



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](http://www.electricity-research.ch)

<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>3</b>
Zusammenfassung.....	4
Abstract.....	4
Résumé.....	4
<b>1 Kleine Inselanlagen .....</b>	<b>5</b>
A. Stromversorgungskonzepte für abgelegene Produktive Anwendungen.....	5
A.1. Bedarfsanalyse.....	5
A.2. Anlagenstruktur.....	8
A.3. Systemspannung.....	10
B. Die Problematik der Bleibatterie.....	10
C. Die Wunscheigenschaften des Energiespeichers.....	12
D. Vorschlag für einen Druckluft-Energiespeicher.....	12
D.1. Systemkomponenten.....	13
E. Entwicklungsstand der einzelnen Komponenten.....	15
<b>2 Grossanlagen.....</b>	<b>17</b>
A. Bedarfsanalyse.....	17
B. Vorschlag für einen Druckluft-Energiespeicher.....	17
C. Entwicklungsbedarf.....	18
D. Vergleich mit einem anderen Speicherkonzept .....	19
<b>3 Übersicht der physikalischen Grundlagen.....</b>	<b>21</b>
A. Druckluft als Energieträger .....	21
B. BOP-A und BOP-B, zwei pneumatisch-Ölhydraulische Systeme .....	22
C. Thermodynamik.....	24
C.1. Adiabatische und isotherme Prozesse.....	24
C.2. Einige Formeln der Thermodynamik.....	27
C.3. Mechanische und thermische Energie.....	28
C.4. Adiabatischer und polytroper Betrieb.....	29
D. BOP-A und BOP-B: Formeln und Funktionen.....	30
D.1. Der Druck im Speichersystem BOP-A.....	30
D.2. Der Druck im Speichersystem BOP-B.....	32
D.3. Thermodynamischer Wirkungsgrad bei BOP-A.....	34
D.4. Thermodynamischer Wirkungsgrad bei BOP-B.....	35
D.5. Verluste in Rohrleitungen.....	37
<b>REFERENZEN .....</b>	<b>39</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Ohne Speicherung sind Inselnetze mit erneuerbaren Energien nicht denkbar, da der Verbrauch kaum je mit dem Leistungsangebot übereinstimmt. Mit Hilfe einer Darstellung von bestehenden Inselanlagen im kW-Bereich mit produktiven Anwendungen in der Landwirtschaft wird in diesem Bericht die Problematik und das Umfeld der Speichertechnik festgehalten, eine Bedarfsanalyse erstellt und verschiedene Lösungsvarianten samt zugehörigen Komponenten und Netzarten (230 V Wechselstrom, 24 & 315 V Gleichstrom) beschrieben. Dies führt zu einer Liste von Wunscheigenschaften für Energiespeicher, die als Basis für die Bewertung von Druckluft-Energiespeichern (BOP: Batterien m. Ölhydraulik und Pneumatik) dienen und in dieser Ausarbeitung eingehend untersucht werden, insbesondere durch die Beschreibung der einzelnen Elemente, deren Verkettung das Speichersystem definiert und deren Betriebsverhalten bis zu Grossanlagen hin interpoliert werden kann (Netzpufferung im MW-Bereich).

Ausgehend vom Entwicklungsstand und Marktreife der Verschiedenen Komponenten werden die zwei grundsätzlichen Druckluftspeichervarianten (BOP-A mit Flüssigkeitsverdrängung im eigentlichen Speichervolumen und BOP-B mit vom Speichervolumen entkoppelter Verdichtung/Entspannung) anschliessend formelmässig dargestellt, und zwar ebenso in den Hauptparameter (spezifische Energiedichten, Wirkungsgrade usw.) wie im thermodynamischen Prozess und dessen Einfluss auf die Dimensionierung. Die hiermit gewonnen Einsichten bilden solide technische Grundlagen als Orientierungshilfe für die anstehenden Diskussionen in der hochaktuellen Speicherproblematik, die in Verbindung mit den neuen Konzepten der Energienetze steht.

## RESUME

Les réseaux autonomes ne peuvent sauf exception fonctionner sans stockage, car la consommation est en déphasage avec la génération. Cette présentation cerne le problème au moyen de descriptions documentées d'installations autonomes productives génératrices de revenus agricoles et laitiers de quelques kW, ce qui permet une analyse précise des besoins et une définition détaillée des éléments impliqués et des formes d'énergie opérationnelles (230 V CA, 24 & 315 V CC). Ceci permet aussi d'établir une liste de caractéristiques utiles pour les systèmes de stockage qui peut être directement utilisée pour l'évaluation des batteries pneumatiques (BOP = Batteries Oléo-Pneumatiques) et de procéder à une projection de cette technologie vers les grandes puissances (maintien de qualité de réseaux de plusieurs MW).

En se basant sur la présence sur le marché et de d'éléments directement adaptables aux besoins de cette technologie et leur état de développement, une description des deux systèmes en présence est effectuée (BOP-A avec compression/expansion dans le volume même de stockage, BOP-B avec la thermodynamique externe) au moyen de formules dérivées des principes physiques de la thermodynamique, ce qui permet de quantifier les paramètres de référence tels que rendements, énergies spécifiques etc. Ces données permettent d'insérer la technologie des BOP dans les rondes de discussions très actuelles et qui redoublent d'intensité concernant les possibilités de stockage et les philosophies des réseaux de distribution d'énergie.

