

Schlussbericht **Mai 2004**

Einsatz von Druckluftspeichersystemen

ausgearbeitet durch
I. Cyphelly, A. Rufer, Ph. Brückmann, W. Menhardt, A. Reller
Cyphelly & Co,
Champ de Rive
CP 18
2416 Les Brenets

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

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

www.electricity-research.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung (deutsch)	1
Abstract (english)	1
Resume (Französisch)	2
1. Ausgangslage, Vorgehen	3
1.1 Bedeutung.....	3
1.2 Projektpartner.....	3
1.3 Projektziele.....	4
1.4 Vorgehen.....	4
2. Technik	4
3. Anwendungen, Vorteile, Anpassungen, Entwicklungen	7
4. Markt und Akteure	8
5. Quellenverzeichnis, Referenzen, Bibliographie	12
ANHANG I Vergleich von Druckluftspeichern und Redox Flow.....	13
ANHANG II Begriffe und Klassifizierung der Druckluftspeicher.....	16
ANHANG III Die Speicherbehälter für Druckluft.....	18
ANHANG IV SANDIA Diagam: Capital Costs per Energy vs. per Power.....	20
ANHANG V Öko-Effizienz von Druckluftspeichersystemen	21

ZUSAMMENFASSUNG

Seit ihrer Entstehung im 19. Jahrhundert (BRAMAH-Patent 1812) hatte die Hochdruck-Luftdruckspeicherung immer mit der jeweils vorherrschenden HighTech zu kämpfen resp. zu konkurrenzieren (meistens mit der Elektrochemie, von den Bleibatterien bis neulich zu Vanadium-Redox-Flow) und konnte sich deswegen nur in spezifischen Anwendungen durchsetzen (erste Grubenlok 1860, MEKARSKY-Tram in Paris, Nantes, Bern usw. ab 1876, stationäre Grossspeicherung ab 1977 in Huntorf...). Dies schuf bis anhin keine ausreichende Basis für eine zusammenhängende technologische Entwicklung.

Der in der letzten Zeit formulierte Wunsch, erneuerbare Energien in dezentraler Anordnung zu nutzen und die bestehende Netze mit lokalen Speichern zu stützen (z.B. zur Vermeidung von Blackouts durch Bäume), führt unweigerlich zur Frage nach einer preiswerten Speichertechnologie: dass die Druckluft unter Berücksichtigung der Speicherkapazität preislich unschlagbar ist, scheint allgemein anerkannt zu sein (s. Anhang IV). Zweifel bestehen lediglich bezüglich der Wandlereinheit, die z. Zt. nur durch brennerunterstützte Turbomaschinen realisiert wird (CAES-Konzept) und somit die Frage nach dem Wirkungsgrad und der Umweltverträglichkeit aufwirft: dieser Bericht basiert denn auch auf der Überzeugung, dass der Weg über Verdrängermaschinen (volumetrische Maschinen) die Lösung bringen kann, zumal hier der Schritt zur verlustarmen Isothermie relativ einfach durch Wärmetauscher in den Arbeitsräumen vollzogen werden kann, insbesondere falls diese aus Flüssigkolben bestehen (BOP-B – Konzept). Hier sind grosse Anstrengungen gefordert, zumal – wie oft in der Geschichte der Druckluftspeicherung – wieder einmal eine HighTech-Welle angesagt ist, in Form des Wasserstoff-Kreislaufes mit Elektrolyse und Brennstoffzelle; diesmal hat aber die Druckluft einige gute Argumente in der Hand, denn hier gilt der „Konkurrenzkampf“ einem Konzept, das nur mit Mühe einen Zykluswirkungsgrad von 40 % überschreiten kann. Wogegen bei der Druckluftspeicherung nach dem BOP-B-Konzept (BOP = Batterie mit Oelhydraulik und Pneumatik) bei entsprechender Entwicklungsinvestition über 70 % Gesamtwirkungsgrad erwartet werden kann. Obschon beide Technologien nicht primär dem Energietransport dienen sollen, ist doch die Druckluftproduktion vor Ort direkt ab erneuerbarer Energie oder ab Netz viel einfacher als mit der Elektrolyse, da hier kein besonders aufbereitetes Wasser zugeführt werden muss.

ABSTRACT

Right from the start in the 19th century (BRAMAH-Patent in 1812), the energy storage by pressurized gas had to fight against the supremacy of the High-Tech of the moment (generally against electrochemical solutions ranging from the lead-acid batteries to the recent developments in Vanadium Redox Flow systems) and could be used only in reduced fields of applications (the first mining locomotive in 1860, the MEKARSKY trams in Paris, Nantes, Berne etc from 1876 on...to the first stationary bulk storage in cavities in 1977 at Huntorf): this was no firm base for an uninterrupted development.

Recently pressure was put on storage technologies for grid connected renewable energies, for peak shaving/UPS applications and in order to avoid shedding and black-outs: it seems obvious, that compressed air is among the cheapest methods of energy storage (see ANNEX IV) but the converter system based on turbines with fossil fueled heat injection (CAES) raises environmental questions and doubts about efficiencies: this report tries to show that there may be another way to tackle the converter system by using positive displacement machines, as it is conceivable to integrate heat-exchangers in the piston workchambers to reach a near-isothermal process which would guarantee premium efficiencies; this integration is really simplified if the reciprocator is a liquid piston (BOP-B principle). A strong and fast development effort would be needed, as a high-tech wave is rolling again, trying to impose the hydrogen electrolysis-fuel cell-cycle as ultimate storage solution. But this time the compressed air holds most of the winning cards as we face a system which hardly will exceed the 40 % mark against an expected 70 % for pneumatics if substantial investment is made in R & D; it also must be stressed that storage filling with BOP is much easier anywhere – you just need air, whereas for the electrolyzer you need a lot of clean water: this may be difficult to find on islands or in desertic areas!

RESUME

Dès sa première apparition tout au début du XIXème siècle (brevet de BRAMAH en 1812), le stockage d'énergie par air comprimé sous haute pression (accumulateur) eut à lutter contre la technologie dominante du moment (donc en général contre les solutions électro-chimiques allant des batteries plomb-acide au dernier cri en redox-flow de vanadium), ce qui a toujours limité son champ d'applications (premières locomotives dans les mines en 1860, les tramways de MEKARSKY à Paris, Nantes, Berne etc à partir de 1876, pour aboutir au stockage en caverne de Huntorf en 1977) et n'a jamais permis une continuité dans le développement technologique.

Ce n'est que récemment que les exigences de stockage énergétique ont surgi pour connecter les énergies renouvelables au réseau, pour écrêter les pointes de consommation ou pour éviter les délestages. Or il apparaît clairement que l'air comprimé est une des méthodes les plus économiques pour le stockage (voir ANNEXE IV), mais aussi que le principe du convertisseur sur la base du turbinage avec injection de chaleur générée par des brûleurs à combustibles fossiles (CAES) ne satisfait ni du point de vue écologique, ni du point de vue du rendement: le but de ce rapport est donc de démontrer qu'il peut exister une autre forme de conversion utilisant un principe volumétrique, car il est possible d'intégrer un système d'échangeur thermique dans les chambres de travail afin de s'approcher du fonctionnement isotherme qui est le garant de l'efficacité énergétique. Cette intégration est particulièrement simplifiée si le principe volumétrique est réalisé en utilisant des pistons liquides, ce qui est une des facettes du principe de la BOP-B. Un effort de développement fort et rapide est toutefois nécessaire pour faire face à la nouvelle vague d'une technologie qui se veut dominante basée sur le cycle de l'hydrogène par électrolyse et pile à combustible; certains semblent considérer cette technologie comme solution définitive pour le stockage, mais il apparaît que cette fois-ci l'air comprimé présente des atouts déterminants avec des rendements de cycle dépassant 70 % qui devraient être atteignables avec des efforts de R&D relativement modestes, à mettre en regard avec les 40% que l'hydrogène peine à dépasser avec un effort de développement difficile à saisir en termes de temps et d'argent. Finalement soulignons que le fonctionnement de la BOP est pratiquement indépendant du site -- pourvu qu'il y ait de l'air -- alors que le cycle concurrent est tributaire d'une eau distillée de bonne qualité, denrée rare sur maintes îles, et ne parlons pas des zones désertiques

1. Ausgangslage, Vorgehen

1.1 Bedeutung

Druckluftspeicher kennen praktisch keine Beschränkung in der Zyklenzahl und der Gesteigungspreis des Speichervolumens (sei es in Kavernen bis zu 150 bar mit ca. 50 EUR/kWh oder in Industriegasflaschen bei über 200 bar mit ca 70 EUR/kWh) verspricht gemäss ausgedehnten Nachforschungen nicht nur die mit Abstand tiefsten Kosten, sondern erscheint auch in zwei von den drei Hauptanwendungen gemäss aussagekräftigen Publikationen als absolut Marktkomform. Dies sowohl für den **AUSGLEICH DER STOCHASTIK BEI NETZEINSPESUNGEN**, insbesondere bei Windparks (bis zu 200 MW Leistung und 1000 MWh Energieinhalt) als auch für die **NETZUNTERSTÜTZUNG** (bis zu 100 MW Leistung und 20 MWh Energieinhalt, wobei hier am unteren Ende der Skala entsprechende Anlagen bis zu 0,4 MW ziemlich schnell eine treibende Rolle in der dezentralen Vernetzung spielen könnten, da hier insbesondere im sogenannten „Transformatorteil“ als hydrostatische Einheit handelsübliche Elemente mit nur kleinen Änderungen eingesetzt werden könnten). Diese Akzeptanz bezüglich konkreten Aufgaben und Projekte -- z.B. im Windparkbereich -- ist sehr wichtig, denn es nützt ja nichts, sehr preiswert zu sein aber trotzdem keinen genügenden Markt zu finden, zumal insbesondere hier gilt: Anwendung und Speicherung bedingen sich gegenseitig. Die dritte Hauptanwendung der Druckluftspeicherung als Ersatz von Bleibatterien in kleineren **INSEL-ANLAGEN** (1 bis 10 KW Leistung und 10 bis 100 kWh Energieinhalt) kann erst bei grösseren Stückzahlen konkurrenzfähig sein, denn der Zusammenbau von Standard-Industrieelementen erlaubt vorerst keine Preisoptimierung zum Eindringen in einen Verdrängungsmarkt; allerdings können Anlagen mit sehr grosser Speicherung im Verhältnis zum Transformator-Leistungsteil (z.B. Wochenspeicher oder Langzeitspeicher für wissenschaftliche Messstationen) auf Anhieb günstiger als Bleibatterien sein, insbesondere wenn die Lebensdauer, der Transport und die Umweltverträglichkeit/Rezyklierbarkeit mitberücksichtigt werden. Solche Anlagen wären denn auch eine gute Testgrundlage für die neue Technik.

