

Jahresbericht 2004, 27. Dezember 2004

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, brueckmannelektronik@bluewin.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100985/ 151155
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2004 bis 31. Dezember 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Die Berichte "Einsatz von Druckluftspeichersystemen" sowie "Technische Grundlagen der Druckluftspeicherung" (beide DIS-Projekt NR. 100406) haben aufgezeigt, dass die Druckluft-Speichertechnik vom Prinzip her sehr geeignet ist, einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Energiewirtschaft zu leisten. Vorteile der Druckluft-Speichertechnik sind insbesondere die relativ einfache, robuste Technik sowie die gute Ökoverträglichkeit. 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.

Es hat sich gezeigt, dass im wesentlichen zwei Elemente noch einer eingehenden Untersuchung bzw. Weiterentwicklung bedürfen. Da sind zum einen die Wärmetauscher in den Arbeitsräumen des Druckluftwandlers, ohne die ein guter Wirkungsgrad nicht möglich ist, und zum andern der Motor-Generator (Motgen), der insbesondere bei kleinen Leistungen (Batterieersatz) wirkungsgradmässig noch stark entwicklungsbedürftig ist.

Bei den Wärmetauschern geht es darum, den bereits theoretisch erbrachten Funktionsnachweis experimentell zu bestätigen und eine praxistaugliche Ausführung zu finden. Dazu wird ein Versuchsaufbau erstellt, welcher die Messung der Temperaturverläufe während der eigentlichen Kompression bzw. Expansion ermöglicht. Begleitend dazu werden Konzepte für die Ventilansteuerung entwickelt und ausgetestet.

Parallel dazu wird ein hocheffizienter 24V-Motgen entwickelt, der im Leistungsbereich von 1 - 1.5kW inklusive Steuerelektronik einen Wirkungsgrad von über 90% (in eine Richtung) aufweisen soll. Ein Konzept ist bereits vorhanden und erste Versuche an einem 1:2-Modell haben bereits erste Resultate geliefert. Dieser Motgen ist mechanisch bereits so ausgelegt, dass er in einem künftigen 24V-Solarsystem mit Druckluft-Batterie eingesetzt 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 Oekoverträglichkeit, 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.

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.

A. Wärmetauscher

Ein Schlüsselement für die erfolgreiche Realisierung des BOP-B-Wandlers sind die Wärmetauscher in den Arbeitsräumen. Es existieren bereits drei konkrete Ideen, wie diese Wärmetauscher realisiert werden können (Plattenstapel, Wickel, Sprühsystem). Der theoretische Funktionsnachweis ist bereits erbracht, wobei aber gewisse Effekte noch nicht berücksichtigt worden sind (z.B. Benetzung, mechanische Stabilität etc.). Ziel der Arbeiten ist es, 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 auf Grund der Versuche erwartet werden?

B. Motgen

Der Motgen ist zur Zeit dasjenige Glied der Kette, welches bei kleinen Leistungen (Inselanlagen) den Wirkungsgrad am stärksten einschränkt. Dies ist insbesondere 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 dazugehöriger 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 von 4500 rpm \pm 500 rpm liegen. Am Schluss dieses Projektes sollen folgende Elemente vorhanden sein:

1. Prototyp mindestens eines Motgens inkl. Steuerelektronik
2. Dokumentation der Messergebnisse
3. Mechanisches Konzept, wie der Motgen in einen 1.5kW-BOP-B-Wandler integriert werden kann, unter Berücksichtigung der besonderen Gegebenheiten bezüglich Hydromotoren und Schwungrad

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

A. Wärmetauscher

Die Messungen an den Wärmetauschern werden mit dem Versuchsaufbau, wie er schon im *DIS-Projektbericht 100406 (S. 81)* skizziert ist, durchgeführt. Dieser Versuchsaufbau ist im folgenden nochmals dargestellt (Fig. 1), jedoch ergänzt mit den vorgesehenen Messstellen.

