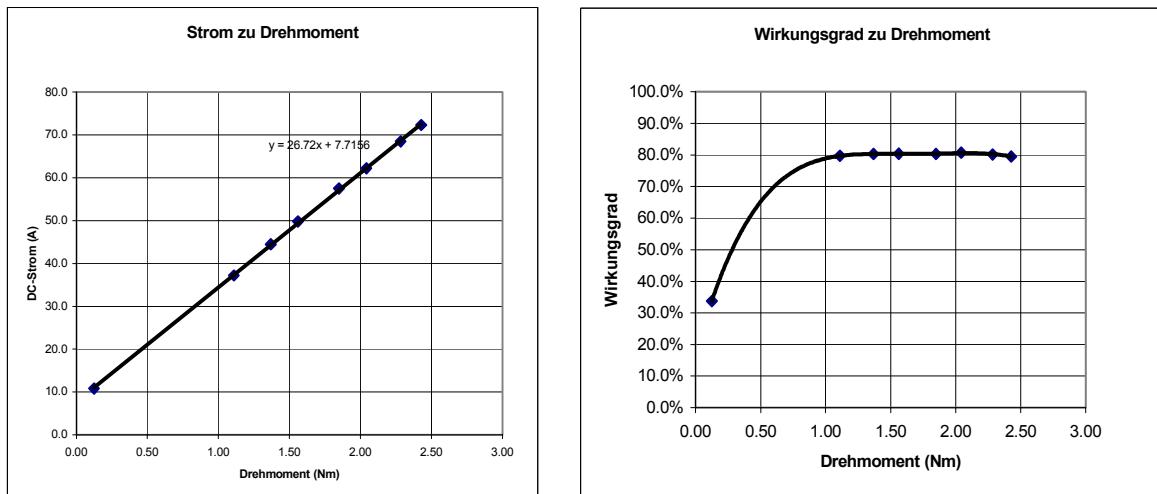
## Messresultate mit Wellenwicklung

Messungen mit Drehmomentwaage am Motoren 1 (29.11.2005)												
R <sub>i</sub> = 15.5mOhm kalt (Phase-Phase) ohne Zuleitungen												
U1 (V)	I1 (A)	f (Hz)	Waage (kg)	rpm	M (Nm)	P <sub>mech</sub> (W)	P <sub>el</sub> (W)	P <sub>mech</sub> / P <sub>el</sub>	rpm/V	rpm @24V		
25.80	6.0	480	0.00	4800	0.07	38	155	24.3%	186	4465		
25.30	20.1	461	0.72	4610	0.78	375	509	73.7%	182	4373		
25.20	23.4	456	0.90	4560	0.95	454	590	77.0%	181	4343		
25.00	27.4	451	1.10	4510	1.15	541	685	79.0%	180	4330		
24.80	33.2	443	1.40	4430	1.44	667	823	81.0%	179	4287		
24.60	39.1	435	1.70	4350	1.73	788	962	82.0%	177	4244		
24.30	44.8	427	2.00	4270	2.02	905	1089	83.1%	176	4217		
24.20	50.6	419	2.30	4190	2.32	1016	1225	83.0%	173	4155		
24.00	56.3	411	2.60	4110	2.61	1122	1351	83.1%	171	4110		
23.70	61.9	403	2.90	4030	2.90	1224	1467	83.4%	170	4081		
23.50	67.7	394	3.20	3940	3.19	1317	1591	82.8%	168	4024		
23.50	70.3	390	3.30	3900	3.29	1343	1652	81.3%	166	3983		