Schliesslich soll hier auch die Möglichkeit von **MOBILEN ANWENDUNGEN** erwähnt werden, wobei die Druckluftspeicherung Nischenmärkte mit Vollkunststoff-Kohlefasertanks CNG 4 abdecken könnte, die neben der Gewichtersparnis sekundenschnelles Aufladen und ausserordentliche Alterungs- und Zyklusbeständigkeit bieten würden: so sind mit einem Speichervolumen von 1 m³ bei 250 bar 28 kWh in weniger als 30 s einspeisbar, wofür ein Leergewicht von 300 kg Kohlefasertank in Kauf zu nehmen ist; dazu kommt ein Kompaktwandler mit etwa 50 kg mit einem Volumen von 200 Liter, der z.B. direkt an das 4-Gang-Getriebe anzufanschen wäre. Da hier der Wandlerwirkungsgrad recht günstige Werte erreicht, würde dies einem Aktionsradius von 150-200 km mit ECE-Zyklus entsprechen, natürlich mit hochwirksamer regenerativer Bremskapazität.

1.2 Projektpartner

Unter der Federführung der Cyphelly & Co, Les Brenets wurden die allgemeine Speicherthematik und die spezifischen Aspekte bezüglich des Einsatzes der quasi-isothermen **B**atterie mit **O**elhydraulik und **P**neumatik (BOP) in Zusammenarbeit mit der EPFL (Prof. Rufer, LEI) und der Fa. Brückmannelektronik / Davos erarbeitet. Die spezielle BOP-Thematik im Zusammenhang mit der Thermodynamik und der

spezifischen Topologie und Kinematik hat die Firma Philoceram / Menhardt KG /Wien auf Grund von früheren Arbeiten für EU-Projekte überarbeitet, erweitert und auf den neuesten Stand gebracht.

1.3 Projektziele

Es sind die wesentlichen Fragen über die Einsatzmöglichkeiten von Druckluftspeicherungen, die Gliederung der Märkte und die technischen Vor- und Nachteile insbesondere der Druckluftspeichertechnologie auf der Basis des BOP-Konzepts darzustellen: somit wurde ein Ziel verfolgt, das von verschiedenen Speicheraspekten (z.B. vom INVESTIRE¹-Netzwerk über Speicherung für Intermittierende Energiequellen) bis hin zu Anwendern (Windparks und Netzbetreiber) ein einigermaßen kohärentes Bild über die Speichernotwendigkeit und das industrielle sowie wissenschaftliche Umfeld zu geben hat.

1.4 Vorgehen

Grundinformationen wurden in einer ersten Runde durch Befragungen wichtiger Akteure in den artverwandten Technologien und Entwickler in diesen Gebieten (Prof. Backé am IFAS in Aachen, Dr. Täubner bei Rosseta bei Dessau, Prof. Barth an der TU Clausthal, P. Achten bei INNAS in Breda usw) gesammelt. Gleichermassen wurden diese Personen mit den Erfahrungen aus dem Investire-Programm und mit Daten aus einer Informationsreise zu den industriellen Akteuren in den USA konfrontiert. Daraus wurden vertiefte Grundlagen entwickelt, welche alle Aspekte in losem Zusammenhang anzusprechen versuchte und in eine Aufgabenverteilung mit „road-map“ mündete. Die grosse Redaktionsarbeit wurde dann von jedem Partner einzeln vorgenommen und bei der EPFL integriert.

2. Technik (Funktionsprinzip des BOP-B-Prinzips)

Um die oben erwähnten vorzüglichen Eigenschaften der Druckluftspeicher zu nutzen ist ein Wandler (Leistungsteil) vonnöten, der die Luft mit hohem Wirkungsgrad verdichtet oder entspannt und diese somit in eine „operative Energie“ (Strom oder Mechanik) überführt. Gute Wirkungsgrade können aber nur bei annähernd isothermer Prozessführung entstehen, d.h. die Temperatur der Luft sollte trotz der thermodynamischen Koppelung beim Pendeln zwischen atmosphärischem Druck und Speicherdruck keinen grossen Schwankungen unterliegen (eine Temperaturschwankung von 30°C führt zu einem Wirkungsgradverlust von ca. 5 %). Dies ist bei heutigem Kenntnisstand nur mit Verdrängermaschinen (Kolbenmaschinen) realisierbar, denn hier lassen sich Wärmetauscher in den Arbeitsräumen anordnen, wobei gute mechanische Wirkungsgrade und hohe Standzeiten nur mit Flüssigkolben erreichbar sind, da hierbei die Dichtungsreibung entfällt.

Das Prinzip des Wandlers ist in Fig. 1 zwecks überschaubarer Darstellung eines Arbeitstaktlaufes in sehr vereinfachter Form abgebildet: in der motorischen Betriebsart (Entspannung = Entladung) wird die Luft unter Speicherdruck durch das offene Ventil D in den Arbeitsraum 1R des rechten Flüssigkolbenzylinders 2R einge-

¹ INVESTIRE ist ein Europäisches Programm, welches sich mit allen Formen der Energiespeicherung beschäftigt, 35 Partnern umfasst und von 2001 bis 2004 dauert

lassen, und zwar prozessgesteuert so dosiert, dass die eingelassene Menge am Ende des Entspannungs Vorganges auf atmosphärischen Druck fällt. Der Druck auf den rechten Flüssigkolben pflanzt sich über das Belüftungsserpentin 3R bis zur hydrostatischen Einheit 4 fort, die hier als Motor wirkt, da das 4-Wege-Ventil 5 in der Schaltstellung b verweilt. Somit wird über den drucklosen Rücklauf die linke Flüssigkeitssäule hochgeschoben und die Luft aus dem linken Arbeitsraum 1L durch das offene Ventil B zum Auspuff 6 geleitet. Es soll hier hervorgehoben werden, dass die sich im rechten Zylinder 1R entspannende Luft dies inmitten von temperaturstabilisierenden Tauscherplatten macht, die durch die sich zurückziehende Flüssigkeit soeben auf Belüftungstemperatur gebracht worden waren. So wird die Abkühlung der Luft dank der Wärmeleitfähigkeit weitgehendst verhindert. (Sinngemäss begrenzt man auch die Erwärmung, die ein als Kompressor arbeitendes Interface hervorrufen würde, da die äussere Belüftung durch den Ventilator Z immer die Umgebungstemperatur im Serpentin herbeizuführen versucht).

