

Jahresbericht 2005, 2. Dezember 2005

# Projekt

## Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B

Autor und Koautoren	Philipp Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger
beauftragte Institution	Brückmann Elektronik
Adresse	Bahnhofstrasse 17 7260 Davos Dorf
Telefon, E-mail, Internetadresse	081 416 28 80, brueckmannellektronik@bluewin.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Projekt-Nr. 100985, Vertrags-Nr. 151155
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2004 bis 31. Dezember 2006

### ZUSAMMENFASSUNG

Der Stand der Arbeiten bei Milestone 3 wird zusammen mit ersten Resultaten beschrieben.

Die für den **Wärmetauscher im Arbeitsraum** benötigten Teile wurden gezeichnet und bei der EPFL gefertigt. Der Versuchsaufbau ist inzwischen weitgehend fertiggestellt. Vorversuche betreffend des Verhaltens der Kolbenflüssigkeit in den engen Kapillarspalten des Wärmetauschers zeigten, dass die Flüssigkeit nicht durch die Kapillarwirkung teilweise im Wärmetauscher hängen bleibt. Infolge wurde ein einfaches Wickelverfahren zur Herstellung der Wärmetauscher entwickelt und erprobt. Zudem wurde die ganze Topologie des BOP-B weitergedacht, mit dem Ergebnis, dass nun ein weit fortgeschrittenes und im Volumen stark reduziertes Konzept bereitsteht, nach welchem ein erster Prototyp gebaut werden kann.

Neue Entwicklungen im Bereich der Umkehrosmose (Meerwasser-Entsalzung) eröffnen zudem neue Perspektiven für einen wirtschaftlichen Einsatz des BOP-A, da neue Pumpen einen Einsatz von Wasser (statt Oel) als Verdrängerkolben ermöglichen.

Nach den ersten, erfolgversprechenden Versuchen mit einem 1:2-Modell des Motgen wurde der Original-**Motgen** durch die Firma *Circle Motor* gezeichnet und aufgebaut. Der fertige Prototyp wurde Ende November ersten Tests bei *Brückmann Elektronik* unterzogen. Die ersten dabei gemachten Erfahrungen werden im Bericht dargestellt.

Für die Wirkungsgradmessungen wurde durch *Brückmann Elektronik* eine **24V / 80A - Stromversorgung**, eine **24V / 60A Motorelektronik** und eine neuartige **Drehmoment-Messeinrichtung** entwickelt und aufgebaut. Die Elektronik wurde bezüglich Wirkungsgrad analysiert und die Drehmoment-Messeinrichtung weiterentwickelt, so dass sie nun für die Messungen am Motgen-Prototyp bereitstehen.

Aufgrund konkreter Anfragen aus der Industrie wurde eine kleinere 20A-Motorelektronik aus der grossen abgeleitet, welche so aufgebaut ist, dass sie direkt in einen 24V / 500W-Motor eingebaut werden kann.

## Projektziele

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 Ökoverträglichkeit, da kaum toxische 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.

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

Im weiteren hat sich gezeigt, dass der Motor-Generator (Motgen) vor allem im kleineren Leistungsbereich unter 2 kW (als Batterieersatz in Inselanlagen) wirkungsgradmässig noch stark entwicklungsbedürftig, aber auch entwicklungsfähig ist. Ein solcher Motgen ist auch für weitere Anwendungen interessant, etwa als Generator für Kleinwasserkraftwerke oder als Energiesparmotor.

Deshalb sollen diese beiden Komponenten, Wärmetauscher und Motgen, in diesem Projekt weiterentwickelt und im Experiment bestätigt werden. Können die Arbeiten zum erwarteten Abschluss gebracht werden, ist die Grundlage für den Bau eines ersten, voll funktionsfähigen BOP-B-Speichers gelegt.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### 1. WÄRMETAUSCHER (I. Cyphelly)

Der Wärmetauscherprüfstand wurde bei unserem Partner, dem LEI von Prof. Rufer an der EPFL aufgebaut. Das dortige Projekt zielt auf die Erarbeitung hauseigener Grundlagen in Zusammenhang mit der Kombination von BOP-Prinzipien mit Supercap- und MEPT-Elektroniken ab. Obwohl der Prüfstand messtechnisch noch nicht operativ ist (die Inbetriebnahme des Prüfstandes ist für Dezember vorgesehen), wurden entscheidende Teilaspekte in direktem Zusammenhang mit dem Einsatz der verschiedenen Varianten der BOP-B-Wärmetauscher untersucht und konstruktiv ausgestaltet.

