



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Druckluftspeicherung: Optimierung /Aus-messung bestehendes Projektmuster

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Philipp Brückmann, Brückmann Elektronik (Projektleitung)
Bahnhofstrasse 17, 7260 Davos Dorf,
brueckmanelektronik@bluewin.ch , www.brueckmann-el.ch

Iván Cyphelly, Cyphelly & Cie (Versuche und Bericht)
POB18, 2416 Les Brenets,
cyphelly@ran.es , www.alternativascmr.com

Impressum

Datum: 1.6.2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, felix.frey@bfe.admin.ch

BFE-Projektnummer: 100985

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch und www.electricity-research.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Zusammenfassung	2
Abstract	2
1. Einleitung	3
2. Aktivitäten und Untersuchungen	4
<i>Die Flüssigkeit</i>	4
<i>Der mittelbare Wärmetauscher</i>	6
<i>Die Wandlermechanik</i>	7
3. Schlussbetrachtung	7
Referenzen	8
Anhang I : Publikation von Linde	9
Anhang II Early liquid piston compressors	11
Anhang III Bilder vom Versuchsaufbau	14

Zusammenfassung

Dieses Projekt ist ein Zusatzauftrag zum bereits abgeschlossenen Projekt *"Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Wärmetauscher und Motgen"*, Projekt -Nr. 100985.

Erste Versuche mit dem Wärmetauscher haben gezeigt, dass die gewählte Bauform thermisch den Anforderungen reichlich genügt. Es hat sich aber auch gezeigt, dass es im Umfeld des Flüssigkolbens noch einige unerwartete Effekte gibt, welche eine Weiterentwicklung der Versuchsanordnung erfordern. In diesem Zusatzauftrag wurden diese Effekte näher untersucht. Schwierigkeiten mit den verwendeten Kolbenflüssigkeiten verunmöglichen jedoch die vorgesehenen, genauen Messreihen.

Unabhängig von unseren Untersuchungen ist die Firma LINDE (Wien) im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Kompressors für die Wasserstoffbetankung zu den gleichen Schlüssen gekommen und hat die Funktion des Wärmetauschers bestätigt.

Abstract

This project is an additional part of the already finished project *"Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Wärmetauscher und Motgen"*, Projekt -Nr. 100985.

First tests revealed that the chosen heat exchanger fulfils the thermal expectations with substantial reserves. But there are some strange effects around that liquid piston system, which need further development of the test infrastructure. Therefore this project is launched for finding out more. Difficulties with the available liquids prohibited the intended exact series of measurements.

Independend of our investigations the Austrian company LINDE has come to the same conclusions when developing a compressor for hydrogen gas stations. So the function of the heat exchanger is confirmed.

1. Einleitung

Autor: I. Cyphelly

Die Konzeptarbeit und die Untersuchungen an Elementen der Kette Welle-Druckluft bzw. Druckluft-Welle sind in mehreren Schritten und Berichten dargestellt worden, wobei die an und für sich bekannte Kernfrage nach der wirkungsgradbestimmenden Isothermie der eigentlichen Wandlung von Druckenergie im Gas zur mechanischen Energie einer Welle (oder umgekehrt) durch die Ausgestaltung der Arbeitskammer der Flüssigkolben bestimmt wird. Diese Ausgestaltung muss den vielen Anforderungen bezüglich Ventiltechnik, Totvolumina, Wärmetausch, Durchflusswiderstand usw. gerecht werden.

Die letzte Phase mit Prüfaufbau lief parallel mit raschen Fortschritten der Fa. LINDE, die mit einem praktisch identischen Konzept schon in einen Versuchsbetrieb bei 250 bar für Wasserstoff gegangen ist (s. Anhang I). Dies bestätigt erfreulicherweise die Richtigkeit unserer Annahmen. Mit der richtigen Wahl der Flüssigkeit werden nun bei Linde 700 bar angepeilt, die magische Grenze bei welcher der gasförmige Wasserstoff ungefähr die gleiche Speicherdichte für Fahrzeuge sichert wie übliche fossile Brennstoffe.

Die dem Druckluftprojekt zugrunde liegende Idee basiert auf der nun bestätigten Annahme, dass nur ein Flüssigkolben mit Sprühung oder der Umspülung eines mittelbaren Wärmetauschers gemäss der Weiterentwicklung des Patentes von W. H. KNIGHT aus dem Jahre 1897 (s. Anhang II) zum Ziele führen kann, und zwar unter drei Voraussetzungen:

- dass der Wärmetauscher im Arbeitsraum wirkungsvoll die Temperatur der Luft in einer geringen Temperaturspanne von 10 – 20 °C während einem Arbeitszyklus halten kann, ohne dass durch eine zu niedrige Permeabilität der Tauschermasse unzulässige Druckabfälle im Betrieb entstehen. Dieser Wunsch hängt auch von der Wahl der Flüssigkeit ab, insbesondere von deren Viskosität und deren Dampfdruck/Benetzbarkeit.
- dass die Kolbenflüssigkeit bei den vorgesehenen Betriebsdrücken von bis zu 250 bar kaum Luft aufnimmt und nicht verschleppt wird; in den einschlägigen Veröffentlichungen werden Dampfdruckwerte 10^{-4} bis 10^{-8} mbar und eine Gaslöslichkeit unter 10^{-4} mol/l bar genannt.
- dass die Flüssigkeitseigenschaften eine Reinhaltung/Regenerierung derselben im Betrieb erlauben, obschon ein dauernder Kontakt mit der Umgebungsluft mit allen ihren Verunreinigungen stattfindet.