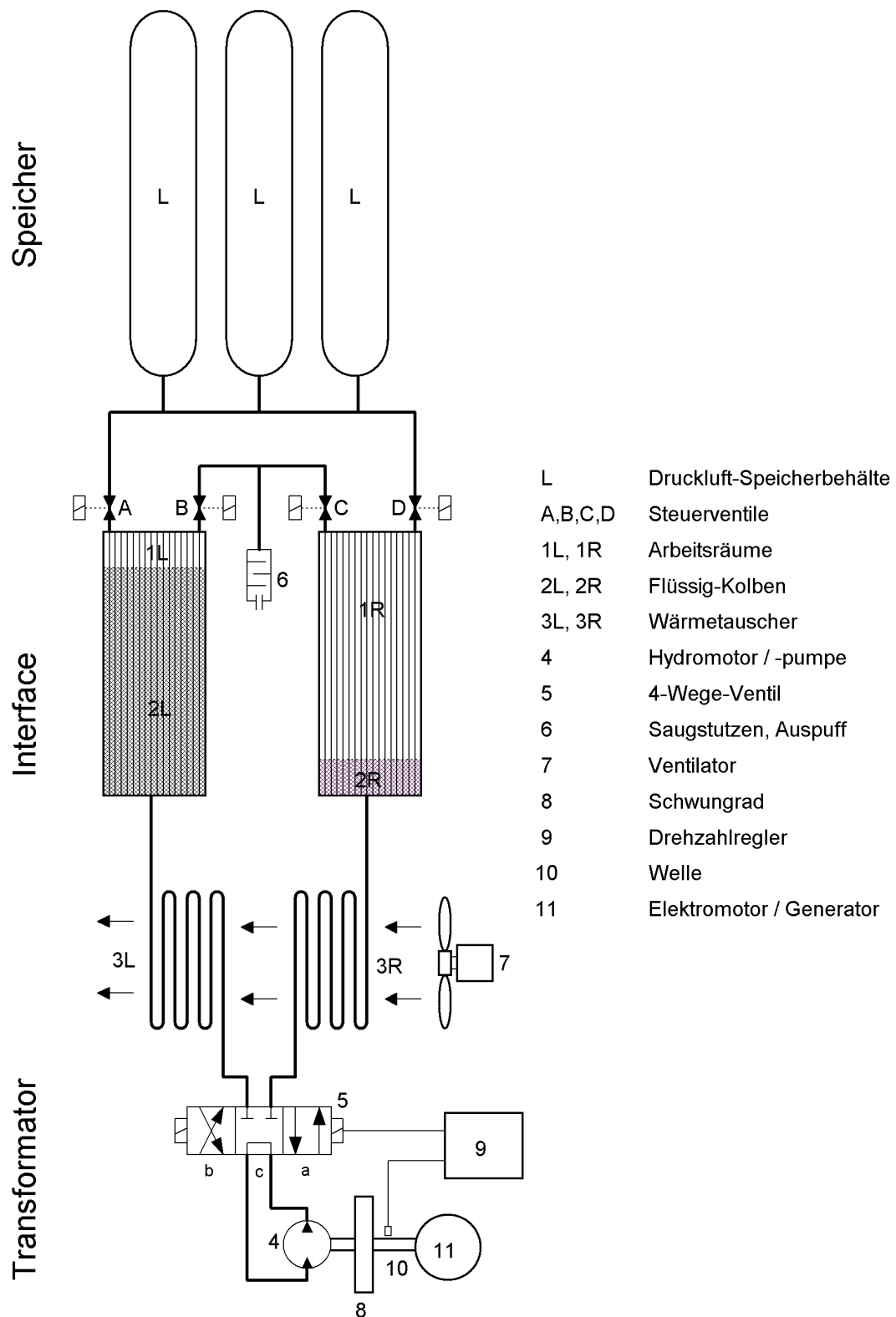
Sind die Flüssigkeitsspiegel an ihren jeweiligen Totpunkten angelangt, bewirkt das Ventilsystem eine Umkehrung der Kolbenbewegung ohne dass die Drehrichtung der hydrostatischen Einheit zu ändern wäre, da das 4-Wege-Ventil 5 nun auf das Schaltbild a umkippt und die äusserst trägheitsarmen Flüssigkeitssäulen ohne Schlag ihre Bewegungsrichtung anpassen. Dies erlaubt, ein Schwungrad 8 dauernd mitdrehen zu lassen um die Drehmomentsschwankungen der Kompressions- bzw. Entspannungsverläufe zu glätten, oder gar bei entsprechender Schwungradträgheit eine Leistungsregelung vorzunehmen: in diesem Fall wird das 4-Wege-Ventil 5 über die Sensorregelung 9 gesteuert und kann durch Verharren in der Umlaufstellung c der Hubbewegungen eine Pulsdauermodulierung überlagern, die einer Leistungsanpassung je nach operativer Energieform an der Welle 10 oder am Motor/Generator 11 gleichkommt. Ebenso können die Ventile eine Umkehrung des Leistungsflusses von Entspannung auf Verdichten einleiten, d.h. von „Entladen“ auf „Laden“ innerhalb der Schaltzeit der Ventile, also 20 – 30 ms: dies sind vernachlässigbare Werte gegenüber den Taktzeiten des Interface (ein Hub in 2-3 s, mit Pulsdauermodulierung ca. 5s bis einige min).

Die komplette Wandlungskette zwischen Luft und Strom weist demnach 3 Stufen auf: Luft-Öl (genannt Interface, a), Öl-Welle (hydrostatische Einheit, b) und Welle-Strom (Motgen, c), gepaart je nach Ausgestaltung mit kleinen Verlustquellen wie der Ventilator und das Schwungrad. Im kW-Bereich sind Wirkungsgrade für a 90 %, für b 95 % und für c 90 % mit relativ überschaubarem Entwicklungsaufwand erreichbar, was uns einen Zykluswirkungsgrad um die 60 % erwarten lässt. Im MW-Bereich sind – allerdings mit erheblichem F&E-Aufwand – für a 92 %, für b 96 % und für c 95 % vertretbare Einschätzungen, was einen Zykluswirkungsgrad von knapp über 70 % sichern würde.

Diese Wirkungsgrade hängen ausserdem sehr stark von der gewünschten Regelbarkeit und vom Bauvolumen des Interface ab; so würde z. B. Ein Fahrzeug mit 4-Gang-Schaltung als Spitzenwerte Einweg-Wirkungsgrade von knapp unter 90 % aufweisen, da der Regelbereich klein ist und eine Wandlerstufe (der Motgen) wegfällt.

Für weitergehende Informationen und auch für die Abgrenzung zum BOP-A-Typ sei auf den Anhang II verwiesen.

Prinzipschema BOP-B



Figur 1

3. Vorteile, Anpassungen, Entwicklungen

Obschon die stark vereinfachte funktionale Darstellung der Fig. 1 wesentliche Aspekte der Klarheit halber unterschlägt (die ununterbrochene Drehmomentsabgabe ist nur mit einem Zweistufensystem realisierbar, die Tauscherflüssigkeit ist nicht direkt das Hydrauliköl usw), können daraus sowohl die Vorteile bezüglich der Anwendungen als auch die Entwicklungsaufgaben abgeleitet werden:

Die wichtigsten VORTEILE des BOP-Druckluftspeicher-Systems sind dadurch gekennzeichnet, dass:

- in nur zwei Stufen höchste Drücke erreicht werden, was hohe Wirkungsgrade sichert (in den üblichen Kompressoren ist die Stufenzahl durch die zulässige Erwärmung pro Stufe (ca. 150°C) vorgegeben, was z.B. für 250 bar 4-5 Stufen mit den entsprechenden Verlusten bedeutet: ein hervorragender Wirkungsgrad von 90% pro Stufe bedeutet demnach weniger als 60% für eine 5-stufige Maschine)
- die Leistungsanpassung schon organisch integriert ist, und somit in vielen Versionen der Aufgabe angepasst werden kann.
- der Leistungsteil vom Speicherteil konstruktionsmässig getrennt ist und dementsprechend beliebig dimensioniert werden kann: z.B. ist eine Mischung von grosser Leistung mit einer kleinen Speicherkapazität möglich..
- der jeweilige Energieinhalt der Speicherung mittels einfacher Druckmessung zu ermitteln ist.
- die Komponenten des Systems mehrheitlich aus erprobten Elementen bestehen, die weder im Betrieb noch kostenmässig Überraschungen bescheren sollten: so werden Hochdruck-Stahlflaschen schon mehr als 100 Jahre hergestellt und verwendet. Vor allem die hydrostatische Einheit als wirkungsgradbestimmendes Herzstück des Transformators ist konstruktiv ausgereift, in seinem Innenleben analysiert und wissenschaftlich untermauert (die Wirkungsgrade erreichen Werte von 95 % in einem breiten Band von Betriebsparameter, die durch spezifische Ausgestaltungen noch ausgeweitet werden können).

Lediglich das Interface bedeutet technisches Neuland und bildet somit den wichtigsten, anzugehenden ENTWICKLUNGSSCHWERPUNKT:

Die Arbeiten können in folgende Teilaufgaben gegliedert werden:

- Iterative Tauschergestaltung mit bestmöglichem Verhalten von Fluid und Gas.
- Optimierung der physikalisch-chemischen Parameter (Gasdiffusion in Flüssigkeit, Benetzung, Verschmutzung, Kondensatbildung usw) und Alterungseffekte in Abhängigkeit der Materialwahl.
- Entwicklung der Luft-Schaltventile und des passenden elektronischen Managements unter Berücksichtigung der dynamischen Rückwirkungen auf den Transformator.
- Prozessor und Algorithmus für die Einlass-Dosierung im motorischen Betrieb.
- Auswahl der günstigsten Auslegung, Verschaltung und Anordnung aller Interface-Elemente.
- Erstellung der passenden Rechenmodelle und Simulation des Betriebsverhaltens.

Die Komplexität des ganzen Wandlersystems bleibt sicherlich weit unter derjenigen eines modernen Dieselmotors. Ausserdem ist bei dem Druckluftwandler die Verknüpfung der einzelnen Teile viel loser als bei einer Verbrennungsmaschine, was eine weit unabhängigere Entwicklung der einzelnen Komponenten erlaubt und deren Integration am Ende sogar mit mehreren Varianten ermöglicht. Trotzdem sollen sinngemäss alle Elemente der Kette untersucht und optimiert werden: der Motor/Generator (Motgen) samt EC-Teil, die hydrostatische Einheit (in die möglicherweise die Ventilfunktion integriert und die Leerlaufverluste durch ein Kupplungseffekt aufgehoben werden können, kombiniert mit einer Wälzlagerentlastung zwecks Lebensdauererhöhung), die Belüftung mit minimierten Verlusten und thermostatischer Steuerung und nicht zuletzt das Schwungrad, dessen Heliumumkapselung und äussere Formgebung schon in der bereits durchgeführten Vorentwicklung substantielle Verlustminderungen brachten.

4. Markt und Akteure

Von den einleitend genannten vier Anwendungen (Netzeinspeisung erneuerbarer Energien, Netzunterstützung, Inselanlagen und mobile Anwendungen) haben nur deren zwei etablierte Märkte mit definierten Technologien und Akteuren:

Die Inselanlagen werden fast ausschliesslich mit Bleibatterien ausgestattet, die mit bekannten Nachteilen wie Alterung (schlechte Zyklenfestigkeit), unzuverlässige Anzeige des Energieinhaltes und unbefriedigende Umweltverträglichkeit aufwarten (die Herstellung schluckt ungefähr soviel Energie wie die Batterie in der Summe ihrer Lebenszyklen je speichern wird), was diese Technologie insbesondere für warme Länder wenig qualifiziert. Diese Mängel fallen in den mobilen Anwendungen noch mehr auf, so dass der Elektromobil-Markt zusammengebrochen ist, bevor er richtig wachsen konnte: lediglich die neulich propagierten Hybride versprechen eine Belebung über die traditionellen Traktionsanwendungen hinaus.