Nebst dem eigentlichen Tauschereffekt sind nämlich weitere Untersuchungen von grundlegenden Aspekten unentbehrlich, und zwar vorab die des **Wasserhaushaltes** der Flüssigkolben, insbesondere im Hinblick auf die Abdrift der Hubzentrierung und Hublänge durch die Luftbefeuchtung mit Verlusten in Richtung Hochdruck im Verdichterbetrieb und in Richtung Auspuff bei motorischem Betrieb; in diesem Zusammenhang erlangt die Ausgestaltung des **gesteuerten Hochdruckventiles** (zwischen Hochdruckkolben und Speicher) und des **Auspuff-Kondensators** samt Rückführung eine entscheidende Bedeutung. Die **topologische Anordnung** der Elemente in Abhängigkeit

der Tauscherwahl wurde für mehrere Kombinationen von Kolbensystemen optimiert, wobei sich für die Anordnung von mechanischem Vordruckkolben mit Sprühung gepaart mit Hochdruck-Flüssigkolben samt gewickeltem Plattentaucher bestehende Lösungen finden liessen: diese Ausgestaltungen haben gegenüber allen anderen Optionen den Vorteil einer ausserordentlichen Kompaktheit (ca. 12 Liter / kW gegenüber 50 Liter / kW bei doppel-Flüssigkolben) trotz einfachstem Aufbau, was sich nicht nur im Preis/Materialaufwand niederschlägt, sondern auch infolge des Leichtbaus Optionen in **mobilen Anwendungen** offenhält. Für diese Anordnungen wurde auch die **Wasserrekuperation** eingehend untersucht und alle möglichen Wasserquetschungen eliminiert, so dass eigentlich nach einer Festlegung des Tauscheraufbaus und dessen versuchsmässigen Funktionsnachweis umgehend die Detailkonstruktion eines Versuchsmusters des Luft/Welle bzw. Luft/Strom-Wandlers in Angriff genommen werden könnte, zumal auch einfache Bauarten der **Sprühpumpe** ohne Hilfsantrieb konzeptmässig vorliegen.

Die definitive Fixierung auf die oben dargestellte Kolben/Wärme-tauscherkombination würde auch zur Vereinfachung des **Anfahrverhaltens** nach längerem Stillstand beitragen, da die relativ bescheidene Wassermenge durch die mechanische Hubbegrenzung des Vordruckkolbens rasch wieder Tritt fassen kann, wobei sich das Flüssighubmanagement lediglich mit dem Ausgleich der Flüssigkeitsmengen auf beiden Kolbenseiten befassen muss.

Schliesslich wurde ein **Wickelverfahren** für eben diesen Plattentaucher erprobt, das mindestens in den Anfängen eine zügige Fertigung des Hochdruckkolbens ermöglichen soll, so dass die Plattenvariante sich vorerst als einfachste Lösung des Hochdrucktauschers anbietet, da das Sprüh-pumpsystem im Hochdruckbereich entfällt.

Der Prüfstand wurde gemäss dem Schema des letzten Jahresberichtes aufgebaut (s. Fig. 3), und zwar mit einer kräftigen Pumpengruppe, die eine weit grössere Leistung bieten kann, als für das kleine Prüfmuster im Normalbetrieb erforderlich ist; somit können auch die Phasen beschleunigter Bewegung analysiert werden, die der Leistungsumschaltung in der Niederdruckphase (Geschwindigkeitssprung) entsprechen, die ja eine der hervorragendsten Eigenschaften des BOP-B - Prinzips ist. Ein grosses Gewicht wurde auf die Anpassung der Messtechnik gelegt, wobei mittels genauer Hubverlaufmessung in Abhängigkeit des Druckes schon erste Aussagen über die Isothermie möglich sein sollten; in weiteren Schritten sollen Temperatursonden in den Prozess eingefügt werden.