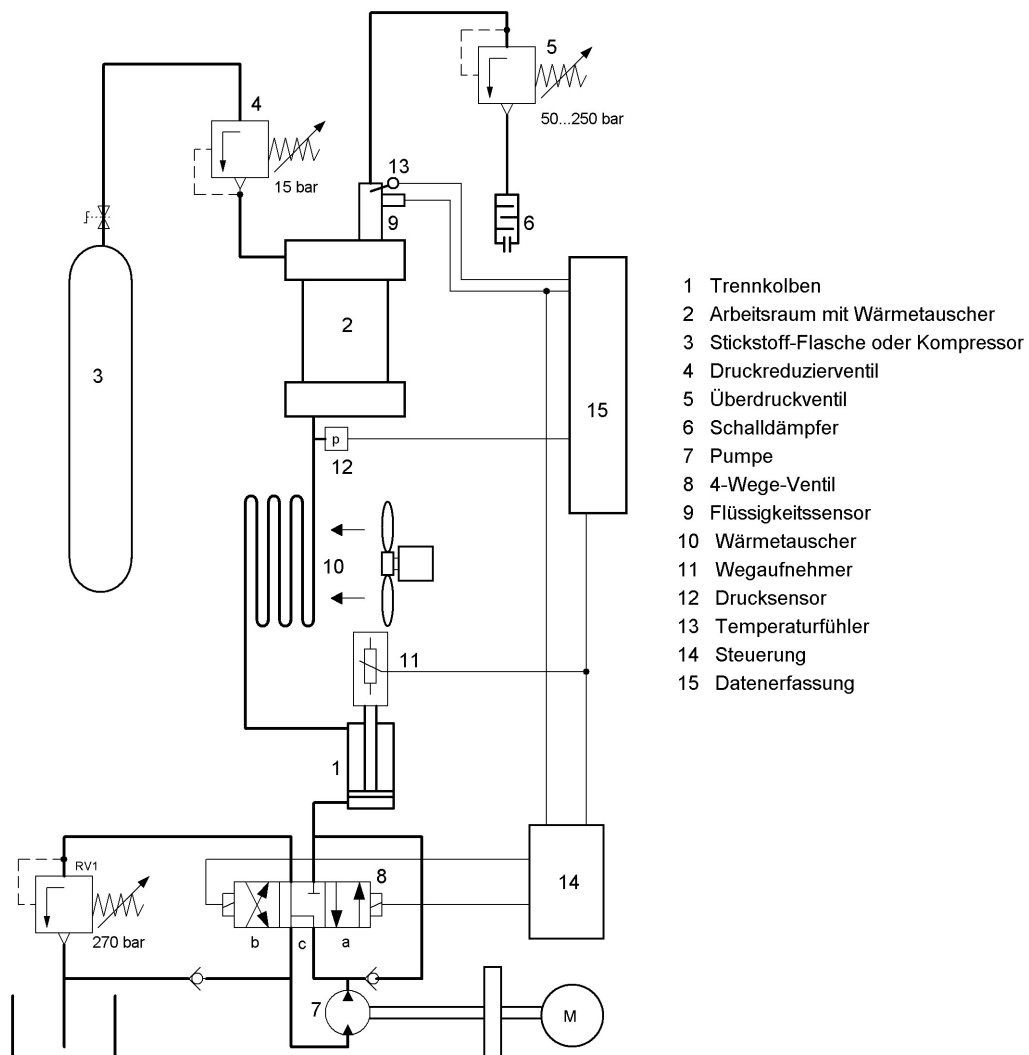


Fig. 1 Hydraulisches Versuchsaufbau

gez: Brückmann

Der eigentliche Wärmetauscher befindet sich im Hochdruck-Flüssigkolben mit etwa 1 Liter Hubraum (Pos. 2 in Fig. 1) und ist in der als erstes zu untersuchenden Ausführung als Plattenpaket aus dünnen Alublechen ausgeführt. Diese Alubleche nehmen während der Kompressionsphase mittels ihrer Wärmekapazität die Kompressionswärme auf und geben diese anschliessend, wenn sie ganz von Wasser umgeben sind, an die Kompressionsflüssigkeit ab. Da aufgrund eines einzelnen Kompressionsvorganges nur ungenügende Aussagen gemacht werden können, ist vorgesehen, die ganze Apparatur während einer gewissen Zeit zyklisch arbeiten zu lassen. Damit sich in diesem Fall die Arbeitsflüssigkeit nicht unzulässig erwärmt, ist ein externer Wärmetauscher vorgesehen. Dieser führt die Wärme an die Umwelt ab.