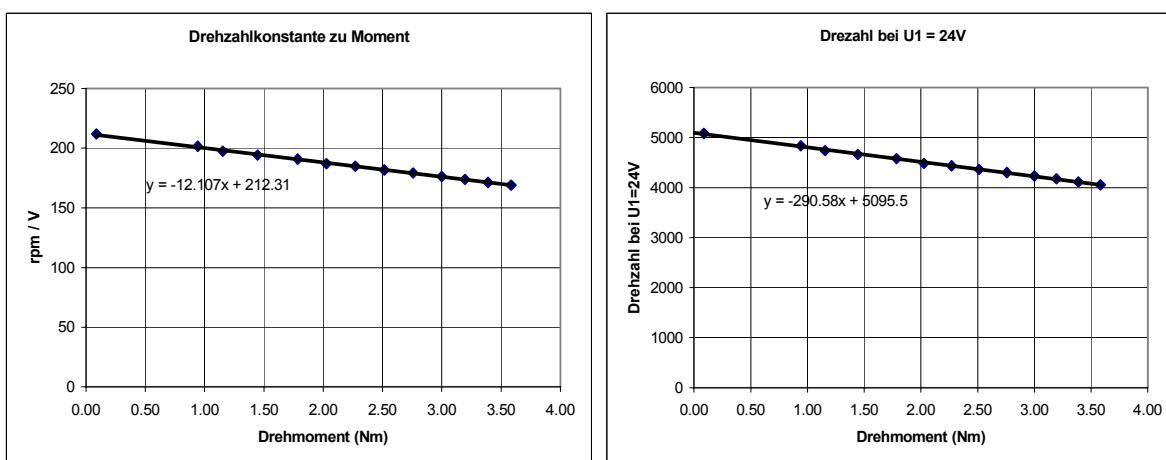
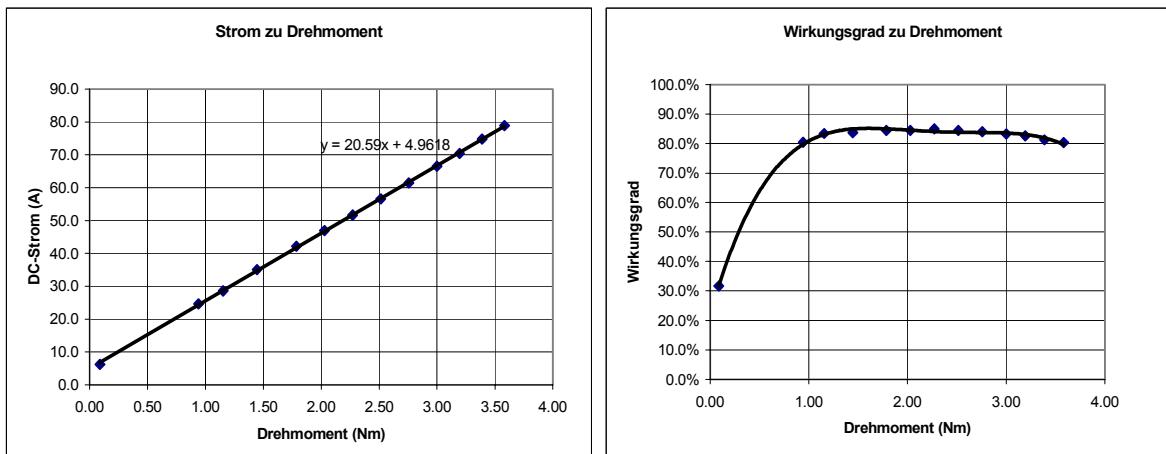
## Messresultate Motgen mit 18-Spulenwicklung

Motgen 2										
Rcu = 8.43mOhm kalt (entspricht gerechnetem Wert) Phase-Phase gemessen, warm inkl. Zuleitung und Drosseln: 20mOhm										
L = 3.3µH Phase-Phase										
mit zusätzlichen Drosseln zu je 5µH										
U1 (V)	I1 (A)	f (Hz)	Waage (kg)	rpm	M (Nm)	Pmech (W)	Pel (W)	Pmech / Pel	rpm/V	rpm @24V
23.15	10.8	651	0.00	6510	0.12	84	250	33.7%	281	6749
22.24	37.2	568	1.03	5680	1.11	659	827	79.7%	255	6129
22.00	44.5	549	1.30	5490	1.37	786	979	80.3%	250	5989
21.80	49.8	534	1.50	5340	1.56	872	1086	80.3%	245	5879
21.50	57.5	513	1.80	5130	1.85	993	1236	80.3%	239	5727
21.34	62.2	501	2.00	5010	2.04	1071	1327	80.7%	235	5634
21.12	68.5	485	2.25	4850	2.28	1159	1447	80.1%	230	5511
20.95	72.3	474	2.40	4740	2.43	1204	1515	79.5%	226	5430