Fig. 1 Flüssigkolben mit  
Wärmetaucher  
Foto EPFL



Fig. 2 Wärmetaucher im Flüssigkolben  
Foto EPFL

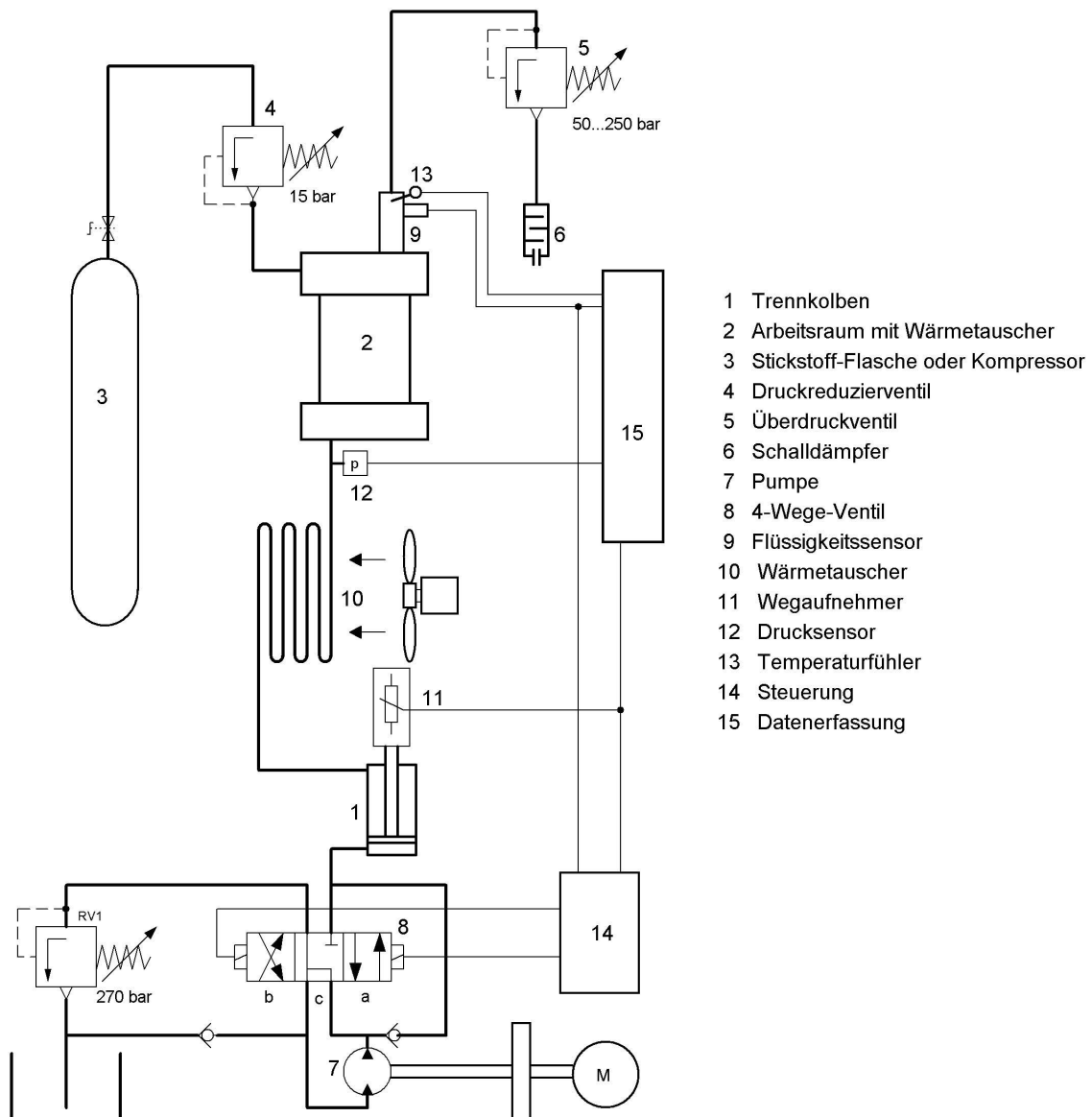


Fig. 3 Prinzipschema des Wärmetauscher-Prüfstandes

gez. Brückmann

## 2. MOTGEN (Brückmann Elektronik)

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem 1:2-Modell des Motgen konstruierte und baute Herr Lindegger (Circle-Motor) einen Prototypen in Originalgrösse. Das Modell wurde leider erst 3 Tage vor Abgabetermin des Berichtes fertig, weshalb noch keine genauen Messergebnisse präsentiert werden können. Erste Wirkungsgradmessungen konnten jedoch durchgeführt werden. Diese entsprechen noch nicht den hoch gesteckten Erwartungen. Die folgenden Bilder zeigen aber die einzelnen Bauteile sowie den zusammengabauten Motgen auf dem sehr provisorischen Versuchsaufbau für erste Messungen. Im Anhang finden sich zudem ein Längsschnitt des Motgens.



Fig. 5 mechanische Bauteile des Motgen Foto: Lindegger



Fig. 4 Versuchsaufbau  
Foto: Brückmann

Das folgende Diagramm zeigt den Wirkungsgradverlauf dieser ersten Messungen (immer inklusive Elektronik und Motorkabel gemessen):