Die Hersteller sind hier die bekannten Autobatterie-Firmen, die mehr oder weniger spezifische Ausführungen für die stationäre Speichertechnik zu sehr günstigen Preisen anbieten (bis hin zu Luxusausführungen wie Panzerplattenbatterien), dementsprechend ist der Anteil an der globalen Produktion schwer zu definieren, übersteigt aber nicht 10 % (300 Mio. EURO) der gesamten Bleibatterieproduktion.

Bei den Grossanlagen hingegen ist die Übersicht einfach: von der Grössenordnung her gibt es nur zwei ältere Anlagen auf Druckluftbasis mit Brennerunterstützung (CAES) auf der Welt, die die geplanten Off-Shore-Windparks verdauen könnten (Huntorf mit 290 MW und McIntosh mit 110 MW); ansonsten sind für die Netzunterstützung auf anderen Speichertechnologien basierend weltweit weniger als 20 Anlagen mit mehr als 1 MW bekannt, wobei die letzte in Golden Valley/Alaska (2003) mit 40 MW weitab die stärkste ist. Auch bei diesen Anlagen wurden am Anfang Bleibatterien verwendet, aber seit 1997 wurden nur noch NaS-Systeme eingesetzt, vorwiegend in Japan, mit Ausnahme einer betriebseigenen Vanadium-Redox 1,5 MW-Anlage bei Sumitomo SEI und das zitierte Golden Valley mit NiCd-Zellen.

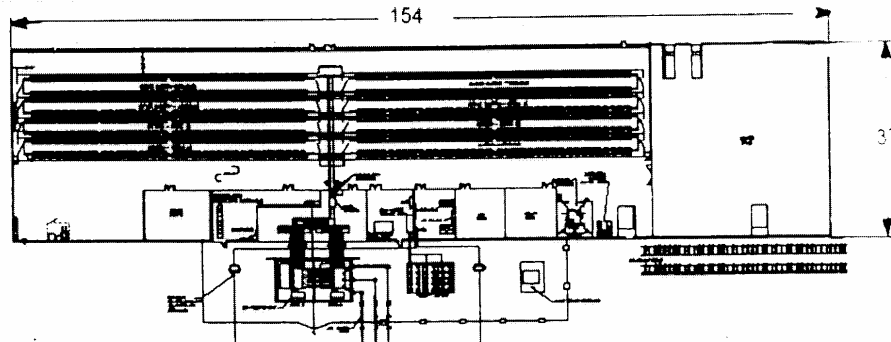
Längerfristige Betriebserfahrungen liegen bisher nur von Bleibatterie-Anlagen vor (die teilweise in regelrechte Materialschlachten ausarteten). Deshalb kann vor allem in Bezug auf die Betriebskosten noch kein vorherrschender Konkurrent identifiziert werden, es sei denn man komme zum Schluss, dass hier eigentlich der *Silizium-*

Wechselrichter dem synchronen Motgen gegenübersteht, denn alle anderen Lösungen für die Netzunterstützung basieren auf elektrochemischen Gleichstrom-Speicherungen, im Gegensatz zur drehenden Welle der BOP-Druckluftspeicherungen. Grob geschätzt besteht aber ein Preisverhältnis von 1:4 zugunsten der drehenden Maschine, was zusammen mit den niedrigen Speichervolumenkosten erstmals die Möglichkeit bieten würde, *über die BOP-B-Druckluftspeicherung diesen Markt regelrecht zu entfesseln*, da die vorhandene Technik offensichtlich eine Grössenordnung danebenliegt in Bezug auf die Wünsche der Windmühlen-Betreiber. Dieser Tatbestand wurde auf Bild 2 festgehalten, wo die publizierte Ausführung von Golden Valley der einfachen hydraulischen Speicherung mit Oel-Akkumulatoren (BOP-A) und dem quasi-isothermen Kompressor/Entspanner-System (BOP-B) gegenübergestellt wird.

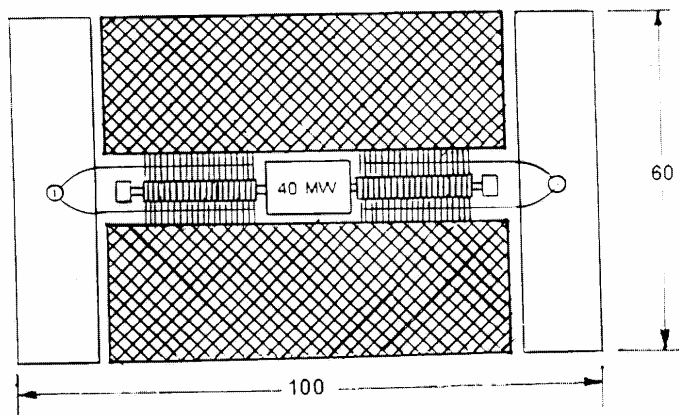
Abschliessend soll die Vanadium-Redox-Flow-Technik erwähnt werden, die – mindestens auf dem Papier – im Gegensatz zu den anderen elektrochemischen Lösungen eine Vielzahl von positiven Eigenschaften mit der BOP-B teilt (separater Leistungs- und Speicherteil, hohe Zyklrierbarkeit, einfachere Energieinhalt-Erfassung usw) und deswegen als potentieller Konkurrent einzustufen wäre. Allerdings wird diese Technik durch widersprüchliche Angaben gebremst, was das Projektteam veranlasste, eine genauere Nachforschung (s. ANHANG I) vorzunehmen. Der Vergleich der wichtigsten Speichertechnologien wird in Tabelle 1 zusammengefasst.

STORAGE SYSTEM COMPARISON based on the Golden Valley project 40 MW / 13,3 MWh (last update 29-01-2004)

NiCd Golden Valley: **30 MEUR**, including 13'760 units of SAFT SBH 920 Ah, **5698 m²**



BOP A with steel bottles: **17,84 MEUR**, outline shown for a 2m height: **6000 m²**
 5320 m³ of bottle capacity @ 2 EUR/ℓ for 250 bar max = 10,64 MEUR
 40 MW sync. motgen with ancillaries = 2 MEUR
 80 fixed displacement 0,8 ℓ/rev clutchable reversible hydrostatics = 1,2 MEUR
 2500 m³ of oil = 2 MEUR
 ancillaries, controls, piping, flexible reservoirs = 2 MEUR



BOP B with steel bottles: **9,91 MEUR**, outline shown for a 2m height: **2496 m²**
 475 m³ of bottle capacity @ 2 EUR/ℓ at 250 bar max = 0,95 MEUR
 40 MW sync. motgen with ancillaries = 2 MEUR
 56 fixed displacement 0,8 ℓ/rev clutchable reversible hydrostatics = 0,825 MEUR
 56 reciprocating multipliers/separators = 0,385 MEUR
 56 interfaces with controls and ancillaries = 2,75 MEUR
 piping, valving etc = 3 MEUR

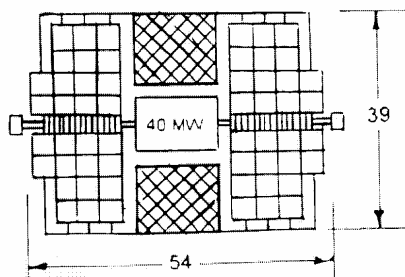


Bild 2

Tabelle 1 : S P E I C H E R – S Y S T E M V E R G L E I C H

PARAMETER	BOP A	BOP B	PANZERPLATTE	VANADIUM FLOW	
Volumenspezifische Energie (mit Hilfstrieben & Zubehör)	1,6 ¹ Wh/ℓ	24 ¹ Wh/ℓ	13 ² Wh/ℓ	5,6 ³ -20 ⁹ Wh/ℓ	
Gewichtsspezifische Energie (mit Hilfstrieben & Zubehör)	1,75 ¹ Wh/kg* 3,3 ¹ Wh/kg**	23,2 ¹ Wh/kg* 50,0 ¹ Wh/kg**	6,5 ² Wh/kg	5,45 ³ - 9 ⁹ Wh/kg	
Zykluswir - kunsgrad	Draht-zu-Draht Welle-zu-Welle	0,68 ¹ 0,84 ¹ mit Wandlung	0,6 ¹ 0,68 ¹ mit Wandlung	0,8neu – 0,6alt 0,65neu – 0,5alt ohne Wandlung	0,63 ³ - 0,7 ⁵ mit Wandlung
Speicherkosten	920 ⁶ €/kWh	50 ¹⁰ -71 ⁶ €/kWh	200 ⁷ €/kWh	200 -360 ⁷ €/kWh	
Wandlertkosten (> 20 MW aufs Netz)	130 ¹⁰ €/kW Motgen+Hydr.	284 ¹⁰ €/kW Motgen+Interf.	€291 ⁶ /kW Wechselrichter	1000 ⁵ €/kW Stacks+Wechselr.	
Betriebsflüssigkeit Brauchte Wanne	Öl 50%Vol. JA	Öl einige ℓ NEIN	Säure 54%Vol. JA	Elektrolyt90%Vol. JA	
Zyklrierbarkeit	Über 15'000* Über 100'000**	Über 15'000* Über 100'000**	3000 ² ergibt obi- ge Wh/ ℓ - Werte	>>2000 ⁷	
Voll entladen & vergessen	JA	JA	NEIN	JA	
Umladen auf kleinere Speicher	NEIN	JA	NEIN	JA	
Genauere Ladezustandserfassung	JA	JA	NEIN	BEDINGT	
Kapazitätserweiterung	jegliches Alter gleiche Höhe	jegliches Alter jegliche Grösse	keine Mischung von Grösse & Alter	jegliches Alter	
Temperaturbereich	- 20°C → 50°C ¹	- 10°C → 50°C ¹	- 10°C → 40°C ⁹	- 10°C → 40°C ⁹	

In obiger Tabelle werden beide BOP-Systeme mit Blei-Panzerplattenbatterien und Vanadium Redox Flow (VRB) verglichen, da alle anderen untersuchten Speicherarten in mehreren Vergleichspunkten entweder unspezifiziert oder weit weg vom Mittelfeld liegen; insbesondere der Elektrolyse-Wasserstoff-Brennstoffzelle-Zyklus wird in keiner neueren Studie als nutzbare Speicheralternative aufgeführt.