Flüssigkolben haben eine lange Geschichte, insbesondere als Widderpumpe (MONTGOLFIER 1796) und als Kompressorelement, sogar der kombinierte Einsatz beider Prinzipien hat Geschichte gemacht, und zwar bei der ersten Tunnelbohrung mit Pneumatikhammertechnik am Mont-Cenis (1857), wo der bekannte Widderkompressor von Someiller & Colladon eingesetzt wurde. Das Flüssigkolben-Widderprinzip wurde sogar für Spülwasserbetrieb bei Tieflochbohrungen angepasst (A. Rosener: TU Clausthal, 1992: „Der hydraulische Bohrhammer Cyphelly“). Schon früh wurde die Erwärmung in der Verdichtungsphase entweder durch Sprühung (Dubois & François, 1876) oder mittels „Vergasung“ am Saugstutzen (Darlington) in Schranken gehalten, allerdings immer für Betriebsdrücke unter 15 bar. Der erste Vorschlag, einen mittelbaren Tauscher einzusetzen, wird erst 1897 aktenkundig, mit dem Argument, dass das Sprühverfahren infolge grosser Tropfenoberfläche die Gasdiffusion in den Kolben begünstige (entsprechend dem Vortrag von L. Saunders an der Cornell University, 1891). Es konnten keine späteren Spuren der Erfindung des Herrn Knight festgestellt werden, obschon hier nicht nur die Erfindung klar konzipiert war sondern auch mit stichhaltigen Argumenten untermauert werden konnte: vermutlich ist der vorgeschlagene Einsatz von Stahlwolle als mittelbarer Tauscher das Problem, denn ohne Sonderflüssigkeit kann sich hier infolge von Kapillarkräften kein zusammenhängender Spiegel bilden, von den Druckabfällen vor den Ventilen ganz zu schweigen. Obschon diese erste Version des mittelbaren Tauschers mit den heutigen Flüssigkeiten vermutlich recht zufriedenstellend arbeiten würde, sind doch entscheidende Verbesserungen angebracht, deren Wirkungsweisen am realisierten Prüfstand zu untersuchen sind.

2. Aktivitäten und Untersuchungen

Die Flüssigkeit

Nachdem diverse Unzulänglichkeiten des im letzten Bericht vorgestellten Prüfaufbaus behoben waren, konnte mit Funktionsprüfungen begonnen werden. Nur Funktionsprüfungen deshalb, weil sich zeigte, dass mit Wasser kein befriedigender Betrieb möglich ist. Leider standen die von verschiedenen Seiten zugesagten Flüssigkeiten für die Versuche nicht zur Verfügung. Deshalb musste die Suche von Neuem beginnen, diesmal mit Hilfe eines spezialisierten Institutes der Uni Las Palmas (Prof. Juan Ortega) und Fachfirmen (IoLITEC in Denzlingen; eine Anfrage bei Linde Wien/Dr. Adler bestätigte die Inkompatibilität ihrer Lösung mit Luft, da deren ionische Flüssigkeit auf Wasserstoffgas getrimmt wurde: ein Besuch in Wien ist geplant).

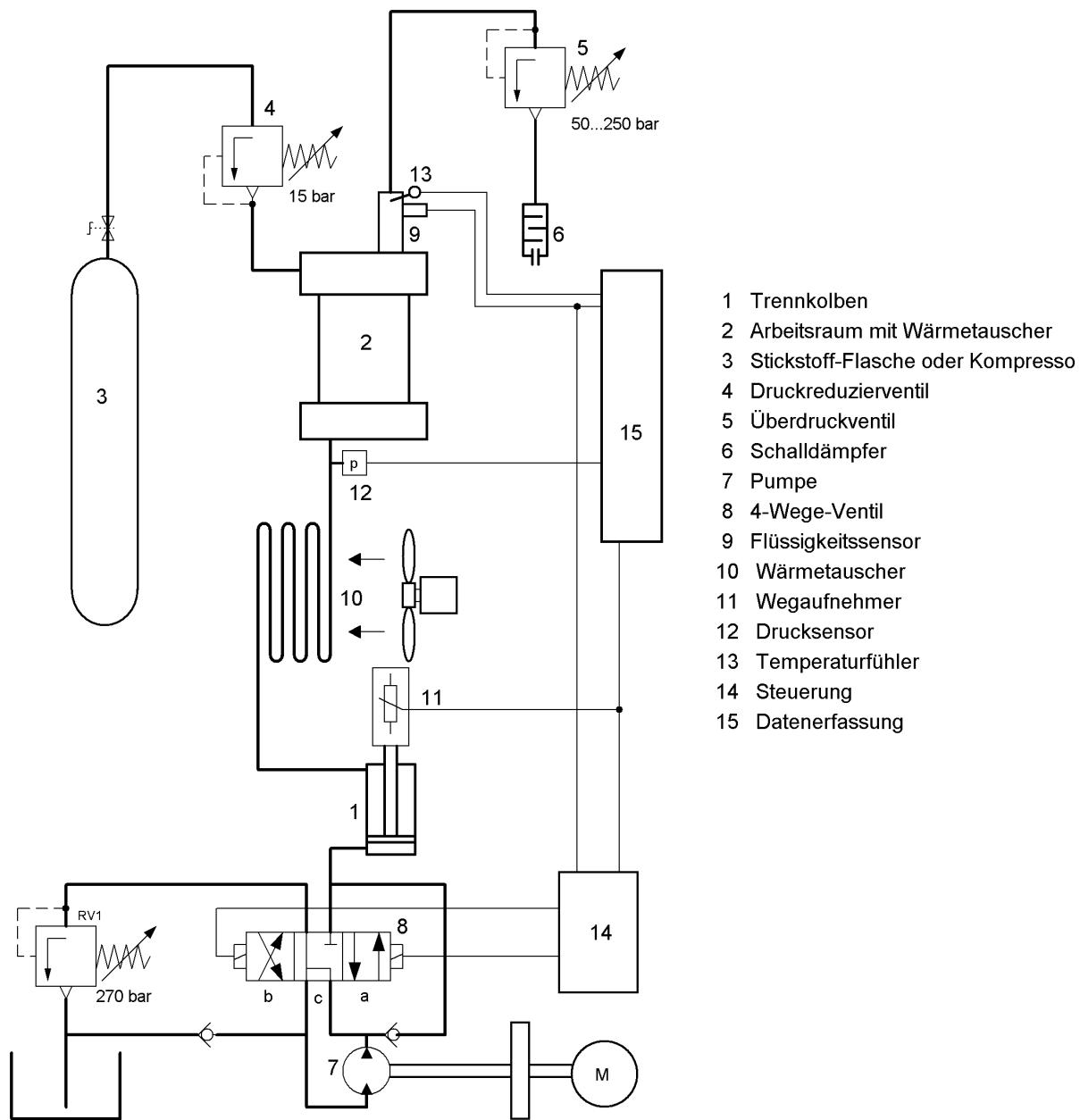


Fig. 1 Hydraulics schema Versuchsaufbau (gez: Brückmann)