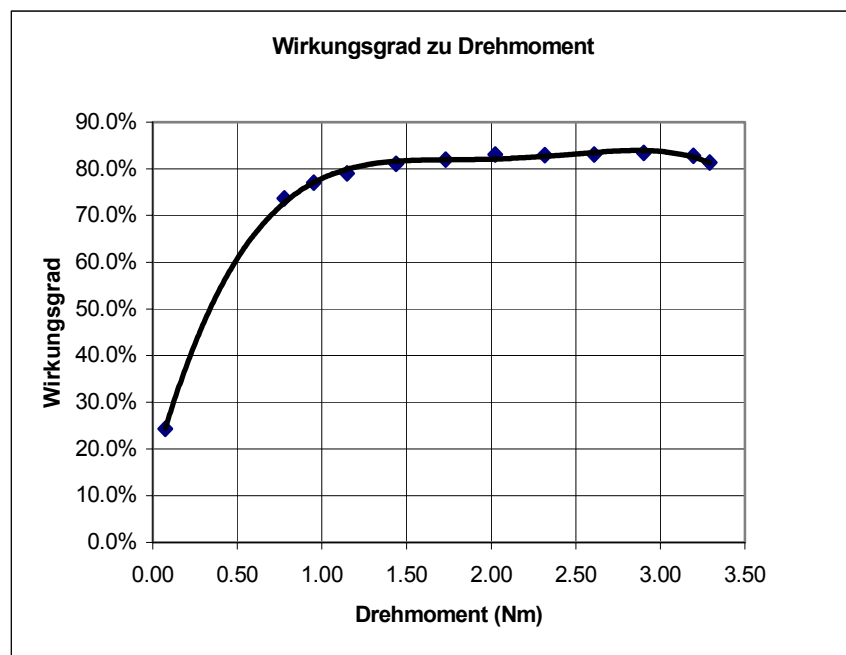


Fig. 6 Wirkungsgradverlauf Motgen, erste Messungen  
Autor: Brückmann

Auffallend hoch sind die Leerlaufverluste mit etwa 107W (ohne Elektronik) bei 4800 rpm. Wird die Drehzahl auf 3000 rpm reduziert, gehen die Leerlaufverluste auf 45W zurück, also überproportional. Die Auslaufzeit des Motors, ausgehend von 4800 rpm und ohne Bremsscheibe, beträgt ganze 105s, was auffallend lange ist und darauf hin deutet, dass nicht viel Reibung im System ist. Alle diese Tatsachen lassen vermuten, dass aerodynamische Verluste eine grosse Rolle spielen.



### 3. ELEKTRONIK (Brückmann Elektronik)

Das ursprünglich einmal in Erwägung gezogene Projekt einer Elektronik mit vorgeschaltetem DC-Chopper und nachfolgender Kommutierbrücke (welche immer im Vollblock arbeitet) wurde fallengelassen. Dies insbesondere, weil der Wirkungsgrad durch den zweimaligen Silizium-Durchgang systembedingt zu stark reduziert worden wäre. Zudem besteht im Falle des BOP-B kein zwingender Bedarf nach einem Betrieb in Teilaussteuerung (ausser im kurzen Moment des Hochfahrens), so dass im Normalbetrieb immer mit Vollblock und damit optimalem Wirkungsgrad gefahren werden kann. Die Richtigkeit dieser Entscheidung wird durch Erfahrungen an der EPFL untermauert, wo die ganze Wirkungsgradkette eines BOP-A-Wandlers genau analysiert wurde.

Für die Versuche mit dem Motgen wurde eine Elektronik für 60A Nennstrom (maximal 85A) gebaut und bezüglich Wirkungsgrad genauer ausgemessen. Im Anhang befindet sich eine ausführliche Beschreibung dieser Elektronik. Die Ergebnisse sind im folgenden Diagramm dargestellt:

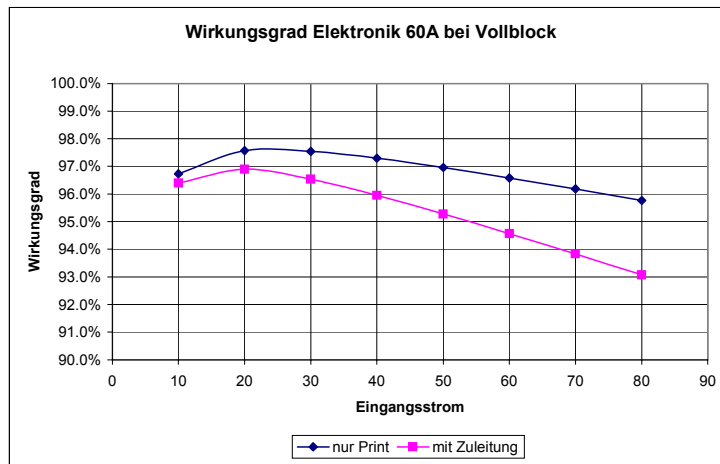


Fig. 7 Wirkungsgrad 60A-Elektronik Autor: Brückmann

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, leider in Kleinmengen derzeit nicht auftreibbar), welche nur noch 3.3mOhm Durchschaltwiderstand aufweisen (statt 5mOhm wie jetzt verwendet). Dadurch und mit einem professionelleren Layout (doppelseitig 70µ 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.

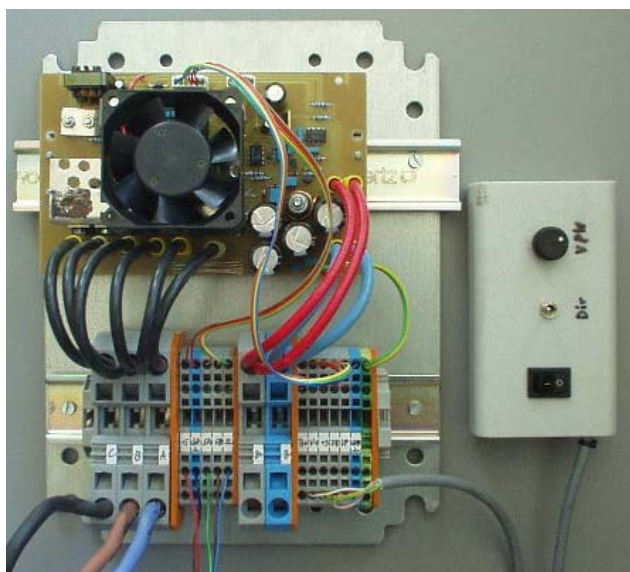


Fig. 9 Elektronik 60A mit Bedienteil  
Foto Brü



Fig. 8 Elektronik 60A eingebaut  
Foto: Brü

Aufgrund konkreter Anfragen aus der Industrie wurde aus der 60A-Elektronik eine kleinere Version für 20A Dauerstrom abgeleitet. Diese wurde zudem so konstruiert, dass sie in ein Motorgehäuse eingebaut werden kann (Print-Durchmesser 100mm). Da bei dieser Leistung der Ventilator entfällt, wird der Eigendbedarf der Elektronik deutlich kleiner, wodurch sich ein sehr günstiger Wirkungsgradverlauf ergibt (Fig. 4).