Die Vergleichswerte sind ausserdem mit Vorsicht zu geniessen, da viele Autoren Herstell- und Verkaufspreise nicht unterscheiden und untereinander oft Daten kritiklos übernehmen; deswegen wird in dieser Tabelle die Quelle der Daten angegeben, es bedeuten:

- 1) Physikalische Grundwerte, durch eigene Berechnungen untermauert (Dr. Menhardt)
- 2) Hoppecke-Katalog für 5 OPzS Solar 350 bei 3000 Zyklen unter 15 und 40°C ermittelt (DOD 28%).
- 3) A. Buonarota: Traditional & Advanced Energy Storage, Cired Barcelona, 12-15 May 2003.
- 4) M. Skyllas-Kazacos Recent Prog.w. UNSW VRB
<http://www.ceic.unsw.edu.au/centers/vrb/vanart2a.htm>.
- 5) J.H.R.Enslin In store for the Future? RE World Jan.-Feb.2004, Vol 7, #1.
- 6) Kommerzielles Flaschenangebot, Vítkovice Lahvárna, 14-5-2002 (betrifft *)
- 7) M. Viloz Bericht an BfE bezüglich INVESTIRE-Programm, Nov. 2003.
- 8) SAND 99-2232 : Lessons Learned from the Puerto Rico BESS.
- 9) C.J. Rydh Environmental assesement of VRB and lead-acid batteries, J Power Source 80 (1999)21 29.
- 10) ABB und Alstom Baden (betrifft sync. Motgen und Kavernenbetrieb).

*) Industriegas – Standardflaschen BS EN 1964-1 :2000 oder CNG 1-Zylinder nach ISO 11 439.

**) CNG 4 Vollkohlefasergewickelte Zylinder ISO 11 439.

5. Quellenverzeichnis, Referenzen, Bibliographie

REFERENZEN

- Building the Energy Internet*“ The Economist , 11-03-2004
 Hirstein „Die Wasserstoffgesellschaft“, NZZaS, 04-04-2004
 J. Enslin „In Store for the Future“, Renewable Energy World 2004, Vol.7, #1
 Tim de Vries, Niklaus Umbrich & al. „Stromreserve im Eis“, VSE Bulletin 3/2004
 SAND99-2232, „Lessons Learned from the Puerto Rico BESS“
 S.Rothhäuser „Untersuchung hydropneumatischer Speicher“, Diss.RWTH Aachen, 1993
 Ph.Brückmann,M.Hintermann,„Stromversorgung von Alpen mit Kleinspannungsanlagen“, Fachstelle f. Wasser & Energiewirtschaft Gaubünden 1992
 ESA, Electricity Storage Association, <http://electricitystorage.org>
 „A. Buonarota & al. „Traditional and Advanced Energy Storage Systems for New Strategies for the Development and the Exploitation of MV and LV Networks“ CIRED Barcelona, 12-15 Mai 2003
 R.L.Largent, M. Skyllas-Kasakos, „Improved PV System Performance using Vanadium Batteries“, IEEE, 0-7803-1220-1/93, 1993
 M. Guillon, „Commande et asservissement hydraulique et électrohydraulique“, TECDOC Lavoisier 1992, ISBN 2-85206-756-0
 P. Achten & al. „Design and Testing of an Axial Piston Pump Based on the Floating Cup Principle“, The 8th Scandinavian Int. Conf. On Fluid Power, 2003
 H. De Witt, „Energiespeicherung durch Druckluft am Grunde tiefer Seen zur Deckung des elektrischen Spitzenbedarfs“ VSE Bulletin 85(1994)18
 K.H.Söbrink & al. „The Challenge of Integrating large-scale Offshore Wind-farms into the Power System“ Paper 14-204, CIGRÉ-2002, Paris, France
 „GM’s best-kept battery and EV secrets“ *Batteries International*, April 1993

PUBLIKATIONEN DER AUTOREN ZUM THEMA

- S. Lemofouet, A. Rufer, I.Cyphelly, P. Barrade, F. Grasser:
Principle of a hybrid Compressed Air and Supercapacitors Energy Storage system with Maximum Efficiency Point Tracking , STORE: Storage for Renewable Energies, 20-21 October, Aix-en-Provence. EESAT: Electric Energy Storage Applications & Technologies, 27 October 2003, San Francisco, USA.
 S. Lemofouet, I. Cyphelly, A. Rufer:
A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking, ANAE: Associazione Nazionale Azionamenti Elettrici, 150 Seminario Interattivo, Azionamenti elettrici: Evoluzione Tecnologica e Problematiche Emergenti, 22-24 March, Bressanone, Italy
 I. Cyphelly:
 „Schnelle Umfüllung von Gasen unter Hochdruck“, Forschungsbericht BFE, Bern 1998
 A. Reller, I. Cyphelly:
 „Speicherung gasförmiger Energieträger – eine Bestandesaufnahme“, VDI-Bericht 1734, 2002 (Tagung Veitshöchheim, Nov. 2002)
 I.Cyphelly, P. Jourde:
 „DC Rural Off Grid Motive Power for Developing Countries“, Paper OB8, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Oct. 2001, www.alternativascmr.com
 P. Jourde, I. Cyphelly:
 „Batteries for Developing Countries“ STORE-Conference, Aix-en-Provence Oct. 2003
 Ph. Brückmann, M. Hintermann:
 „ Stromversorgung von Alpen mit Kleinspannungsanlagen“, Op. Cit.
 W. Menhardt, „Druckluft als Energieträger für Antriebe im Vergleich zu konventionellen und neuen Energieträgern“ BFE Bern 1999

WEITERE HINTERGRUND-INFORMATION

- F. Dohmen, F. Hornig, „Der Windmühlenwahn – die grosse Luftnummer“ Der Spiegel, Nr. 14, 29-03-04
 Ulf Bossel, „Hydrogen - why its future in a sustainable energy economy will be bleak, not bright“, Renewable Energy World April 2004, Vol. 7, # 2.
 P. Jourde, „Battery Energy Pay-Back Time“ CEA Cadarache, patrick.jourde@cea.fr
 M. Dehli, „Untersuchungen zur energiesparenden Druckluftherzeugung“ VDI-Bericht 1681, 2002 U. Schneider, „Drucklufttechnik und –Speicherung“ Forschungsbericht BFE, Bern 1999

ANHANG I

Vergleich von Druckluftspeicher mit Redox Flow Batterien

Prof. Alfred Rufer

Die Redox-Flow Batterie ist ein neuer Energiespeicher und wurde an der Universität of New South Wales, Kensington, Australien mitten in den 80-er Jahren entwickelt. Redox Flow Batterien verwenden einen anderen Umwandlungs-Prozess als klassische Batterien, wo die chemische Umwandlung auf der Oberfläche der festen Elektroden stattfindet. Bei diesem neuen Typ von Batterien wird die Energie als chemische Umwandlung innerhalb von zwei flüssigen Elektrolyten gespeichert, welche mittels Pumpen dauernd durch den Batterie-Stapel umgewälzt werden. Die Energie-Umwandlung findet im Stapel statt, und die geladenen Elektrolyte werden in zwei anoden- und kathodenseitigen Reservoirs gespeichert.

Die physischen Abmessungen des Batterie-Stapels bestimmen die Leistung der Batterie, während das Elektrolyt-Volumen die effektive Energie-Speicherkapazität festlegt.

In der Vanadium Batterie werden identische Elektrolyt-Flüssigkeiten sowohl auf der Anoden- wie auf der Kathodenseite verwendet. Während des Ladens der Batterie wechselt an der positiven Seite die Valenz des Vanadiums von V(IV) zu V(V) und an der negativen Seite von V(III) zu V(II). Dieser Prozess läuft in der umgekehrten Richtung ab bei der Entladung. Wenn die Elektronen-Leitung im externen elektrischen Kreis ausserhalb der Batterie zirkuliert, findet in der Batterie eine Ionen-Leitung durch eine Trennmembrane zwischen positiver und negativer Elektrode statt. Die Zellenspannung einer Vanadium Redox Flow Reaktion ist wie bei anderen konventionellen Batterien ungefähr bei 1.4 Volt.

Die elektro-chemischen Reaktionen im Batterie-Stapel wurden durch die Erfinder dieses Systems als hocheffizient und langlebig deklariert. Für den heutigen Stand dieser Technologie können leider diese Aussagen wegen mangelnder Erfahrung und schlecht messbaren Grössen nicht bestätigt werden.

Verschiedene Grossversuche mit durch neu kreierte Gesellschaften hergestellten Hochleistungsbatterien hätten in den letzteren Jahren zum Durchbruch der Flow-Batterie- Technologie führen können. Leider konnten wegen ökonomischen und höchstwahrscheinlich auch technischen Schwierigkeiten diese Realisierungen nicht bis zum vorgesehenen Betrieb vorangebracht werden.