Trotzdem wurden Versuchsreihen mit Wasser als Medium absolviert, deren Resultate für den Wärmetauscher eigentlich zu gut sind (mit zwei verschiedenen Spaltbreiten wurden beim 3 kW – Betrieb kaum messbare Erwärmungen festgestellt: $< 2^\circ\text{C}$), wogegen der volumetrische Wirkungsgrad stochastisch ausserordentlich schwankte und über 100 bar keine wiederholbaren Resultate erzielt werden konnten.

Dieser Tatbestand kann zwei Ursachen haben, und zwar einerseits eine ungünstige Ausgestaltung des Arbeitsraumes, der irgendwo Luftblasen festhält, oder anderseits die Wirkung der Luflöslichkeit im Wasser. Eine Mischung beider Phänomene ist ebenfalls plausibel, wobei ein Blasenschaum die schnelle Diffusion begünstigen würde, denn allein auf der Basis der Löslichkeit (Ostwald-Koeffizient) wäre eigentlich jeglicher Betrieb mit Wasser in diesem Druckbereich unmöglich, erst die extrem langsame Diffusionsgeschwindigkeit kann hier einen Betrieb ermöglichen. Da wir ja dank Linde wissen, dass bei geeigneter Flüssigkeit keine unerwarteten Phänomene auftreten, liegt die Entscheidung nahe, über eine Löslichkeitsreduktion die Ursachen trennen zu können. Bei Salzlösungen im Wasser nimmt bekanntlich die Löslichkeit ab, nach der Formel von Setschenow:

$$\log \frac{S}{S_0} = k \cdot c$$

wobei S und S_0 die Löslichkeiten mit und ohne Salz bedeuten, k für den spezifischen Salzfaktor (salting-out coefficient) steht, der bei Kochsalz -0,124 beträgt, und c der Salzkonzentration in Mol/l entspricht, die bei 6,16 Mol/l saturiert. Mit diesen Werten erhält man arithmetisch eine maximale Löslichkeitsreduktion um den Faktor 5,75 (bei grossen Konzentrationen stimmt Setschenow nicht genau), die nicht den Wunschwert darstellt aber doch Vergleichsmessungen erlaubt. Die (bescheidenen) Erwartungen wurden bestätigt, verschob sich doch die Problemzone mit Salzwasser auf ca. 130 bar.

Obschon andere molekulare Flüssigkeiten gemäss Literaturangaben wesentlich bessere Eigenschaften aufweisen als Wasser (Perfluoropolyether, Polyphenyl-Ether bzw.-Thioether, Tertramethyltetraphenylsiloxyan usw), ist sicherlich die Lösung bei den ionischen Flüssigkeiten zu suchen, da neben den Haupteigenschaften wie Dampfdruck und Löslichkeit weitere Merkmale beeinflusst werden können.

Nafolgend ist das Pflichtenheft, das für das Institut für Ionenflüssigkeiten von Prof. Juan Ortega seinerseits zusammengestellt wurde:

FLÜSSIGKOLBEN FÜR DRUCKLUFT

Wir verwenden für die isotherme Verdichtung/Entspannung von Druckluft einen Flüssigkolben dessen Arbeitsraum mit Metallplatten gefüllt ist; die Eigenschaften der Betriebsflüssigkeit sind entscheidend für die korrekte Funktionsweise der Anlage; der Bedeutung entsprechend geordnet ergibt sich folgende Wunschliste:

- **soll 200 bar – Zyklen im 3-Sekunden-Takt aushalten, ohne störende Luftaufnahme aufzuweisen; somit ist eine Kombination von Diffusions- und Löslichkeitskoeffizienten zu finden, die eine Luftabsorption von weniger als 5 % im Vergleich zu Trinkwasser garantiert.**
- **soll die Blasenbildung in den Plattenpalten (0,2-0,3 mm) unterdrücken**
- **soll geringst mögliche Viskosität aufweisen, wenn möglich geringer als Wasser**
- **die ideale Temperaturspanne beträgt -20°C / 45 °C**
- **soll keine explosive Mischung mit Luft bilden (kein „Diseleffekt“)**
- **die spezifische Wärmekapazität soll 1/5 des Wassers überschreiten**
- **soll minimale Haftneigung an den Metallwänden aufweisen.**
- **soll minimale Verdampfung aufweisen.**
- **soll nicht oxidieren**
- **soll keine toxischen Dämpfe emittieren.**
- **soll weder Stahl noch Aluminium od. Nitrile angreifen**

Weitere Eigenschaften, die sinnvoll sind, deren Fehlen aber umschifft werden kann:

- **soll schmierfähig sein, für einen direkten Einsatz im Hydroaggregat (ohne Schmierung müssen Trennmembranen vorgesehen werden)**
- **soll mit Wasser nicht mischbar sein (erlaubt effiziente Kondenswasserentfernung)**
- **soll höchstmögliches spez. Gewicht aufweisen.**

Die hier zusammengestellte Wunschliste wurde praktisch ohne Abstriche (einziges Fragezeichen ist die Viskosität) von mehreren Quellen als machbar eingestuft. In seinen **Empfehlungen für das weitere Vorgehen** schreibt die Fa. Iolitec (Dr. Reisinger):

Aufgrund des ionischen Charakters und des damit verbundenen extrem niedrigen Dampfdrucks sind ionische Flüssigkeiten aus unserer Sicht prädestiniert für eine Anwendung als Flüssigkolben. Dies wird auch durch das grosse Interesse und Engagement der Firma Linde AG verdeutlicht.