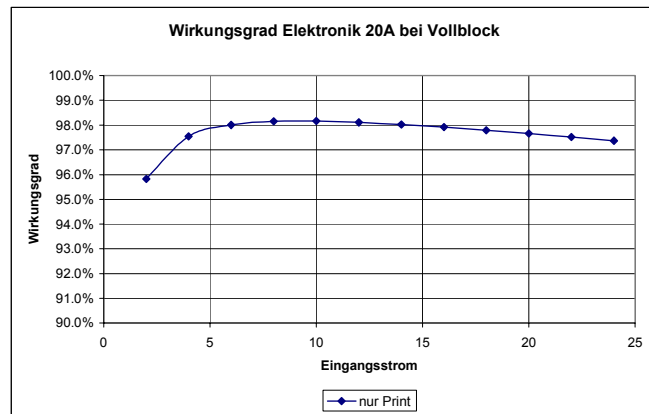


Fig. 10 Wirkungsgrad 20A-Elektronik Brückmann

Die folgenden Bilder zeigen die Elektronik, allein und an einen Motor angebaut.

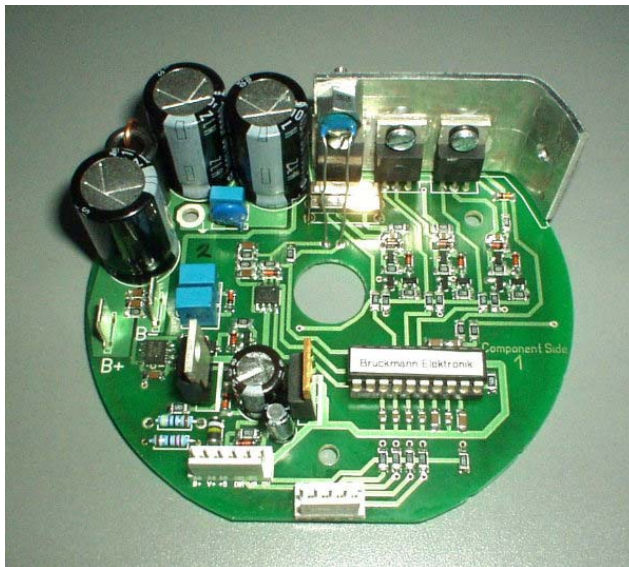


Fig. 12 runde 20A-Elektronik Photo: Brückmann



Fig. 11 Elektronik an Motor angebaut Photo: Lindegger

Die Elektronik wurde so konstruiert, dass auf der Rückseite der Leiterplatte drei Hallsensoren aufgelötet werden können. Auf diese Weise lässt sich die Position des Rotors zusammen mit einer magnetisierten Geberscheibe ohne zusätzliche Verdrahtung erfassen.

#### 4. MESS-INFRASTRUKTUR (Brückmann Elektronik)

Messungen an den Prototypen bedingen eine Mess-Infrastruktur, welche den spezifischen Anforderungen genügt und jederzeit zur Verfügung steht. Daher wurde eine sehr preiswerte Ausrüstung geschaffen, welche genügend genaue Messungen an den Prototypen im Hause ermöglicht.

## 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 Steuerungsbaubereich. 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. 13** 24V / 80A Stromversorgung mit Bremschopper Foto: Brückmann

## Drehmomentmessung

Immer wieder Kopferbrechen 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.

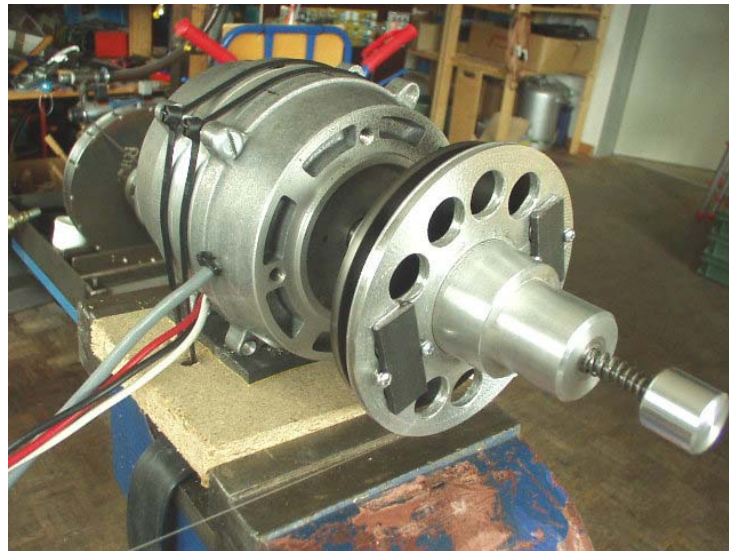
Aus dieser Not heraus entstand schliesslich eine sehr einfache, direkt auf die Motorwelle aufsetzbare Brems- und Messeinrichtung, welche zusammen mit einer Federwaage recht genaue Drehmomentmessungen erlaubt. Die Federwaage lässt sich mit einem bekannten Gewicht sehr leicht und genau eichen und der Hebelarm ist klar definiert. Die Lagerverluste der Messeinrichtung ge-



hen 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 einer 2mm Aluminiumscheibe. 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 dabei durch Variieren des Magnet-Abstandes in weiten Grenzen eingestellt werden.