Die wichtigsten Hersteller von Flow-Batterien sind einerseits die „Innogy-Regenesys“ in England (Regenesys hat in den letzten Monaten grössere Schwierigkeiten erlebt und wurde schlussendlich aufgelöst), die Kanadische „Vantech“ sowie die japanische Gesellschaft „Sumitomo“. Alle Hersteller haben bis heute nur Einzelstücke oder Vorserien-Geräte gebaut.

Energiedichte und Leistungsdichte

Optimistische Angaben für die Leistungsdichte und Energiedichte stehen zur Verfügung seitens der Erfinder:

Die angegebenen Werte lauten:

Energiedichte per Gewichteinheit:
Energiedichte per Volumeneinheit:

80 Wh/kg
ca. 50Wh/dm³

Die Anlagenkosten werden von der selben Quelle wie folgt angegeben:

Kosten der gespeicherten Energie:	200-500 \$/kWh
Kosten der Leistung eines Speichers:	1000-3000 \$/kW

Bei einem Nachweis-Versuch bei CESI in Mailand konnten einige Zahlen ermittelt werden die den oben erwähnten Angaben z.T. massiv widersprechen:

Ermittelte Energiedichte per Gewichtseinheit (mit Tank):	5,45 Wh/kg
Ermittelte Energiedichte per Volumeneinheit (mit Tank):	5,6 Wh/dm ³
Ermittelte Leistungsdichte per Gewichtseinheit: (mit Tank):	10,9 W/kg
Ermittelte Leistungsdichte per Volumeneinheit (mit Tank):	11,2 W/dm ³

Bei dieser Anlage wurden 8m³ Vanadium Sulfat Lösung verwendet, eine zusätzliche Leck-Auffangwanne ist unter den beiden Tanks angebracht.

Kosten der gespeicherten Energie (nach SUMITOMO):	5'860 \$/kWh !!
Kosten der Leistung des Speichers (nach SUMITOMO):	11'700 \$/kW !!

Effizienz einer Vanadium Redox Batterie:

Bei der Anlage im CESI /Mailand wurden einige Versuche durchgeführt, um einen richtigen Wirkungsgrad ermitteln zu können. Dabei wurde als Hauptschwierigkeit die Ermittlung des Energiespeicher-Ladezustandes erwähnt, die zu ungenauen und schwankenden Zahlen für den Wirkungsgrad geführt haben.

Für den Energie-Wirkungsgrad werden Werte zwischen knapp 60% bis zu über 85% angegeben, wobei die Art, wie diese Werte ermittelt wurden, nicht nachvollziehbar ist.

Nennenden der Anlage nach

Nennleistung:	42kW
Autonomie:	2h
Nennspannung:	125 V
Nennstrom:	370 A
Volumen der Flüssigkeit	8000 Liter

Interface mit dem Netz

Die Druckluft-Speichertechnik kann in einer vereinfachten Ausführung mit einer direkten Kopplung des Generators ans Netz realisiert werden. Dies benötigt jedoch eine Möglichkeit für die Steuerbarkeit des Antrieb-Drehmomentes, sowohl für die Steuerung der ins Netz eingespeiste Leistung als auch für eine regelbare Ausgangsfrequenz im Inselbetrieb. Regelventile, steuerbare Hydromotoren oder stufenweise Steuerung von mehreren Hydromotoren können zu diesem Zweck eingesetzt werden.

Im Gegensatz zur Druckluft-Lösung braucht eine Redox-Flow-Batterie immer eine leistungs-elektronische Umformung, welche die Anlagenkosten stark erhöhen kann.

Dabei muss beachtet werden, dass ein leistungs-elektronisches Interface in Zusammenhang mit einem Konzept von dezentralen Energie-Erzeugung grosse Vorteile zeigen kann, vor allem durch die Schnelligkeit des Eingreifens, sowohl für Wirk- und auch für Blindleistung.

Alterungs-Effekte und Anzahl der möglichen Lade/Entlade Zyklen

Keine Angaben werden heute über Alterungseffekte gemacht, dieser Aspekt sollte für die Vanadium Batterie jedoch nicht als Hauptschwierigkeit gelten. Bedenken entstehen jedoch über grosse Zahlen von Lade-und Entladezyklen laut wie es bei einem Einsatz im Netz erwünscht (Dezentrale Energie-Erzeugung, oder Integration von erneuerbaren Energiequellen) wobei von 1500-2500 Zyklen gesprochen wird.

Entsorgung

Keine Angaben wurden über die Entsorgung von VRF-Batterien gemacht, es könnten aber problematische Situationen entstehen beim Rezyklieren von grossen Mengen von Vanadium- Sulfat Lösungen.

Schlussfolgerungen

Wegen der nicht genauen, oder zum Teil widersprechenden Angaben über die Eigenschaften von Redox- Flow Batterien kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Vergleich die Drucklufttechnik enorme Vorteile besitzt. Im wesentlichen liegen die Vorteile sowohl in der Umweltverträglichkeit der eingesetzten Materialien, als auch in der zu erwartenden Lebensdauer von solchen Anlagen. Somit können auch die auf dieser Basis zu erwartenden Betriebskosten einer Druckluft-Speicheranlage als viel tiefer geschätzt werden als diejenigen einer Redox-Flow Anlage.

Im Zusammenhang mit einer konkurrenzfähigen Energiedichte muss erwähnt werden, dass die bei einer Demonstrationsanlage ermittelten Werte im Bereich der mittels des BOP-A Konzeptes zu erreichende Zahlen liegen. Die viel höhere Werte, die mit dem BOP-B Konzept zu erreichen sind, werden somit zum Hauptargument, diese Technik möglichst schnell zur Reife zu entwickeln.

Lösungen für technische Probleme der Redox-Flow Batterien sollten innerhalb von weiteren Forschungen und Entwicklungen zu finden sein, sowohl für den stationären als für den mobilen Betrieb.

ANHANG II

DRUCKLUFTSPEICHERUNG: Begriffe und Klassifizierung der Varianten

Grundsätzlich sind zwei Arten von Energiespeicherungen in Druckluft möglich, die sich vordergründig durch die Lokalisierung der Thermodynamik unterscheiden:

Beim Typ A wird Luft durch die Verschiebung eines Flüssigkeitspiegels im ganzen Speicherraum komprimiert oder entspannt: die Energiewandlung (in der Flüssigkeit) ist also getrennt von der thermodynamischen Koppelung (die hier auf den Speicherraum begrenzt ist und infolge der langsamen Vorgänge und der grossen Tauschflächen der Flaschenwände oder Kavernen der Isothermie nahe kommt). Die Arbeitsweise dieser A-Systeme ist ohne Abstriche die eines Pumpspeicherkraftwerkes und erfordert also eine Flüssigkeitsreserve für ca. 50 % des Hochdruck-Speichervolumens in Form eines Behälters oder eines Flusslaufes. Hauptvorteil hierbei ist die direkte Verwendung von preisgünstigen, in Serie hergestellten und wirkungsgradmässig ausgereizten Wandlerelementen (Kreiselpumpen und Turbinen für jegliche Leistung und Druckpegel oder Verdrängermaschinen im Falle der BOP), die ohne komplexe Wärmetauscher auskommen; Nachteile ist die grosse Raumbeanspruchung (etwa zehn mal grösser als beim B-Typ gleichen Druckes) und der relativ seltene Fundort geeigneter Kavernen (der Wasseranschluss darf nicht durch eine allzugrosse Wassersäule belastet werden, also dürfen solche Kavernen nicht unter 500m liegen bei maximalen Betriebsdrücken von 50-150 bar); ausserdem brauchen solche Anlagen meistens einen kleinen Ladekompressor zwecks Leckausgleich und Vordruckeinstellung.

Dem Typ A können auch die Speicherungen in Grundwasser zugerechnet werden, mindestens was die Speichergrosse betrifft: in Bohrungen mit Überdruck (Bergdruck oder artesischen Brunnen) kann Wasser gedrückt werden, wobei diese Speicherungsart infolge der enormen Speichermasse (Grundwasser kann bis 10 mal elastischer sein als Trinkwasser infolge von Lufteinschlüssen) oft einem Konstantdruckspeicher gleichkommt, wobei hier weitere Parameter wie Porosität mitberücksichtigt werden müssen; um sich von der Begrenzung durch die Wassersäule zu befreien wird oft Luft eingepresst, die dann durch Verdrängung einen Hohlraum formt der aber weiterhin dem Wasserdruck ausgesetzt bleibt, also unter annähernd konstantem Druck arbeitet („Wasserkompensierte Felskavernen“): hier handelt man sich aber schon die mit dem Typ B verbundene Problematik ein, wo die Energiewandlung mit der thermodynamischen Koppelung zusammenfällt die den Druckveränderungen Temperaturschwankungen zuordnet und diese Folge von Kompressionen und Entspannungen ausserordentlich komplex gestaltet:

Beim Typ B müssen also sinngemäss Vorkehrungen in Form von Tauschern integriert werden, es sei denn man beabsichtige die Luft samt ihrer Kompressionswärme zu speichern; letzterem sind aber enge Grenzen gesetzt, denn schon eine Verdichtung auf 30 bar bedingt Temperaturen um die 500 °C und erreicht damit materialtechnologische Engpässe, ganz abgesehen vom Wärmeverlust bei längerer Speicherzeit (solche Systeme sind dementsprechend nur als Überbrückungsspeicher im Gespräch, sozusagen als Vergrösserung von Schwungradgeräten). Normale Speicherzyklen sind z.Zt. nur mit quasi-isothermen Wandler vorstellbar, allenfalls mit separater Speicherung der Kompressionswärme, die beim Entspannen wieder zugeführt wird (TES-Konzept). Ein absolut isothermer Vorgang ist nichts anderes als die 100%-ige Abgabe der Kompressionswärme an die Umwelt, die dann während der Entspannung wieder zugeführt wird (sozusagen eine Leihgabe der ganzen gespeicherten Energie in Form von Wärme: dies bedeutet dass

die gespeicherte Druckluft eigentlich energielos ist, in gewisser Ähnlichkeit zum Wasser in einem Staubecken, das erst durch ein Gefälle wirksam wird). Allerdings wäre ein absolut isothermer Vorgang unendlich langsam, nimmt man jedoch eine Temperaturschwankung von 40 °C in Kauf kann mit einem thermodynamischen Wirkungsgrad von über 90% gerechnet werden, was einen genügenden technischen Freiraum gewährt.