Anhand des Anforderungsprofils kommen einige ionische Flüssigkeiten für die geplante Anwendung in Frage, wobei bezüglich Gaslöslichkeit, Blasenbildung, Viskosität, Temperaturspanne und Wärmekapazität hinsichtlich der Auswahl bestimmter Kandidaten seitens Iolitec kritischer, aber sehr wohl möglich eingestuft werden. Bezüglich Haftneigung an Metallwänden, toxischer Verdampfung mit Bildung explosiver Mischungen, Oxidation bzw. Korrosion, Schmierfähigkeit, Wassermischbarkeit und Dichte sind dagegen voraussichtlich relativ unkritisch. Sehr vielversprechend erscheinen aus unserer Sicht 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluor-methylsulfonyl)amid (EMIM BTA), 1-Butyl-3-methylimidazolium bis(trifluormethylsulfonyl)amid (BMIM BTA), 1-Ethyl-3-methylimidazolium dicyanamid (BMIM DCA). Laut Aussage von Herrn Cyphelly könnten bei einer entsprechender Umkonstruktion des Kompressors auch Flüssigkeiten mit einer höheren Viskosität zum Einsatz kommen (wie dies unseres Wissens bei der Fa. Linde der Fall ist), was die Auswahl auf etwa 10-15 Kandidaten erweitert, eine mögliche Mischung verschiedener IL oder Additivierung nicht eingerechnet. Die Auswahl basiert jedoch auf den Daten und Eigenschaften, die Iolitec zu den genannten Verbindungen vorliegen. Besonders im Hinblick auf die niedrige Gaslöslichkeit und Diffusion sowie Blasenbildung und Haftneigung an Metallwänden kann allerdings ohne entsprechende Untersuchungen keine sichere Aussage über einen möglichen Einsatz getroffen werden. Daher sind aus unserer Sicht für eine erfolgreiche Applikation von ionischen Flüssigkeiten als Betriebsmittel in solchen Flüssigkompressoren Versuche zur Löslichkeit von Luft notwendig, z.B. mit dem Aufbau von Herrn Cyphelly.

Zusammenfassend schätzt Iolitec den Einsatz von IL als Betriebsmittel für Flüssigkolbenkompressoren äusserst vielversprechend ein, vorausgesetzt, dass die richtige IL oder Mischung gefunden wird.

Es ist dank dem bestehenden Prüfaufbau möglich, kurzfristig die Eignung einer Flüssigkeit oder deren Macken festzustellen, denn wir sehen, dass hier eine Verbindung Flüssigkeit (Viskosität) – mittelbarer Tauscher (hydraulischer Widerstand) – Tauscheffekt (spez. Wärmekapazität) – usw. besteht, die sich in konstruktiven Ausgestaltungen niederschlägt.

Der mittelbare Wärmetauscher

Wir haben gesehen, dass der Wärmetauscher in seiner jetzigen Form eigentlich überdimensioniert ist, wobei die starke Wirkung möglicherweise einem Verdampfungseffekt des Wassers an den Platten zuzuschreiben ist, der mit ionischen Flüssigkeiten nicht auftreten sollte. Wir sehen auch, dass sich möglicherweise der Wunsch nach höherer Viskosität durchsetzt, was eine Vergrösserung der Spalte und dementsprechend einen geringeren Tauscheffekt zur Folge hätte. Auch kann die geringere spez. Wärme der künftigen Flüssigkeit eine Verdickung der Platten erzwingen, damit die Wärmeableitung aus dem kritischen Volumen nahe am oberen Kolbentotpunkt durch Vertikalfuss verbessert wird. Wir sehen, dass eine Optimierung des Flüssigkolbens samt seinem Arbeitsraum eine komplexe Angelegenheit ist, die viel iterative Kleinarbeit erfordert. Da uns eine neue Tauscherrolle ca. 2000.- CHF ohne Transport und Arbeit kostet, und die Blechlieferungen auf Mass mehrere Monate in Anspruch nehmen, sind die Fortschritte in unserem bescheidenen Rahmen ausserordentlich langsam. Dazu gesellt sich noch die Ventil- und Steuerungsproblematik, die einen direkten Einfluss auf den Wärmetauscher ausübt, insbesondere bei der Pfadausgestaltung für die Durchflüsse von Luft und Flüssigkeit und die Unterbringung der Funktionen ohne Totraum.

Die unterschiedlichen Ziele von Linde (die nur einen Kompressorbetrieb anpeilen) und von uns bedeuten für den Flüssigkolben und sein Umfeld zusätzliche Anforderungen, da beim BOP-B einerseits die Ventile zwangsgesteuert sein müssen, um bei Entspannung (motorischer Betrieb) einsetzbar zu sein, und anderseits hier kein Vordruck den Arbeitsraum füllt, da die Verdichtung/Entspannung ab Atmosphäre erfolgt. Beide Bedingungen erfordern einige Klimmzüge und erfinderische Tätigkeit rund um den Wärmetauscher und sein Zylinder.