Ein erster Prototyp dieser Messeinrichtung wurde wie der Motgen im verkleinerten Massstab gebaut und kann so für kleinere Motoren bis etwa 200W Abgabeleistung verwendet werden.



**Fig. 14 kleine Drehmomentwaage Foto: Brückmann**

Aufgrund der überaus positiven Erfahrungen mit der kleinen Messeinrichtung wurde eine doppelt so grosse gebaut, zunächst in der gleichen Bauart. Es zeigte sich aber schon bei den ersten Versuchen, dass trotz Fremdbelüftung die Scheibe bei 1600W Antriebsleistung schon nach einer Minute viel zu heiss wurde. Daraufhin wurde die Scheibe so geändert, dass sie einer innenbelüfteten Scheibenbremse ähnelt. Zwischen der Stahlscheibe und dem bremsenden Aluminium-Ring ist nun ein Luftspalt von 2mm, wobei die radialen Abstands-Streifen für die Befestigung des Ringes als Lüfterflügel wirken. Dadurch werden zwar die aerodynamischen Verluste grösser, aber die Kühlung ist nun so effektiv, dass problemlos dauernd eine Antriebsleistung von 1.8 kW verheizt werden kann.

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. 16 grosse Drehmomentwaage Foto: Brü



Fig. 15 ohne Magnetscheibe Foto: Brü



Fig. 17 Radialansicht der Drehmomentwaage Foto: Brückmann

Die aerodynamischen Verluste wurden experimentell ermittelt 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.

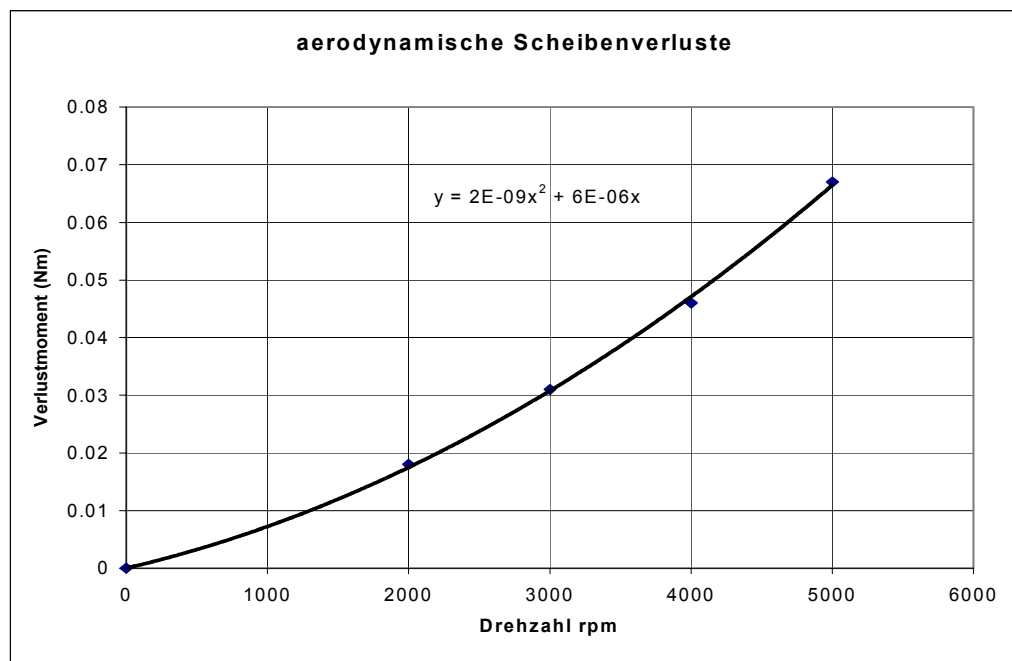


Fig. 18 aerodynamische Scheibenverluste mit Korrekturformel Autor: Brü

## Nationale Zusammenarbeit

### **Am Projekt beteiligte Personen und Firmen:**

**Philipp Brückmann**, Brückmann Elektronik, Davos:

Projektleiter und Auftragnehmer des BFE, Entwicklung Motgen, Entwicklung Elektronik zu Motgen, Entwicklung und Bau Ventilansteuerung

**Iván Cyphelly**, Cyphelly & Cie, Techniques Hydro-Mécanique, Les Brenets:

Mechanik Motgen, Wärmetauscher-Versuche

**Markus Lindegger**, Circle Motor AG, Gümligen

Entwicklung und Bau Motgen

### **EPFL-LEI (ETH Lausanne)**

Die Realisierung des Versuchszylinders mit Wärmetauscherpaket konnte im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem *Laboratoire d'électronique industrielle* (LEI) der EPFL durchgeführt werden. Die Versuchseinrichtung wurde dort aufgebaut und die Versuche sollen auch dort durchgeführt werden. Das eigenfinanzierte EPFL-Projekt umfasst im weiteren die Untersuchung eines Hybridkonzeptes für Druckluftspeicher in Kombination mit Superkondensatoren als Hilfsspeicher und Leistungspuffer ([3] und [4]). Sektorielle Abklärungen mit einer Prototypanlage konnten dabei mit Unterstützung von weiteren Partnern unternommen werden [5].