Um einen zyklischen Betrieb zu ermöglichen, muss neben der eigentlichen Messtechnik eine passende Ventilansteuerung entwickelt und gebaut werden. Diese muss das Schaltventil umsteuern, sobald Wasser in den Ausgang des Hochdruckzylinders eindringt, und wieder neu starten, wenn kein Wasser mehr im Zylinder ist.

Messkonzept

Mit Hilfe eines Linear-Wegaufnehmers wird die Stellung des Trennkolbens erfasst und aufgezeichnet. Die Kolbenstellung ist eine direktes Mass für das verdrängte Volumen im Kompressionsraum. Dieses Signal kann in einer ersten Näherung auch zur Steuerung herangezogen werden, vorausgesetzt, die Positionen für "Zylinder voll" und Zylinder leer" sind genau bekannt. Da im Praxisbetrieb durch Kondenswasser und Leckagen diese Stellungen verschoben werden können, ist es notwendig, dass durch einen Flüssigkeitssensor immer wieder eindeutig festgestellt wird, wenn der Zylinder wirklich gefüllt ist.

Eine schnelle Drucksonde misst den Druck im Arbeitsraum. Der Einfachheit halber ist dieser Drucksensor am Flüssigkeits-Eingang des Arbeitsraumes platziert.

Durch die gleichzeitige Erfassung von Druck und Kolbenstellung kann nun der Kompressionsvorgang bezüglich seiner Isothermie beobachtet werden. Jede Erwärmung des Gases äussert sich in einem Druckanstieg gegenüber der idealen Isothermen-Kurve. Aus dieser Druckabweichung lässt sich die mittlere Temperatur des Gases zu jedem Zeitpunkt berechnen. Für die Bestätigung ist zusätzlich ein Pt-100-Temperaturfühler nach dem Ausgangsventil des Zylinders vorgesehen, welcher die Temperatur des ausgestossenen Gases misst. Der eigentliche Kompressionsvorgang dauert etwa 1-3 Sekunden, ist also recht langsam.

Stand der Arbeiten

Der Hochdruckkolben mit verschiedenen Plattenpaketen wurde gezeichnet und befindet sich in Lohnfertigung. Die druckseitige Ventilsteuerung ist in der Konzeptphase, wobei zwischen mehreren Alternativen gewählt werden kann. Nach den Funktionsprüfungen der einzelnen Bausteine dürfte der erste Messbetrieb in ca 4-5 Monaten aufgenommen werden. Die Evaluation eines geeigneten Flüssigkeits-Detektors am Zylinderausgang ist ebenfalls bereits angegangen worden, wobei sich hier eine Eigenentwicklung aufdrängt, da kommerzielle Produkte für so hohe Drücke noch nicht gefunden werden konnten.

B. Motor-Generator

In zwei Sitzungen und diversen Telefongesprächen wurden verschiedene Konzepte für den Generator diskutiert und bewertet. Daraus entstand schliesslich das Konzept eines eisenlosen Scheibenläufers, welches inzwischen so weit entwickelt ist, dass ein Modell im Mst 1:2 gezeichnet und gebaut worden ist (siehe Fig. 2). Dieses Modell soll in erster Linie dazu dienen, verschiedene Wicklungsformen auszutesten, mit dem Ziel, eine möglichst rippelfreie DC-Spannung am Gleichrichter Ausgang zu erreichen. Ausserdem konnten so schon viele wertvolle Erkenntnisse für den Bau der Originalmaschine gewonnen werden. Der verkleinerte Massstab machte viele Arbeitsschritte einfacher und kostengünstiger. Die Verwendung von Standard-Flanschen hat die Entwicklung zusätzlich vereinfacht.

In Anbetracht der Verwendung im BOP-B Druckluftspeicher ist der Motor mechanisch symmetrisch aufgebaut, d.h. mit zwei identischen Flanschen und Wellenenden. Das erlaubt die beidseitige Anflanschung von zwei Hydromotoren, so dass sich die axialen Lagerkräfte aufheben.