Die Wandlermechanik

Es gibt eine grosse Auswahl bezüglich der Ankopplungsmöglichkeiten der Bewegung des Flüssigkolbens an die operative Energie in Form von Wellendrehzahl oder Stromerzeugung: die Wahl wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, von der Leistungsklasse (MW, kW) bis zum Lastkollektiv (Schwankungen des Leistungsflusses bis zu stand-by -Werten). Um den Einfluss dieser Koppelungen auf die Ausgestaltung des Wärmetauschers zu analysieren müssen die wichtigsten Lösungswege beschrieben werden:

Der ursprüngliche Lösungsansatz der Wandlung war die Sicherung einer annähernd konstanten Wellendrehzahl mittels hydraulischer Pulsdauermodulierung an einem Schwungrad, wobei die Eigenschaft der vernachlässigbaren Trägheit auf der Speicherseite ausgenutzt wurde (das entsprechende Funktionsmuster wurde in Davos vorgeführt). Auf die jetzige Bauform übertragen bedeutet dies eine Flüssigkolbenbewegung mit konstanter Geschwindigkeit und ventilgesteuerter Umschaltung an den Totpunkten. Diese Bauart konnte jedoch aus verschiedenen Gründen nicht auf minimale Leerlaufverluste getrimmt werden, was die Ausweitung der Gefechtszone auf Supercap-Sekundärspeichersysteme zwecks stand-by-Überbrückung führte. Deren Vielfältigkeit und ausufernde Elektronik begrenzen den möglichen Gesamtwirkungsgrad in erheblichem Masse. Bei der linearen Bewegung bedeutet die jähre Umkehrung auch eine maximale thermische Belastung des Wärmetauschers nahe am Speicherdruck, die konstruktiv abgefedert werden muss.

Am anderen Ende der Möglichkeiten wäre eine durch Kurbeltrieb erzeugte Bewegung des Flüssigkolbens, die an den Totpunkten minimale Geschwindigkeiten verursacht und somit dem Wärmetauscher weniger Auflagen aufbürdet; diese Vorteile werden durch eine grössere Geschwindigkeit in der Mitte des Hubes erkauft, wo weder thermisch noch hydraulisch kritische Zustände herrschen. Es sind mit dieser Bauart mehrere Lösungen vorstellbar, die möglicherweise einen stand-by Betrieb ohne Schwungrad erlauben würden.

Der Entwurf für höhere Leistungen basiert auf hydrostatischen Einheiten mit variablem Schluckvolumen, die vom Hr. Cyphelly -- aufbauend auf dem Radialkolbenprinzip -- mitentwickelt wurden. Diese Bauart erlaubt nicht nur eine sanfte und kontrollierte Umkehrung der Flüssigkolben-Bewegung an den Totpunkten, sondern auch eine Stapelbauweise auf einer Generatorenwelle in Einheiten von 0,5 bis 1 MW, mit Einzug der Kolben im Leerlauf zwecks Verlustminimierung – wie dies in früheren Berichten für den Vergleich mit der Golden Valley BESS in Fairbanks (40 MW /13,3 MWh) herangezogen wurde. Auch die Fa. Linde verwendet eine Pumpe mit variablem Schluckvolumen (gemäss WO 2006/034748 A1 mit dem Taumelscheibenprinzip, also mit nicht stapelbarer Axialkolbenanordnung).

3. Schlussbetrachtung

Dieser unter dem Begriff „**Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B**“ verfasste Zusatzbericht kann nur feststellen, dass das physikalische BOP-B Konzept eines „mittelbaren Wärmetauschers im Arbeitsraum eines Flüssigkolbens für Verdichtung und Entspannung von Luft“ von der Fa. Linde in Wien restlos bestätigt wurde. Die Machbarkeit des Wärmetauschers kann somit als bestätigt betrachtet werden. Was nun neben der Suche nach einer geeigneten Flüssigkeit noch der Weiterentwicklung bedarf, ist die mechanische Ausgestaltung einer Maschine, die auch für den motorischen Betrieb geeignet ist, mit besonderem Gewicht auf Wirkungsgrad und Einfachheit und unter besonderer Berücksichtigung der Luft- Qualität und –Eigenschaften.

Als Supplement kann man den Umstand nennen, dass Entwerfer von ionischen Flüssigkeiten grosses Interesse am Tauscherprüfstand bekunden, zumal er eine unmittelbare Prüfung wichtiger Parameter erlaubt, die ohne einen isothermen Verlauf kaum auf einfache Weise ermittelt werden können.

Leider konnten die anvisierten pV-Diagramme, welche klaren Aufschluss über den thermischen Verlauf der Kompression gegeben hätten, mit der vorhandenen Versuchseinrichtung nicht aufgenommen werden. Dies wegen der erwähnten, flüssigkeitsbedingten Probleme, die keine reproduzierbaren Messresultate ermöglichen.

Referenzen

- [1] I. Cyphelly, A. Rufer, Ph. Brückmann, W. Menhardt, A. Reller: ***Einsatz von Druckluftspeichersystemen***, DIS-Projekt-Nr. 100406, Mai 2004
- [2] I. Cyphelly, Ph. Brückmann, W. Menhardt: ***Technisch Grundlagen der Druckluftspeicherung und deren Einsatz als Ersatz für Bleibatterien***, DIS-Projekt-Nr. 100406, September 2004
- [3] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Jahresbericht 2004***, DIS-Projekt-Nr. 100985, November 2004
- [4] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Zwischenbericht 2005***, DIS-Projekt-Nr. 100985, April 2005
- [5] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Jahresbericht 2005***, DIS-Projekt-Nr. 100985, Dezember 2005
- [6] Ph. Brückmann, Iván Cyphelly, Markus Lindegger: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Schlussbericht 2006***, DIS-Projekt-Nr. 100985, Dezember 2006

Anhang I : Publikation von Linde

Linde engineers develop ionic compressor

Mobility under high pressure

Mechanical engineer Robert Adler and his team at Linde Gas, Vienna, have realized a long-time dream of technology: a machine for compressing gases at constant temperature – isothermal compression. The invention, pursued in vain by engineers for more than 150 years, can revolutionize compressor design. The new technology is finding its first applications in hydrogen and natural gas filling stations.

Buses, cars and even forklift trucks have been running on natural gas for years. The first hydrogen-driven cars, and a few forklift trucks, are already rolling down streets and factory aisles in the U.S.A., Europe and Asia. All these vehicles employ a gaseous fuel that is unlike gasoline or diesel in the requirements it imposes on storage and dispensing equipment. "To store the largest amount of hydrogen in the tank so that the vehicle has an acceptable range, the fuel must be forced into the tank under high pressure, at least 450 bar," explains Linde Gas engineer Helmut Mayer of Vienna.