## Internationale Zusammenarbeit

Durch Herrn Cyphelly wurden die bestehenden Kontakte mit Gruppierungen gepflegt, die ähnliche Aufgaben betreuen (*Rosseta/Dr. Täubner, Trib. Inst. in Clausthal-Zellerfeld/Prof. Bartsch usw*) und deren Fortschritte in nahegelegenen Gebieten der Druckluftspeicherung recht bemerkenswert sind, unsere Thematik jedoch nicht direkt berühren.

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

I. Cyphelly: Grosse Impulse für die Druckluft-Speichertechnik sind neuerdings aus einer relativ unerwarteten Ecke festzustellen, und zwar aus dem Fundus der Bauelemente für die **Umkehrosmose**. Dies betrifft insbesondere die hydrostatischen Einheiten. Die **Pumpen** für die Einspeisung und die **Motoren** für die Energierückgewinnung werden vermutlich bald eine angepasste Lösung darstellen, natürlich geeignet für Wasser und für Drücke mit steigender Tendenz (derzeit bis zu 140 bar), was für unsere Druckluft-Speichertechnik einem Quantensprung entsprechen würde: einerseits könnte man in beiden BOP-Typen A&B direkt mit Wasser oder Wasserbasierten Flüssigkeiten operieren (was z.B. im A-Typ das Speicher-Trennmembranenproblem eliminieren und den Preis drastisch senken würde), andererseits wäre die Lebensdauer und der Wirkungsgrad aus pumpeninternen Gründen nachhaltig verbessert. Dies erklärt sich durch die Notwendigkeit, bei Wasserhydraulik auf Wälzlager zu verzichten und diese durch Kombinationen von hydrodynamischen und hydrostatischen Effekten zu ersetzen (was eine ungemein aufwendige Entwicklungsarbeit voraussetzt, an der schon viele gescheitert sind), was bei Erfolg jedoch die Verluste und die Alterung verschwinden lässt (es sei hier daran erinnert, dass bei beiden Speichertypen A&B der Flüssigkolben aus Sicherheitsgründen und wegen der Luftlöslichkeit an der Trennfläche zur Luft sinnvollerweise Wasser sein sollte). Wir werden diese Entwicklung weiterhin schärfstens beobachten, zumal eine der Aktivitäten des Autors die Umkehrosmosis ist und diese Entsalzungssys-

teme zugleich eine wichtige Kundengruppe für die Druckluftspeicherung darstellen wird, da hier Leistungsfluktuationen unerwünscht sind.

Brückmann: Beim **Motgen** konnte eine Konstruktion gefunden werden, die herstellungstechnisch sehr interessant ist (viele Teile relativ einfach und kostengünstig herstellbar) und die über die vorgesehene Anwendung als Motgen im BOP-B-Druckluftspeicher auch weitere Anwendungsgebiete abdeckt. So ist die entwickelte Bauform sehr geeignet als **Generator in Kleinspannungs-Wasserturbinen**. Durch einfaches Auswechseln der (physikalisch kleinen) Wicklungsscheibe kann dabei die Drehzahl-Spannungscharakteristik den jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Weitere Anwendungen sind etwa elektrische Bootsantriebe (Innen- oder Aussenborder), Getreidemühlen (wo das relativ grosse Trägheitsmoment ein Vorteil darstellt), solar betriebene Kühlaggregate oder Getreidemühlen etc., wo der Motor aufgrund seines guten Wirkungsgrades als "Energiesparmotor" eingesetzt werden kann.

Erste (noch nicht abgesicherte) Versuche am 29.11.2005 mit dem Motgen-Protoyp zeigten, dass der Wirkungsgrad noch deutlich unter den Erwartungen liegt. Dies ist insbesondere auf die noch zu grossen Leerlaufverluste zurückzuführen. Wo diese genau ihre Ursache haben, wird Gegenstand der nächsten Untersuchungen sein. Wirbelstromverluste scheinen es nicht zu sein, eventuell aber aerodynamisch bedingte Verluste. Dies kann aufgrund des überproportionalen Anstieges mit der Drehzahl vermutet werden. Eine weitere Ursache wird in den hohen Rippelströmen infolge der kleinen Motorinduktivität vermutet.