Die Offenkundigen Vorteile der B-Speicherung (insbesondere der geringe Platzbedarf des Speicherteils im Vergleich zu allen anderen Systemen, der ausserdem bei höheren Drücken wirtschaftlich mittels Flaschen- bzw. Röhrenbehälter ortsunabhängig gestaltbar ist, da beim standard-Flaschen-Nennndruck von 250 bar immerhin 35 kWh pro m³ Inhalt gespeichert und beliebig zyklert werden können) haben neulich zu bemerkenswerten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten geführt, die auch schon gewisse Fährten erkennen lassen: quasi-isotherme Wandler sind mindestens für Verdrängermaschinen nach dem BOP-Prinzip konzeptmässig sehr fortgeschritten und für Turbomaschinen wird eine überraschende Vielzahl von Lösungen diskutiert um die Problematik der CAES-Lösung zu umschiffen (CAES: Turbomaschinen-Druckluft-Speicherkraftwerke grosser Leistung mit zwischengekühlten Verdichterstufen und Brennkammererhitzung für den Turbinenbetrieb, wobei mindestens 50% der Generatorleistung vom Kraftstoff kommt): die Vorschläge reichen von separater Kompressionswärmespeicherung ab Zwischenkühler mittels hochisolierten Metall-oder Flüssigkeitspeicher (TES = Thermal Energy Storage) bis hin zu Vielstufen-Zwischentauscher für Verdichter und Turbinen, ohne die Sprühung von geeigneter Thermoflüssigkeit samt Scheidesystem zu vergessen.

Da die ganze Turbo-Zunft restlos mit diesen thermodynamischen Grundsatz-Aufgaben beschäftigt ist, konnten weitere Problemkreise nur in unzureichendem Masse aufgearbeitet werden, insbesondere die Regelbarkeit der Speicherung bzw. die Anpassbarkeit des Leistungsflusses an Angebot und Nachfrage: hier sind die Anforderungen an Speichersysteme ausserordentlich hoch, sollen doch im Netzverbund die Unstetigkeiten aus erneuerbaren Quellen derart ausgeglichen werden, dass auf teure und kapitalintensive Regelenergie weitgehendst verzichtet werden kann (heute wird ein stochastischer Anteil von 20 % schon als kritisch bezeichnet) und ein „virtuelles Kraftwerk“ entsteht mittels Mischung von Speicherungen und Netzmanagement samt Ergiebigkeits-Vorhersagen durch Meteo-Modellierung. (s. EU-Projekt „DISPOWER“—DISTRIBUTED POWER with high penetration of Renewable energy sources). Diese angesprochene Regelbarkeit ist bei den A-Systemen stand der Technik, beim BOP-B können Wirkungsgrad-Einbussen sogar über einen 1:10-Bereich auf einem vernachlässigbaren Pegel bleiben.

Die Komplexität der Situation wird noch angereichert durch die Diskussion über die Speichergrösse und deren Verwendungsart (Stichwort: Leitungsende/Schwammnetz, dezentrale Erzeugung), wobei die Tendenz eher zu „kleinen Einheiten“ geht: um einige 100 kW, wie an der Eurosolar-Konferenz in Wuppertal im Juni 2003 dargestellt wurde, vermutlich beeinflusst durch die kleine „Endzeitstimmung“ die zurzeit in der H₂/Brennstoffzellen-Branche herrscht, die diesen „Häuserblock“-Markt für sich beanspruchte. Auch andere Marktsegmente wie Inselanlagen unter einen Hut zu bringen wird noch viel technologische und kostenanalytische Wahrheitsfindung erfordern: hierzu ist eine detaillierte Übersicht der zurzeit vorhandenen Möglichkeiten und Situationen sicherlich ein unverzichtbares Werkzeug.

I. Cyphelly Juli 2003

ANHANG III DIE SPEICHERBEHÄLTER FÜR DRUCKLUFT

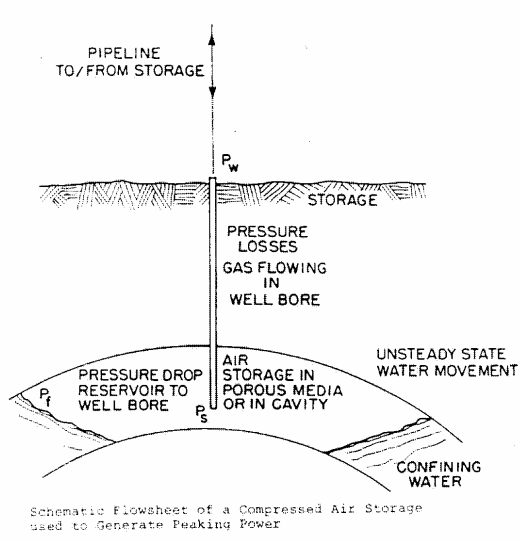
Die Vielfalt der Speichermöglichkeiten für Luft lässt sich überhaupt nicht mit den Kapazitäten anderer Speicherarten vergleichen, zumal praktisch jeder dichte Hohlraum, Porosität oder injizierte Blase ein Behältnis werden kann; hierbei trennt man die Luftspeicher entweder nach ortsgebundenen Behältnissen (Kavernen, Aquifer- oder Tiefseeblasen) oder nach frei wählbaren Lagerstellen (Flaschen, Rohrbündel, CNG-Zylinder, Pipe-Line-Rohre usw.). Auch wird zwischen Konstantdruckspeicher (Aquifer- oder Tiefsee-Blase, wasserkompensierte Felskaverne) und Konstantraumspeicher (Flaschen, Kavernen, Rohre) unterschieden (s. Bild 7)

Die entscheidende Frage nach dem Preis ist bei solcher Vielfalt nur schwer zu beantworten, wobei theoretisch eine GWh-Speicherung in einer artesischen Grundwasserader lediglich zum Preis einer Bohrung und einer Druckleitung zu haben ist, da diese geologischen Formationen prinzipiell dicht sind. Die meisten leerstehenden Salzstöcke müssen sorgfältig untersucht und abgedichtet werden und sind nicht immer bis 200 bar belastbar. Die Tiefsee-Variante ist sicherlich bestechend, zumal die erforderlichen Tiefen um die 2000 m oft nicht allzuweit von der Küste anzutreffen sind, insbesondere bei speicherhungrigen Inselgruppen (Karibik, Kanaren, Azoren usw.); der Nachteil einer langen Rohrleitung wiegt bei hohem Betriebsdruck nicht so schwer, und die Verluste nehmen ja mit abnehmendem Füllgrad ja nicht zu, da der Betriebsdruck aufrecht erhalten wird. Eine 2 m hohe Blase von der Grösse eines Fussballfeldes würde immerhin ca. 300 MWh speichern, aber es sind noch viele technologische Hürden zu überwinden (diese Lösung wurde auch schon für schweizer Seen vorgeschlagen).

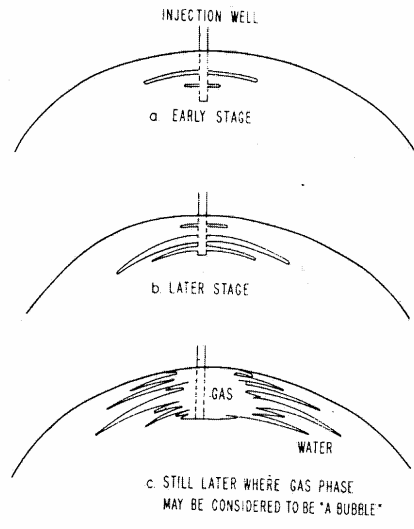
Im Gegensatz zu diesen ortsgebundenen Speichern stehen die teureren aber technisch einwandfrei definierten Flaschen oder CNG-Zylinder der Gaswirtschaft zur Verfügung, wo z.B. nach ISO 11439 eine 15'000-fach wiederholte Schwellbelastung zwischen 20 und 260 bar als Prüfung vorgeschrieben ist. Die Industrie-Flaschen kosten bei nicht allzu grossen Stückzahlen unter 2 EUR pro Liter (also eine Speicherkapazität für 14 Wh/EUR oder 71 EUR/kWh), TÜV-Zertifikat inbegriffen: die Speicherung einer kWh kostet demnach 0.0047 EUR bei einer Lebensdauer von 20'000 Zyklen, die Transformatoren-Abschreibung nicht mitgerechnet. Diese Preise lassen sich noch weiter reduzieren, z.B. durch Verwendung von Pipe-Line-Rohrstücken (Needle Bottles), die nahe am Stahlpreis kalkuliert werden. In kleinen Anlagen dürfte jedoch anfänglich die einfache Handhabung der vertikalen „dichteste Packung“-Aufstellung von Industrie-Gasflaschen vorherrschen, wo eine sichere Kondensatableitung und sehr einfache Verrohrungen möglich sind: die Aufstellung der Flaschen braucht keinen besonderen Unterbau oder gar säurefeste Wannen wie bei elektrochemischen Batterien, das Flaschenfeld kann im Freien mittels Portalkran befahren werden, der jedwede Flasche herauspicken kann. Somit gesellen sich zu den eigentlichen Behälterkosten nur sehr geringe Anlagenkosten: bei grösseren Anlagen darf somit auf Preise unter 50 EUR/kWh spekuliert werden.