## Messresultate Circle Motor Prototyp genutzt

Motgen 3 genutzt										
Rcu = 14mOhm (bei 25°C) Phase-Phase gemessen										
L = 41µH Phase-Phase										
U1 (V)	I1 (A)	f (Hz)	Waage (kg)	rpm	M (Nm)	Pmech (W)	Pel (W)	Pmech / Pel	rpm/V	rpm @24V
25.11	6.2	266	0.00	5320	0.09	49	156	31.7%	212	5085
24.50	24.7	247	0.88	4940	0.94	487	605	80.5%	202	4839
24.40	28.6	241	1.10	4820	1.15	582	698	83.5%	198	4741
24.20	35.1	235	1.40	4700	1.45	711	849	83.7%	194	4661
23.90	42.2	228	1.75	4560	1.79	852	1009	84.5%	191	4579
23.75	47.0	222	2.00	4440	2.03	942	1116	84.4%	187	4487
23.60	51.7	218	2.25	4360	2.27	1037	1220	85.0%	185	4434
23.40	56.6	212.5	2.50	4250	2.51	1118	1324	84.4%	182	4359
23.22	61.5	208	2.75	4160	2.76	1201	1428	84.1%	179	4300
23.03	66.5	203	3.00	4060	3.00	1275	1531	83.3%	176	4231
22.88	70.4	199	3.20	3980	3.19	1331	1611	82.6%	174	4175
22.70	74.8	194.5	3.40	3890	3.39	1380	1698	81.3%	171	4113
22.48	78.9	190	3.6	3800	3.58	1425	1774	80.4%	169	4057



## Stromversorgung

Für die Stromversorgung wird ein 24V-Speisegerät mit 80A Dauer-Ausgangsstrom benötigt. Mit Batterien lässt sich das zwar einfach erreichen, zum Messen eignen sich Batterien aber nur schlecht, da die Spannung im Messbetrieb immer wieder ändert.

Heute gibt es sehr preiswerte 24V / 40A Speisegeräte für den Steuerungsbau. Zwei solche Geräte parallelgeschaltet ergeben also eine genügend leistungsfähige Stromversorgung. Dazu mussten jedoch Geräte evaluiert werden, welche eine Parallelschaltung bei gleichmässiger Stromaufteilung zulassen. Die verwendeten Geräte können mit einem Jumper so konfiguriert werden, dass sie eine etwas weiche Kennlinie erhalten, so dass die Spannung zwischen Leerlauf und Vollast etwa um 1V abnimmt. Werden vor dem Zusammenschalten beide Geräte auf die gleiche Leerlaufspannung eingestellt, erhält man so eine gute Lastaufteilung im Parallelbetrieb.

Da die verwendete Motorelektronik beim Abbremsen des Motors Energie zurückspeist, musste zusätzlich ein Bremschopper parallel zum Ausgang geschaltet werden. Dieser wird aktiv, sobald die Spannung über 29V ansteigt. Er besteht aus einem modifizierten Solar-Laderegler eigener Entwicklung und einem kurzzeitig massiv überlastbaren Widerstand und kann im Maximum etwa 60A ableiten. Ohne diesen Chopper würde die Ausgangsspannung auf für die Speisegeräte gefährliche Werte ansteigen.

Alle Komponenten wurden zu einer leicht zu transportierenden Einheit zusammengebaut, welche im folgenden Bild dargestellt ist.