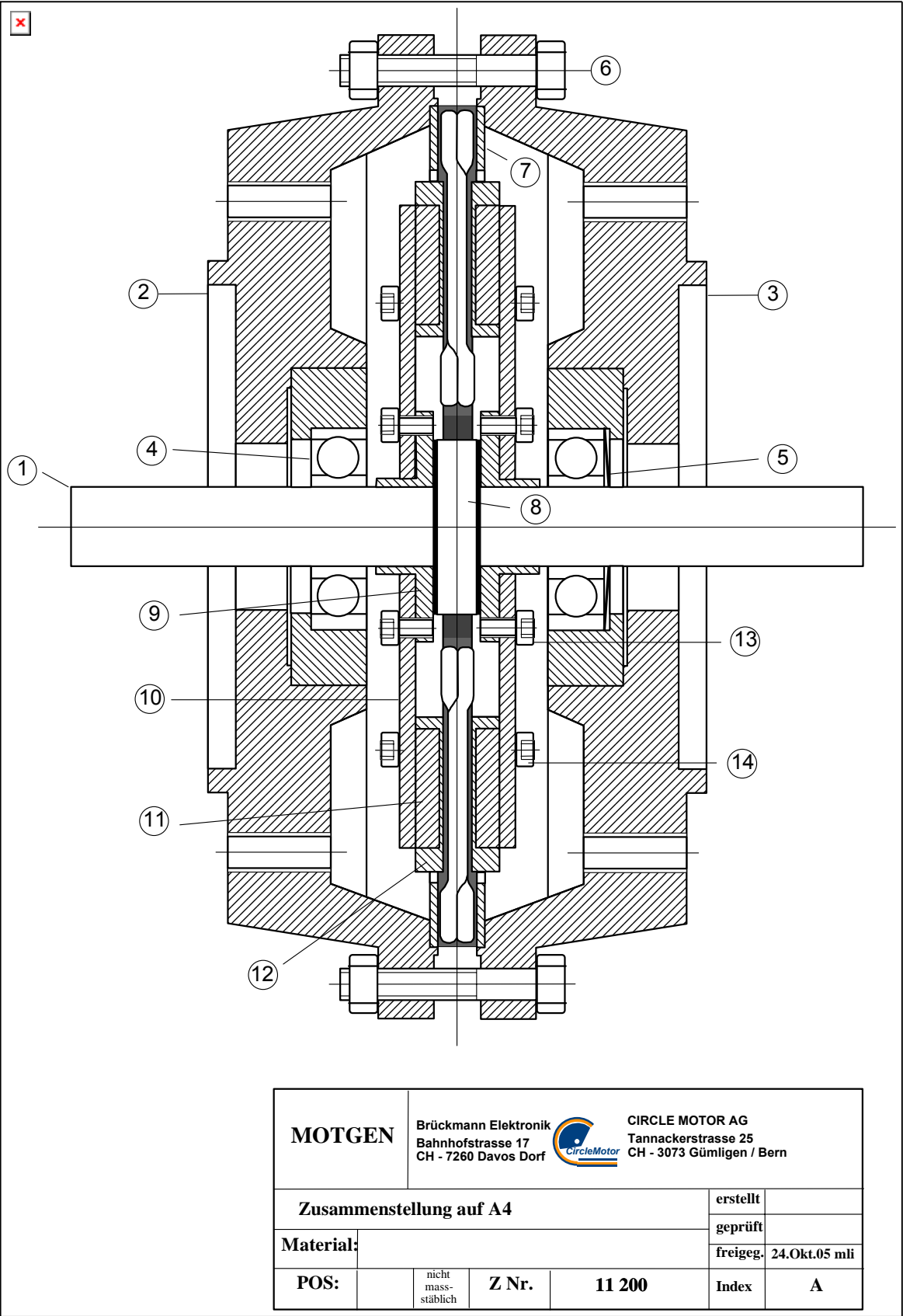
Die Elektronik konnte im Rahmen des Projektes so weiterentwickelt werden, dass nun auch eine kleinere Version vorliegt, welche dank ihrem guten Wirkungsgrad von typisch 98% direkt in einem 500W-Motor eingebaut werden kann. Dabei konnten Synergien mit dem Projekt "Energiespar-Motor" genutzt werden und es entstanden bereits erste Kontakte zur Industrie.

## 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] S. Lemofouet, A. Rufer: **Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors with MEPT(Maximum Efficiency Point Tracking)**, IPEC 2005: International Power Conference, 4.-8. April, Niigata, Japan
- [4] S. Lemofouet, A. Rufer: **Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors with MEPT(Maximum Efficiency Point Tracking)**, EPE 2005: European Conference on Power Electronics and Applications, 11.-14. September, Dresden, Germany.
- [5] A. Rufer, S. Lemofouet: **Energetic Performance of a Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors**, EPE-PEMC, 2006, (submitted paper).

Anhang

1. ZEICHNUNG DES MOTGEN





## 2. BESCHREIBUNG DER MOTOR-ELEKTRONIK

### 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. 60A
<b>Eigenbedarf:</b>	ca. 200mA
<b>Strombegrenzung:</b>	bei ca. 85A 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 kühlt

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 Drehrichtungsumkehr 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 Regelektronik

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.