Piston compressors are used for pressures between 200 and 1,000 bar. Because these machines have many moving parts, the guides and bearings have to have good lubrication in order to prevent wear. But this means that the gas-side space must be absolutely tight; otherwise, lubricant could get in and contaminate the gas. "Combustion in fuel cells, which offer twice the energy efficiency of conventional vehicles, demands high-purity gas without contaminants that would shorten cell life," says Robert Adler, head of the Applications Technology Center (ATZ) of Linde Gas in Vienna. Compressors for hydrogen and natural gas filling stations therefore cannot be lubricated, and as a result

they experience problems in prolonged operation. "For hydrogen to find commercial use, we must have equipment that can work for many thousands of hours with no maintenance. Only then can we build a fueling station capable of delivering the needed quantity of fuel while running economically." Such installations must handle up to 1,500 cubic meters of hydrogen per day and log around 8,000 service hours – 500 days or so – without any maintenance. These goals are virtually unattainable with conventional piston compressors.

Ionic liquids put to use

The team around thermodynamics expert Adler has now come up with a novel solution to this problem, one that may alter mechanical design: the ionic compressor. The new device is named for the ionic liquid media employed by the Linde specialists. These are organic salts with melting points between below 100 degrees Celsius. "Many ionic liquids remain in the liquid state even at room temperature," Adler explains. In contrast to ordinary molecular liquids, ionic liquids consist entirely of particles with negative and positive electric charges. "They combine organic and inorganic chemistry, so to speak, and for this reason

Ionic liquids have been known for about 90 years. They are made of salts that, like table salt, are made up of particles carrying positive (cations) and negative (anions) charges. Most salts have high melting points; the melting points of ionic liquids are drastically lowered through the proper choice of the cations and anions present. The

physical and chemical properties of ionic liquids vary widely, depending on the cation/anion combination selected. These substances have several excellent properties: They are not volatile or combustible, they have no measurable vapor pressure, and they can hold very high concentrations of a wide range of materials in solution – from organic

substances such as fats, oils and pharmaceutical products to metals, polymers and even minerals. The vast number of possible anion/cation combinations means that distinct ionic liquids can be prepared in almost unlimited variety, so that the medium can be adapted to nearly any requirement.

they have new and unusual properties," Adler says, describing the qualities of these exotic substances. For example, ionic liquids have no vapor pressure. This means that molecules do not evaporate from the liquid, so that the medium cannot mix with the ambient atmosphere provided it does not reach its decomposition temperature. Because organic molecules are almost infinite in number, the physical and chemical properties of such a mixture can be tailored to virtually any requirement; this is why ionic liquids are also called "designer liquids". What is more, the mixtures are not flammable or electrically conductive, they act to prevent corrosion, they have good lubricating qualities and – above all – they are environmentally safe because they cannot escape into the atmosphere. The success story, as told by Adler, begins: "This set of properties gave us an idea that we began examining closely just about two years ago."

Linde's engineers, based in the Third District of Vienna, have been working for about four years in a collaboration with DaimlerChrysler AG aimed at developing special compressors for use in hydrogen fueling stations. "We have now become the world market leader in hydrogen stations," says Adler, not without pride. Indeed, half of the world's more than 60 fueling

stations for gaseous hydrogen have come from the shops of the think tank in Vienna. "It was with the ionic liquid principle, though, that we achieved a revolution," says Adler. The Viennese team replaced the metal piston of a conventional compressor with a specially designed, nearly incompressible ionic liquid. In this way, a "liquid piston" does the work of compression. The gas in the cylinder is compressed by the up-and-down motion of the liquid column, similar to the reciprocating motion of an ordinary piston. Because the ionic liquid does not mix with the gas, the Linde engineers did not have to include seals and bearings in their compressor. Adler explains a major potential for cost savings: "In contrast to a conventional piston compressor, with some 500 moving parts, we now need only eight." Maintenance effort is greatly reduced as a result. The only place where conventional parts appear is in the pump that shifts liquid back and forth between two cylinders to move the liquid column up and down. While uncompressed gas is being drawn into one cylinder, the gas in the other cylinder is compressed by the "communicating" liquid column.

Remove heat where it is generated

But the Viennese researchers appear to have violated the familiar principle that says, "Where there is one body, there cannot be a second at the same time." The problem with piston compressors is the piston itself. It is exposed to a very high temperature while doing the last bit of its compression work, because the gas heats up greatly when compressed. This heat must be removed. "This is usually done with heat exchangers located on the outside of the cylinder. It would be better, of course, to remove the heat right where it is produced, at the piston face," says Adler. But a heat exchanger cannot be located simultaneously at the place where the piston is doing the work of compression, so this is not possible. Or it was not until now, for the use of ionic liquids has enabled the Linde engineers, through a special design, to remove the heat in the cylinder where it is generated. The result, an almost isothermal compression process, means that the team of inventors in Vienna has realized an old dream of the engineer's art: physically ideal, nearly 100 percent conversion of energy supplied into energy of compression. With a classical piston design, this goal can be achieved – in a purely theoretical way – only by stacking up an infinite number of infinitely small compression steps.



The ionic compressor, however, is real. Since July 2005, WienEnergie has been using this Linde technology to fuel its natural gas-powered fleet of rental cars. "Our system maintains a constant gas pressure of 250 bar while delivering 500 cubic meters of natural gas per hour," says Linde's lead project engineer Helmut Mayer. Two other units are currently being put through field tests as well.