Fig. 25 24V / 80A Stromversorgung mit Bremschopper Foto: Brückmann

## Elektronik

Für die Versuche mit dem Motgen wurde eine Elektronik für 60A Nennstrom (maximal 85A) gebaut und bezüglich Wirkungsgrad genauer ausgemessen. Hier zeigt sich, dass bei der kleinen Betriebsspannung von 24V die Zuleitungen und Klemmen-Übergangswiderstände eine sehr entscheidende Rolle spielen und leicht alle Anstrengungen auf der Elektronikseite zunichte machen können. Inzwischen gibt es bereits noch etwas bessere Mosfets (z.B. IRF3805), welche nur noch 3.3mOhm Durchschaltwiderstand aufweisen (statt 5mOhm wie jetzt verwendet). Dadurch und mit einem professionellen Layout (doppelseitig 70 $\mu$  Kupfer) kann der Wirkungsgrad noch gesteigert werden. Bei den Kontakt- und Leitungswiderständen muss ein Kompromiss zwischen vernünftiger Herstellbarkeit und minimalem Widerstand gefunden werden. Eine Verbesserung auf 97.5% bei 60A für die Leiterplatte alleine sollte jedoch mit dem bestehenden Layout realistisch sein.

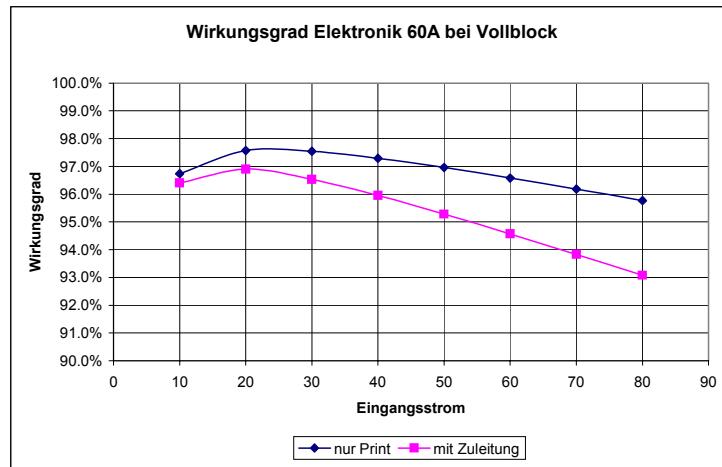


Fig. 26 Wirkungsgrad 60A-Elektronik (gez. Brückmann)

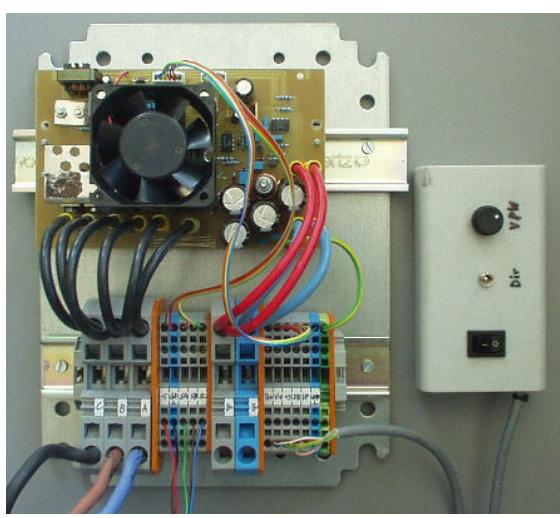


Fig. 27 Elektronik 60A mit Bedienteil (Brü)



Fig. 28 Elektronik 60A eingebaut (Brü)

# Motorelektronik für bürstenlose Gleichstrommotoren

Die Motorelektronik steuert einen bürstenlosen 24V-Gleichstrommotor (mit Sensoren) von bis zu 1500W Dauer-Eingangsleistung an. Sie weist folgende Eckdaten auf:

<b>Betriebsspannung:</b>	typisch 24V=, funktionsfähig von 11 bis 45V=, transient bis 50V
<b>Dauer-Ausgangsstrom:</b>	max. 70A
<b>Eigenbedarf:</b>	ca. 200mA
<b>Strombegrenzung:</b>	bei ca. 100A Scheitelwert
<b>Umgebungstemperatur:</b>	-20..60°C
<b>Abmessungen Leiterplatte:</b>	160 x 100 x 80 mm
<b>Kühlung:</b>	Ventilator 12V, der FET's und Elkos kühl