Nicht nur sind die ortsgebundenen Lösungen preislich günstiger als die Stahlflaschen, auch die „graue Energie“ wird hierbei vernachlässigbar, denn bei 3 kWh/kg für wiederverwerteten Stahl ergeben sich bei Flaschen 100 kWh pro kWh Speicherkapazität, also sind ca 30 % des Flaschenpreises Energiekosten!

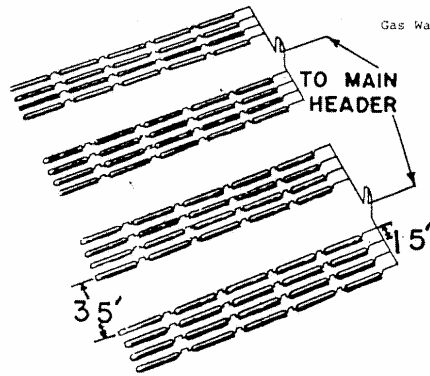
Beispiele von Speicherbehälter



Creation of Gas Bubble in an Aquifer

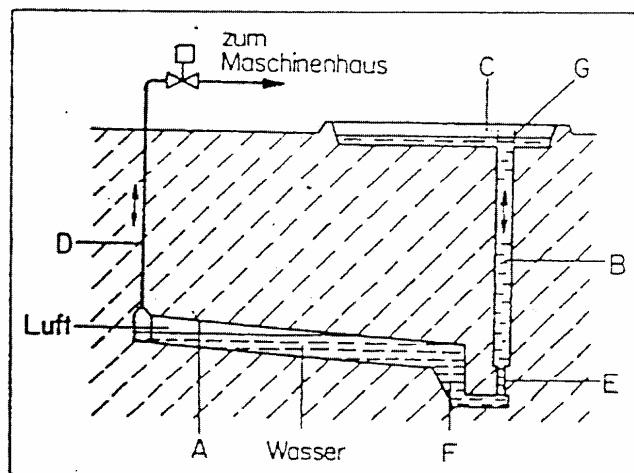


Gas Wafering During Initial Injection in Aquifer



Arrangement of 80 bottles for underground high pressure storage.

- Wasserkompensierte Felskavernen
- A Kaverne (mehrere parallele Tunnels)
 - B Wasserschacht
 - C Wasser-Ausgleichsbecken
 - D Luftleitung
 - E U-Rohr mit Drosselstelle
 - F Sumpf
 - G Abschliessbarer Wassereinlauf



Bild

Anhang IV

Exhibit ES.8
Capital Costs
 Per Unit Energy vs. Per Unit Power

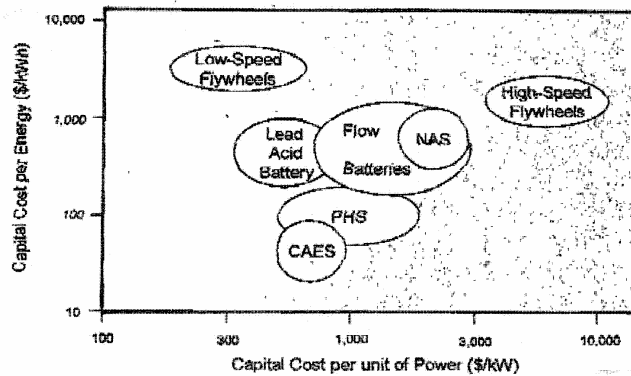


Exhibit ES.9
Energy Storage Technology Capability Comparison

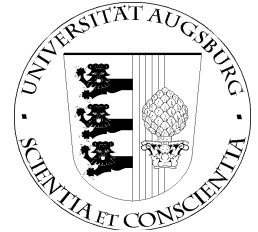
	Power Rating (MW)	Discharge Duration	Efficiency %	Lifetime	Response Time
Pumped Hydro Storage	4000 MW	~12 hrs	87%	30 yr	minutes
CAES	220 MW	days	10.8	30 yr	minutes
Flow Batteries (ZnBr)	50 kW	2 hrs	66%	10 yr	< 1/4 cycle
Lead Acid Batteries	20 MW	6-8 hrs	85%	5 yr	1/4 cycle
Sodium Sulfur Batteries	300 MW	1 hr	76%	5 yr	- NA -
SMES	6 MW	1 sec	95%	30 yr	< 1/4 cycle
Flywheels	1.8 MW	3-120 sec	90%	20 yr	< 1 cycle

Sources:
 Characteristics and technologies for
 Long vs. Short-term Energy Storage.
 Report SAND2001-0785, March 2001
 Pearl Street Inc. 2002

Prof. Dr. Armin Reller
Festkörperchemie / WZU
Universität Augsburg
Universitätsstraße 1
D-86135 Augsburg

Telefon: (..49) 821 598 3000
Telefax: (..49) 821 598 3002
e-mail: armin.reller@physik.uni-augsburg.de
internet: <http://www.physik.uni-augsburg.de/chemie>

Anhang V



Augsburg, den 24. April 2004

Herrn Roland Brüniger
R. Brüniger AG
Zwillikerstr. 8
CH – 8913 Ottenbach

Sehr geehrter Herr Brüniger

Nachfolgend sende ich Ihnen eine kurze Stellungnahme zur Öko-Effizienz von Druckluft-Energiespeichersystemen. Ausführliche Angaben zur historischen Entwicklung der Drucklufttechnik sowie eine zum Bericht von Herrn I. Cyphelly ergänzende Vergleichsstudie liegt ebenfalls bei. Ich hoffe, dass sich diese Unterlagen für die Förderung der vielversprechenden Energiespeichertechnik mit Druckluft nutzbringend verwenden lassen.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. Armin Reller

Anlagen: *Zur Öko-Effizienz von Druckluft-Energiespeichern, A. Reller (Kurzstatement)*

Referenzen: *Drucklufttechnik und –speicherung, U. Schneider*

Fahrzeug-Antrieb der Zukunft, H. Benz, M. van Haafden, E. Meyer und M. Meyer

Zur Öko-Effizienz von Druckluft - Energiespeichern

Wichtige Kriterien für die zukünftige Einsatzfähigkeit eines Energiesystems sind neben der technischen Realisierbarkeit, einem möglichst hohen Wirkungsgrad bei allen Energietransformationen, einer möglichst hohen Unabhängigkeit von Ressourcen bzw. Regenerierbarkeit der eingesetzten Materialien und Werkstoffe vor allem auch möglichst geringe schädliche Auswirkungen auf die Umwelt. Insgesamt sind demnach sog. öko-effiziente Energiesysteme erstrebenswert, die ökonomisch und ökologisch bestmögliche Werte aufweisen. Inwiefern Druckluftspeichersysteme diesen Kriterienkatalog erfüllen können, soll in der Folge kurz dargelegt werden.

Aus der vorliegenden Studie von I. Cyphelly *et al.* geht klar hervor, dass Energiespeicherung mittels Druckluft - trotz der im Vergleich zu konventionellen Energieträgern bzw. -speichern wie Benzin geringen Energiedichte - dann konkurrenzfähig ist, wenn bei den notwendigen Energietransformationen sehr hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Dies ist gleichbedeutend mit quasi-isothermen Systemen bzw. sehr geringen Abwärmeverlusten. Hier zeigt sich ein erster bemerkenswerter Vorteil des Druckluftsystems: es handelt sich im Prinzip um ein physikalisches Energiesystem, in dem weder für die Speicherung noch für die Nutzung chemische Prozesse ablaufen. Es entstehen dementsprechend keine die Umwelt belastenden Emissionen. Da der (sekundäre) Energieträger bzw. das Energie-Transportmedium die ubiquitär vorhandene Luft ist, ergeben sich folgende wichtige Argumente:

- ◆ Druckluftsysteme weisen keine Abhängigkeit von gegebenenfalls knappen Ressourcen wie seltenen Metallen, etc. auf
- ◆ Druckluftsysteme sind stofflich offene, atmosphärische Speichersysteme, in dem keine kritischen Stoffe und Materialien - weder als Medium noch als logistisch notwendige Werkstoffe - zum Einsatz kommen oder in die Umgebung emittiert werden.
- ◆ Da die primäre Energie, die mit Druckluftsystemen gespeichert werden soll, unterschiedlicher Form sein kann - für den Fall regenerativer Quellen wie Wasserkraft, Wind oder solare Strahlungsenergie - lassen sich vorzugsweise *stand-alone*-Anlagen bzw. dezentrale Energieversorgungen konzipieren. Diese Netzunabhängigkeit erweitert das Einsatzpotential von Druckluftspeichern enorm: Inselsituationen, entlegene Einsatzgebiete, etc.
- ◆ Druckluftspeicher können in kurzer Zeit hohe Leistungen abgeben, liefern gegebenenfalls „Bandenergie“, sie weisen eine sehr hohe Zyklenbeständigkeit und sehr geringe Verschleisseeffekte auf.
- ◆ Der Ladezustand von Druckluftspeichern kann immer festgestellt werden.

Insgesamt lässt sich anhand der vorliegenden Kenndaten über die zur Zeit funktionierenden Energiesysteme konstatieren, dass Druckluftspeichersysteme eine vergleichsweise sehr hohe Öko-Effizienz aufweisen, dass sie modular und äusserst flexibel aufgebaut und eingesetzt werden können, und dass sie sich unter entsprechenden Bedingungen jetzt schon sehr wirtschaftlich betreiben lassen. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass der Beweis der Funktionalität der ganzen Energiekette noch erbracht werden muss.