Focus on hydrogen filling stations

But compression based on these novel liquids is not restricted to natural gas and hydrogen fueling stations. Speaking of possible uses for the technology, thermodynamic expert Adler paints a richer picture: "Our systems can replace piston compressors in many fields, for example the charging of airbags with compressed gases, the production of ethylene, and diecasting processes. These are applications where other types, such as screw, membrane and turbine compressors, have been dominant." Another huge advantage over many conventional designs will aid the acceptance of the ionic compressor: "It makes very little noise," says Adler. Anyone who has ever stood next to the air compressor

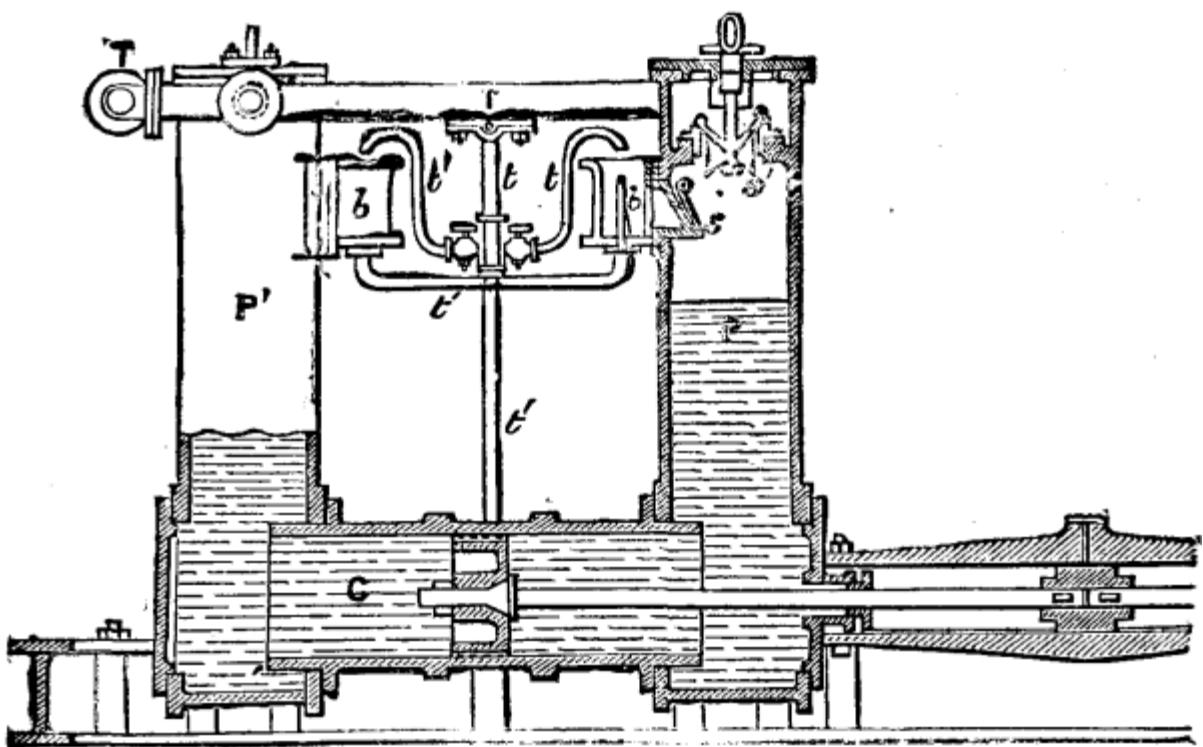
of a jackhammer will take his point immediately. For this reason if no other, it is not overly optimistic to forecast great success for the ionic compressor. **I**

Michael Kömpf, of Regensburg, is a freelance journalist specializing in research and technology. He has written for customer publications of major industrial firms and edits magazines in the Corporate Publishing division.

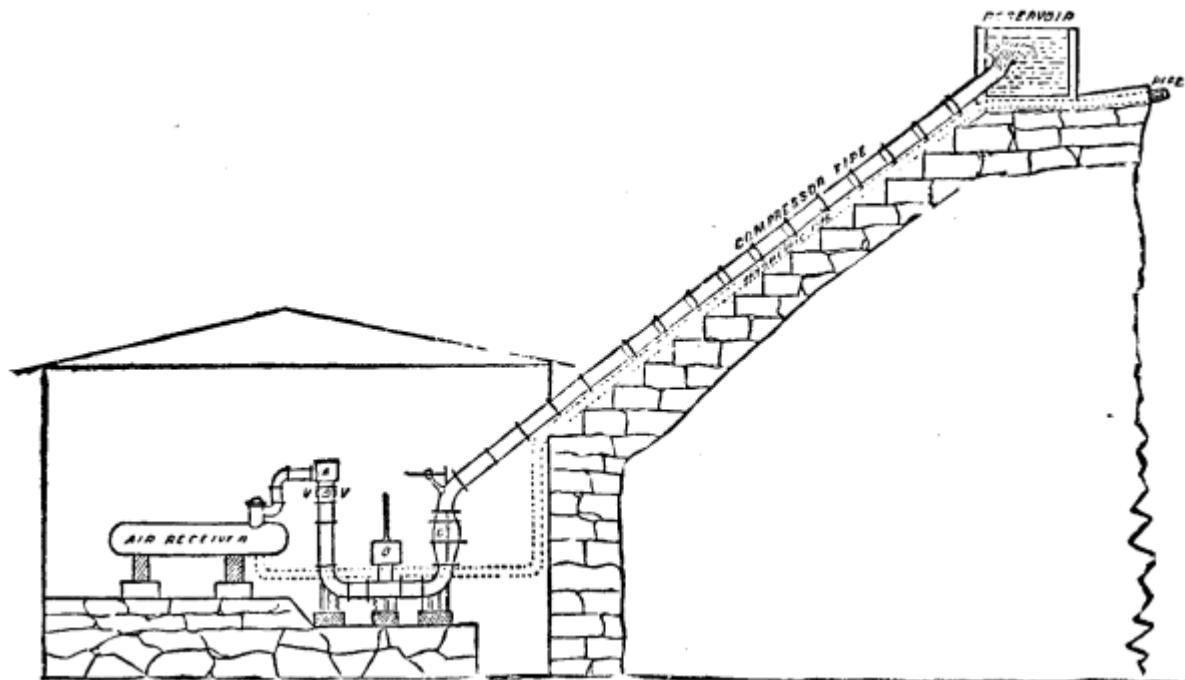
Links for further reading:

www.linde-gas.at
www.uni-oldenburg.de
www.organic-chemistry.org

Anhang II Early liquid piston compressors



Hydraulic carburettor compressor (Darlington)



Sommeiller-Colladon ram compressor for Mt.Cenis tunnel (1857)



Oct. 3, 1933.