Neben der eigentlichen Motorsteuerung (basierend auf dem Steuerbaustein MC33033) sind folgende Funktionen auf der Leiterplatte integriert:

- **Eingangsfilter**, welches den Rippelstrom liefert und HF-Rückwirkungen unterbindet. Eine kapazitive Anbindung der Schaltung an Erde ist dabei vorgesehen. Die Spannung zwischen GND und Erde ist durch einen 50V-Varistor begrenzt.
- **12V- Schaltregler** für die Versorgung des Reglerbausteins und des Ventilators
- **5V-Spannungsregler** für interne und externe Regelkreise sowie die Hallsonden.
- **Spannungswandler für die High-Side-Fets**, welcher eine Spannung erzeugt, die die Betriebsspannung um ca. 12V überschreitet.
- Drei **Treiberschaltungen** für die High-Side-Fets
- **Strombegrenzung 85A**, welche auch im Generatorbetrieb arbeitet (Bremsen). Dadurch ist eine Drehrichtumkehr aus voller Drehzahl heraus möglich.
- **Thermische Überwachung** der Fets durch NTC. Abschaltung bei  $t \geq 110^\circ\text{C}$ , Wiedereinschaltung nur durch Aus-Ein-Zyklus des Hauptschalters.
- **Schnittstelle** für die Steuerung aller Motorfunktionen (Ein-Aus, Pulsbreite, Vorwärts-Rückwärts). An diese 6-polige Schnittstelle kann eine anwendungsspezifische Regelelektronik angeschlossen werden. Alle Eingänge sind durch Tiefpassfilter gegen HF-Einstreuungen geschützt.

Der integrierte Steuerbaustein MC33033 enthält die Logik für die Ansteuerung der Endstufen-Fet's, Treiberstufen für die Low-Side-Fet's, einen Pulsbreitenmodulator für die Drehzahlregelung, eine Strombegrenzung sowie eine Unterspannungsüberwachung. Für eine genauere Beschreibung des Steuerbausteines wird auf das Datenblatt verwiesen.

## Beschreibung der Schnittstellen

### 1. Batterie-Anschlüsse

**B+:** Pluspol der Stromversorgung      2 x Faston 6.3mm

**B-:** Minuspol der Stromversorgung      2 x Faston 6.3 mm

## 2. Anschluss für die Motorwicklungen

**A, B, C:** Die drei Phasen der Motorwicklungen werden über je zwei 6.3mm Faston-Steckzungen angeschlossen.

## 3. Schnittstelle für die Steuerung des Motors

Eine 6-polige Schnittstelle (Molex-Stecker) erlaubt es, den Motor in seiner Funktion zu beeinflussen. Die Eingänge weisen dabei folgende Funktionen auf:

- Pin 1: **B+** Via 2,2 Ohm Widerstand (Sicherung) mit Batterie-Plus verbunden
- Pin 2: **V+** Speisungseingang für Steuerelektronik
- Pin 3: **+5V** Speisung für eine allfällige Steuerelektronik oder ein Potentiometer. Im Mittel bis zu 20mA, kurzzeitig bis 300mA belastbar.
- Pin 4: **DIR:** Wird dieser Eingang mit GND verbunden, so dreht der Motor in die andere Richtung.
- Pin 5: **VPW** Steuerspannung des Pulsbreitenmodulators. Aktiver Bereich: 1.5 V(min) bis 4.1 V (max). Bei offenem Eingang wird die Steuerspannung auf 5V gezogen (Vollaussteuerung).
- Pin 6: **GND** Bezugspotential für Schalter, Poti oder externe Regelelektronik

Zwischen B+ und V+ kann ein Hauptschalter angeschlossen werden. Da der Motor ohne diese Steuerspannung auch bei durchlegierten Leistungsfets unmöglich laufen kann, erübrigt sich vom Sicherheitsaspekt her ein Hauptschalter im Leistungskreis.

Es ist auch möglich, eine externe Spannungsquelle zwischen V+ (Pin 2) und GND (Pin 6) anzuschliessen. Sie muss für einen ordentlichen Betrieb eine Spannung von 14 bis 35V abgeben und max. 0.5A liefern können.