Die Eck-Merkmale des Motors lauten:

- 12-polige Synchronmaschine mit Permanentmagneten
- eisenfreie Wicklung, so dass keine Ummagnetisierungsverluste anfallen
- elektronische Kommutierung durch Hallsensoren
- DC-Brückenspannung 24V (Betriebsbereich 22 - 28V)
- Drehzahl 4500 U/min (± 500 U/min) (Modell ca. 8000 U/min)
- Nennstrom 60A (Modell 10A)

Figur 3 zeigt einen Längsschnitt durch das Modell. Bei der Konzeption wurde darauf geachtet, dass die in der Wicklung entstehende Wärme durch den Rotor durch eine interne Zirkulationsströmung gut auf das ganze Gehäuse abgeleitet wird. Zudem wurde die Geometrie des Magnetkreises so gewählt, dass möglichst keine Streufelder nach aussen treten, welche Wirbelstromverluste im Gehäuse bewirken. Naturgemäss weist diese Motorbauart ein hohes Trägheitsmoment des Rotors auf, was jedoch in der vorgesehenen Anwendung kein Nachteil ist.

Als Magnete kommen scheibenförmige Neodymmagnete zum Einsatz, welche, durch eine Aluminiumschablone geführt, auf einer Stahlscheibe aufgeklebt sind. Die so erreichbare Feldstärke im Luftspalt liegt bei ca. 0.8 Tesla, und das bei einem Luftspalt von 8 mm (gerechnet).

Die Wicklung selbst ist auf einem Kunststoff-Träger aufgebracht und weist eine maximale Dicke von 4 mm auf. Die ganze Wicklungsring wird in einem Epoxy-Harz eingegossen, so dass die entstehenden Kräfte gut auf den Aussenring abgeleitet werden.

Erste Versuche mit dem Modell am 18.11.2004 haben gezeigt, dass die induzierte Spannung kleiner als berechnet ausgefallen ist. Eine Nachmessung der Flussdichte im Luftspalt ergab einen deutlich tieferen Wert als (überschlagsmässig) gerechnet, nämlich nur 0.58 Tesla. Als Ursache konnte die Feldverzerrung, verursacht durch die Nachbarmagneten, eruiert werden. Dieser normalerweise zu vernachlässigende Einfluss ist auf den extrem grossen Luftspalt von 8mm zurückzuführen. Der Luftspalt wurde in der Folge auf 6mm reduziert, was die Flussdichte auf 0.7 Tesla erhöhte. Dieser Nebeneffekt dürfte beim 1:1 - Motor wesentlich kleiner ausfallen, da der Luftspalt im Verhältnis zum Magnetdurchmesser nur noch halb so gross ist.