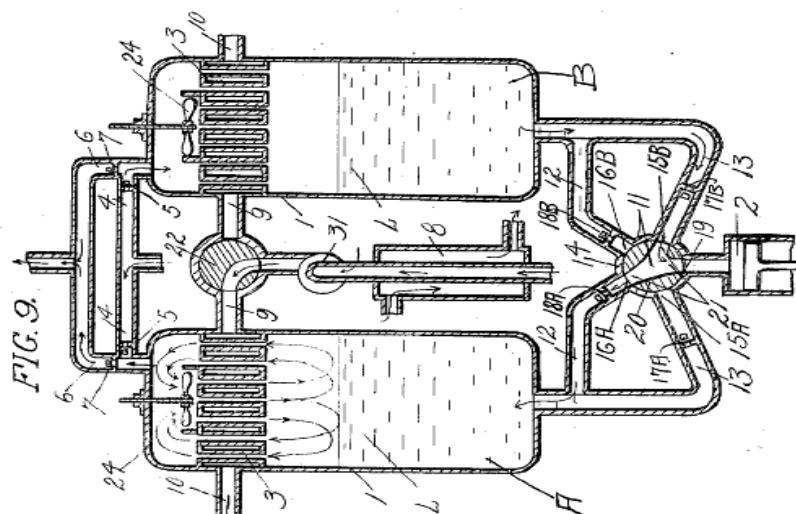
N. C. CHRISTENSEN

1,929,350

METHOD AND APPARATUS FOR COMPRESSING GASES

Filed April 8, 1930

3 Sheets-Sheet 3



Niels C. Christensen
INVENTOR.

(No Model)

W. H. KNIGHT.
AIR COMPRESSOR.

No. 586,100.

Patented July 13, 1897.

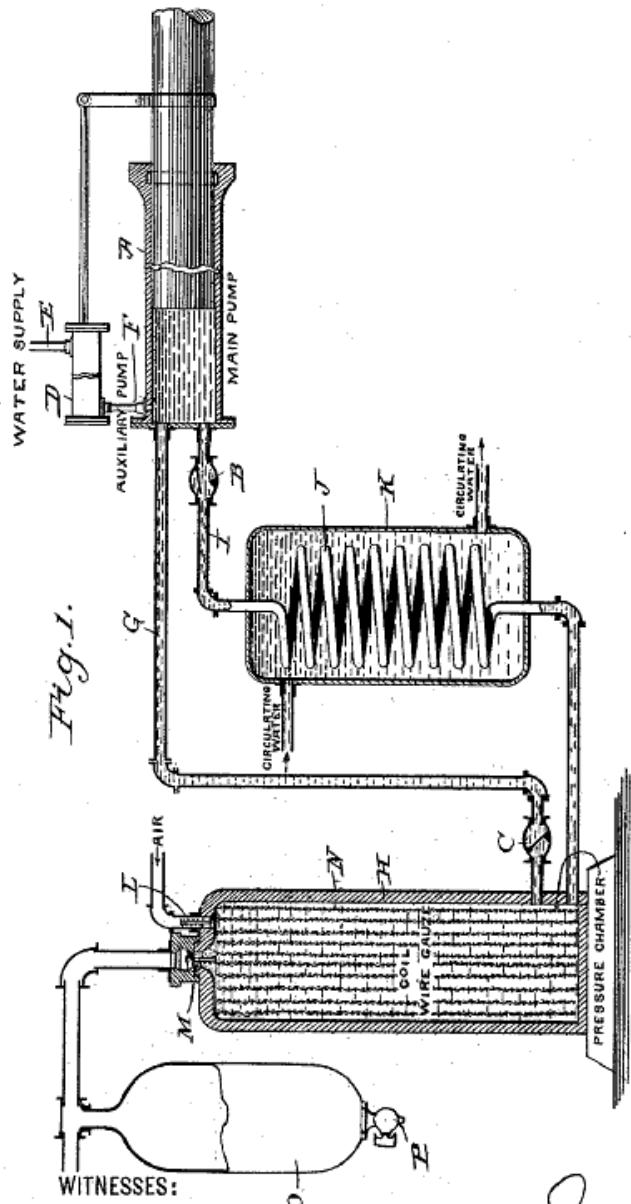


Fig. 1.

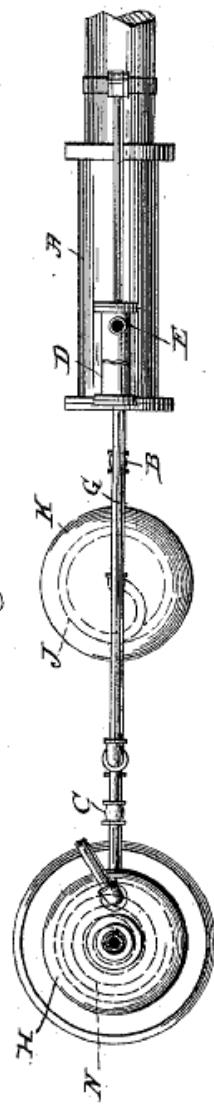


Fig. 2.

WITNESSES:
W. H. Pumphrey.
Dr. W. Bridgwood.

INVENTOR
Walter H. Knight
BY
Knight Bros
ATTORNEYS

Anhang III Bilder vom Versuchsaufbau



Fig. 2 Versuchsaufbau (Foto: Brückmann)



Fig. 3: Blick auf den Wärmetauscher durch das Loch für das Ausgangsventil (Foto: Brückmann)