## 5. Anschluss für die Positions-Sensoren

Ein 5-Poliger Molex-Steckanschluss stellt die Verbindung zu den Hallsonden im Motor dar. Er umfasst die Speisung, Gnd und drei Signalausgänge der Hallsonden. Durch HF-Filter am Eingang des Steuer-IC's sind auch längere Sensorzuleitungen zulässig.

## Drehmomentwaage

Immer wieder Kopfzerbrechen bereitete eine einfache, aber genaue Drehmomentmessung. Diese ist für eine exakte Wirkungsgradmessung unerlässlich. Speziell im Bereich der angestrebten Wirkungsgrade von über 90% wirken sich schon kleine Messfehler gravierend aus. Kommerzielle Messwellen sind recht teuer und benötigen zudem noch eine variable Bremseinrichtung. Schliesslich ist das Ankoppeln des Motors an eine solche Einrichtung oft mit erheblichem Aufwand und zusätzlichen Messunsicherheiten verbunden.

Aus dieser Not heraus entstand schliesslich eine sehr einfache, direkt auf die Motorwelle aufsetzbare Brems- und Messeinrichtung, welche zusammen mit einer Federwaage recht genaue Drehmomentmessungen erlaubt. Die Federwaage lässt sich mit einem bekannten Gewicht sehr leicht und genau eichen und der Hebelarm ist klar definiert. Die Lagerverluste der Messeinrichtung gehen in die Messung mit ein, bewirken also keinen Fehler. Einzig die aerodynamischen Verluste der rotierenden Bremsscheibe werden nicht erfasst. Diese lassen sich aber relativ genau in Funktion der Drehzahl ermitteln und somit korrigieren.

Die Abbremsung der Scheibe erfolgt durch Wirbelströme, welche durch Permanentmagnete in der Scheibe induziert werden. Die Scheibe besteht aus einer 2mm Stahlscheibe auf der motorzugewandten Seite und einem 2mm Aluminiumring auf Seite der Bremsmagnete. Dazwischen ist ein Luftspalt von 2mm, definiert durch 8 radiale Abstands-Streifen, welche als Radialventilator wirken. Dadurch entsteht quasi eine innenbelüftete Scheibenbremse, die problemlos bis zu 1.8kW abführen kann.

Die Stahlscheibe bildet dabei den magnetischen Rückschluss für die Bremsmagnete, welche in der Messscheibe eingebaut sind. In der Aluscheibe werden die bremsenden Wirbelströme erzeugt. Das Bremsmoment kann durch Variieren des Magnet-Abstandes in weiten Grenzen eingestellt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass das Drehmoment bei gegebener Einstellung nur schwach von der Drehzahl abhängig ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen die grosse Drehmomentwaage, einmal einsatzbereit und einmal ohne Magnetscheibe. Eine Radialansicht zeigt zudem deutlich den Luftspalt zwischen der Stahlscheibe und dem Aluring. Die Magnetscheibe musste zusätzlich mit zwei innenliegenden Magnetpaaren bestückt werden, welche zwar kaum bremsen, jedoch zusätzlich die Magnetscheibe anziehen. Dies erwies sich als nötig, da bei hohen Drehzahlen abstossende Kräfte auftreten, die grösser als die Anziehungskraft sein können.

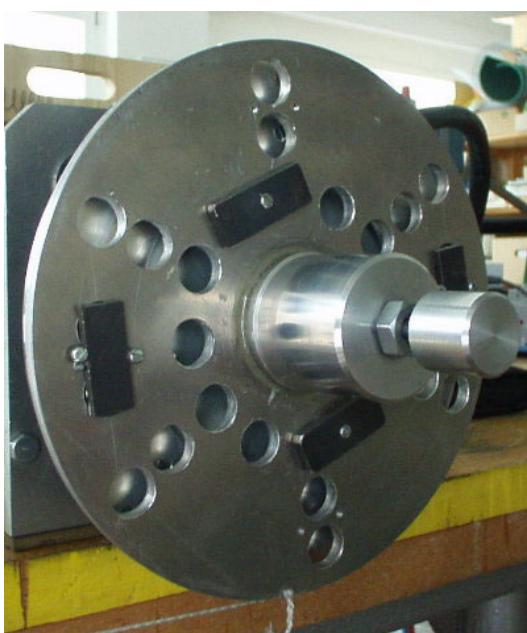


Fig. 30 Drehmomentwaage (Brü)