Das Modell hat sich bereits als eine sehr wertvolle

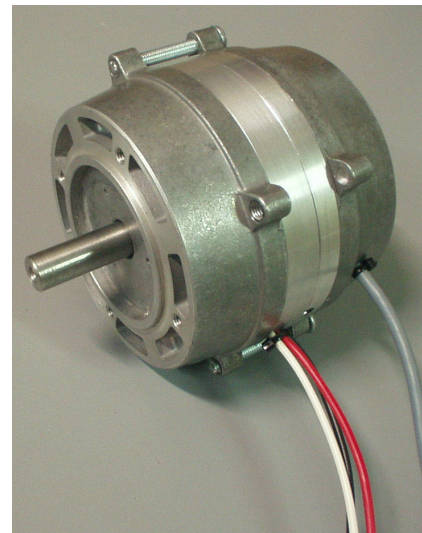


Fig. 2 Das Modell im MST 1:2
Bild: Brückmann

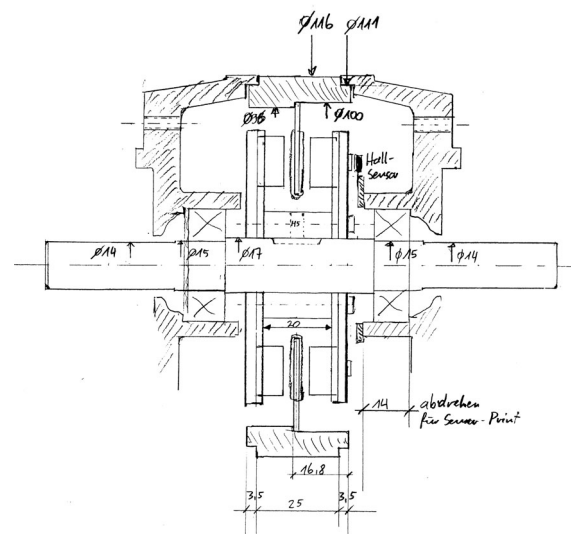


Fig. 3 Längsschnitt durch den 1:2-Motor
gez: Brückmann

Versuchsplattform erwiesen. Mit relativ geringem Aufwand können nun verschiedene Wicklungsgeometrien produktionstechnisch ausprobiert und elektrisch ausgemessen werden. Durch Verlustanalysen sind so bereits Rückschlüsse auf die grosse Maschine bezüglich Wirkungsgrad möglich. Diese Modellversuche werden noch so lange weitergeführt, bis ein experimentell abgesichertes Konzept für die grosse Maschine vorliegt. Erst dann wird die 1:1-Ausführung konstruiert und gebaut.

Bedingt durch die eisenlose Bauart, ist die Induktivität der Wicklung sehr klein (lediglich $5\mu\text{H}$ zwischen zwei Phasen beim Modell). Das macht die Ansteuerung über einen Pulsweitenmodulator schwierig. Eventuell müssen zusätzliche Drosseln in die Zuleitungen geschaltet werden. Alternativ kann die Steuerelektronik so ausgelegt werden, dass mit nur einer Drossel dieses Problem gelöst wird (siehe unten).

Motor-Elektronik

Eine passende Motorelektronik wurde bereits vor Projektbeginn durch Brückmann Elektronik entwickelt und ist in zwei Prototypen vorhanden. Sie basiert auf dem MC 33033 Brushless-Controller (rein analoger IC ohne Prozessor) und erreicht bei $24\text{V} / 60\text{A}$ einen Wirkungsgrad von über 98% bei Vollaussteuerung. Sie hat sich bereits bei einem Einsatz in Afrika bewährt und ist sehr robust aufgebaut. Allerdings benötigt sie für die Kommutierung eine Rückmeldung der Rotorposition (normalerweise über Hallsonden). Im Rahmen dieses Projektes soll diese Elektronik im Hinblick auf eine Verwendung im BOP-B weiterentwickelt werden. So wie sie jetzt aufgebaut ist, ist eine Spannungserhöhung im Generatorbetrieb nur in Ausnahmefällen möglich. Das bedeutet, dass der Generatorbetrieb zur Zeit nur bei Vollaussteuerung und der dabei entsprechend hohen Drehzahl möglich ist. Das ist jedoch nicht unbedingt ein Nachteil, da auch so ein sinnvoller Betrieb eines BOP-B-Speichers möglich ist (zusammen mit Supercaps, siehe [2]).

Sollte sich jedoch die zu geringe Induktivität der Motorwicklung als Problem erweisen, so lässt sich die Steuerung durch eine vorgeschaltete Halbbrücke erweitern (Fig. 4). Dadurch steigt zwar der Aufwand an Silizium, dafür erhält man aber eine Steuerung, welche im Generatorbetrieb die Spannung erhöhen und somit eine konstante Gleichspannung bei variabler Drehzahl liefern kann. Die eigentlichen Kommutier-Fet's werden dabei nur noch im Vollblock betrieben, ohne Pulsweiten-Modulation. Die Spannungseinstellung erfolgt ausschliesslich durch Takten der vorgeschalteten Halbbrücke. Die Zwischenkreis-Induktivität L glättet in diesem Fall den Strom und ersetzt die fehlende Wicklungsinduktivität des Motors. Der Zwischenkreiskondensator ist dabei relativ klein dimensioniert, so dass durch die Rippelspannung des Motors keine grossen Rippelströme entstehen. Ob diese Schaltung im Rahmen dieses Projektes zu Ende entwickelt wird, hängt davon ab, ob eine Motorbauart gefunden werden kann, welche unter Einhaltung des gesteckten Wirkungsgrad-Zieles genügend Eigeninduktivität aufweist.