Fig. 29 ohne Magnetscheibe (Brü)

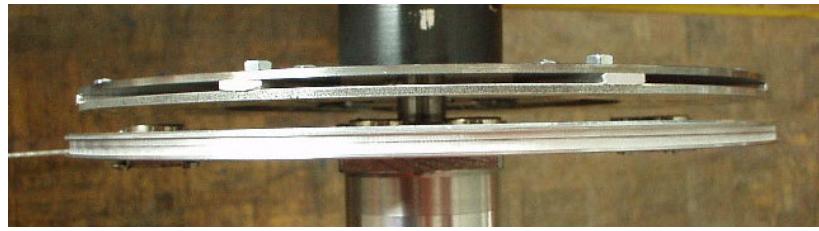


Fig. 31 Radialansicht der Drehmomentwaage (Brü)

Die aerodynamischen Verluste wurden experimentell ermittelt (unterschiedliche Leistung im Leerlauf mit und ohne Scheibe) und können nun durch eine einfache quadratische Formel als Funktion der Drehzahl mit genügender Genauigkeit berechnet werden (siehe Figur 12). Werden diese Verluste zum gemessenen Drehmoment dazuaddiert, erhält man das tatsächlich abgegebene Antriebsmoment.

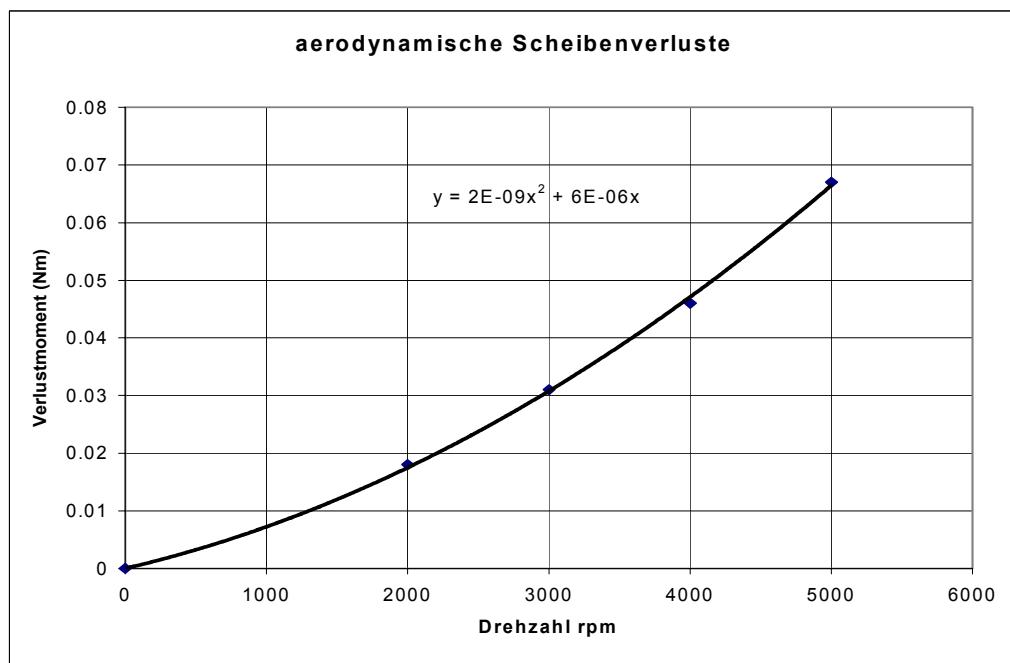


Fig. 32 aerodynamische Scheibenverluste mit Korrekturformel (gez. Brü)