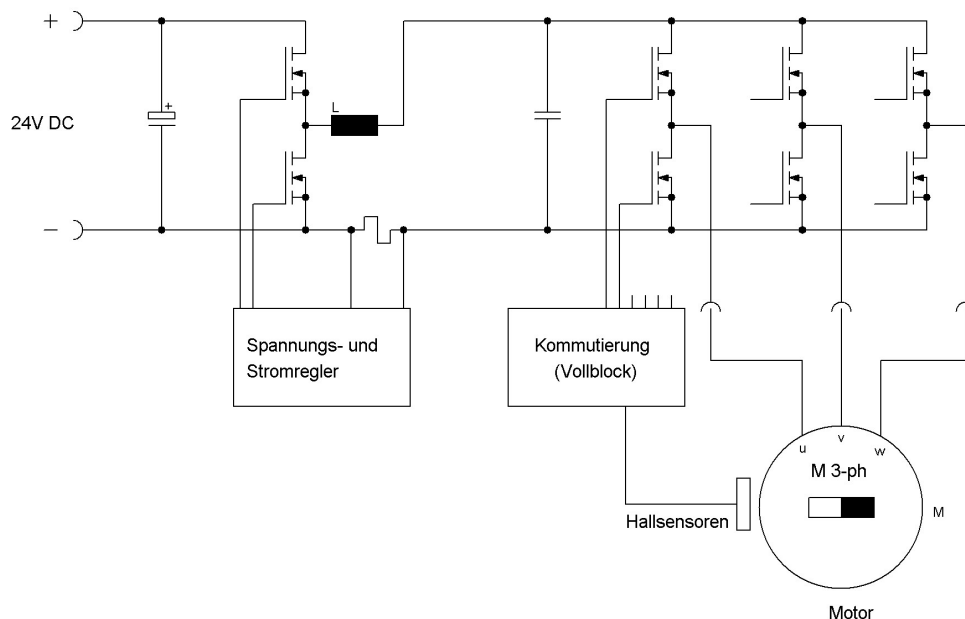


Fig. 4 Prinzipschema der Motorsteuerung gez: Brückmann

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 Motgen

Im weiteren wurde die mechanische Werkstatt der ETH Lausanne mit der Herstellung des Versuchs-Zylinders mit den Wärmetauscherpaketen beauftragt.

Die Alu- und Eisenscheiben für den Rotor des Modellmotors wurden durch die Firma *Laserjet 2000 AG* in Bödingen im Laser-Schneidverfahren hergestellt. Weitere Gehäuseteile stammen von der Firma *Kottmann Technik AG* in Steinhausen sowie von *Gebrüder Meier AG* in Regensdorf. Die Magnete wurden von der Firma *Webcraft GmbH* in Uster (www.supermagnete.ch) geliefert.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Da das Projekt erst am 1. Oktober 2004 startete, sind noch nicht allzu viele Ergebnisse vorhanden. Die Vorgaben für Ende Jahr 2004 konnten jedoch eingehalten werden und wurden im Falle des Motgens sogar übertroffen, ist doch bereits ein lauffähiges Modell im Mst 1:2 vorhanden. Die Versuche an diesem Modell sollen aufzeigen, ob der eingeschlagene Weg richtig ist, oder ob weitergehende Konzeptänderungen notwendig werden (z.B. Abkehr von der eisenlosen Bauart zu einer ähnlichen Bauart mit Metallpulverkern). Schon jetzt zeigt sich, dass die Scheibenwicklung rein produktionstechnisch die grösste Herausforderung darstellt und eventuell sogar aufgegeben werden muss.

Im Falle der Wärmetauscher-Versuche ist geplant, mit dem bereits in Herstellung befindlichen Hochdruckkolben in etwa 5 Monaten erste Versuche durchzuführen. Sollte sich dabei das gewählte Konzept mit den Plattentauschern wider erwarten als untauglich erweisen, so wird eine nähere Untersuchung der sogenannten Sprühsysteme angepeilt. Bei diesen wird während des Kompressions- bzw. Expansionsvorganges Wasser in den Arbeitsraum eingesprüht und so der Wärmeaustausch forciert. Dieses Verfahren wird zwar z.B. bei Schraubenverdichtern und Schiffsdieselmotoren bereits verwendet, ist jedoch in der Ausführung wesentlich aufwändiger, da einige komplexe Zusatzeinrichtungen benötigt werden.

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