## ABSTRACT

Stand-alone grids need storage systems, as consumption and generation usually do not fit in time and magnitude; this paper shows typical rural revenue-generating dairy applications in the multi-kW-range: this allows for a detailed analysis of the lay-out, and also of the needed elements and of the types of voltages involved (230 V AC, 24 and 315 V DC), but also of the characteristics of the storage system. A list of wishful storage qualities is extracted from these experiences and used to evaluate a possible pneumatic substitute to the lead-acid battery (BOP = Batteries w. Oilhydraulics and Pneumatics) and to imagine an extension towards a higher power range (like grid quality enhancement in the MW-range).

According to the state-of-the-art and the commercial availability of components which would be inserted in this storage chain, an overview of the two existing systems (BOP-A with compression/expansion directly in the storage vessel volume and BOP-B with external thermodynamics) is presented with formulae and graphics yielding main parameters (efficiency, specific energies etc) and sizing basics. This data compilation also helps to insert BOP technologies in the latest storage debate, where future distribution technology is at stake.

# 1 KLEINE INSELANLAGEN (Druckluft-Speichersystem als Ersatz für Bleibatterien)

## A. Stromversorgungs-Konzept für abgelegene produktive Anwendungen (1)

### A.1. Bedarfsanalyse

Grundlage für die folgende Bedarfsanalyse ist eine kleine Farm (Familienbetrieb) oder eine Dorfgemeinschaft, wie es sie zu Tausenden in Entwicklungsländern gibt. Die inzwischen bald 12-jährigen Erfahrungen mit der Elektrifizierung von abgelegenen Alpbetrieben bilden dazu eine ideale Ausgangsbasis. Die folgenden Bilder zeigen einige solche Anlagen.

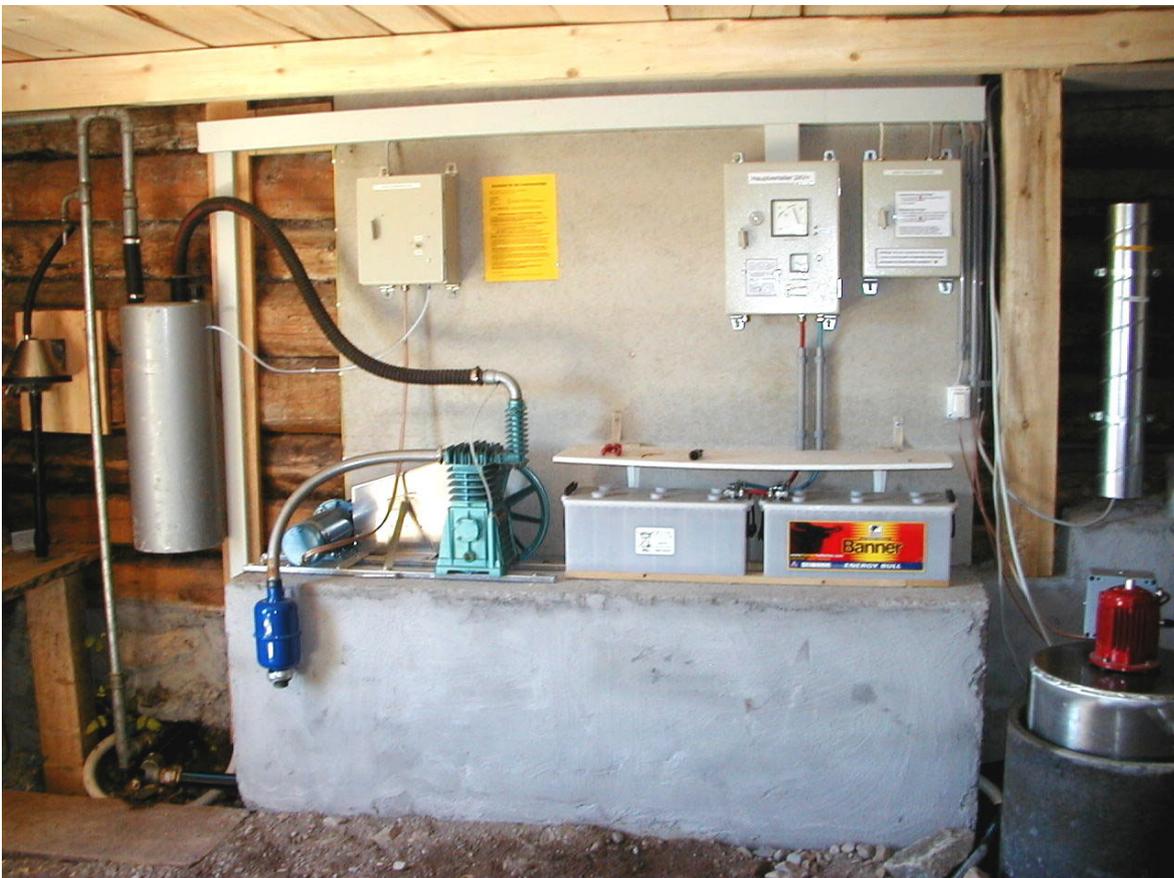


Abb. 1: Kleinanlage mit Wasserturbine und Vakuumpumpe für Melkmaschine (Kummeralp Davos, 18 Kühe)



Abb. 2: Melkmaschine 24V DC auf der Mastrilser Alp. Damit werden 100 Kühe täglich zweimal gemolken

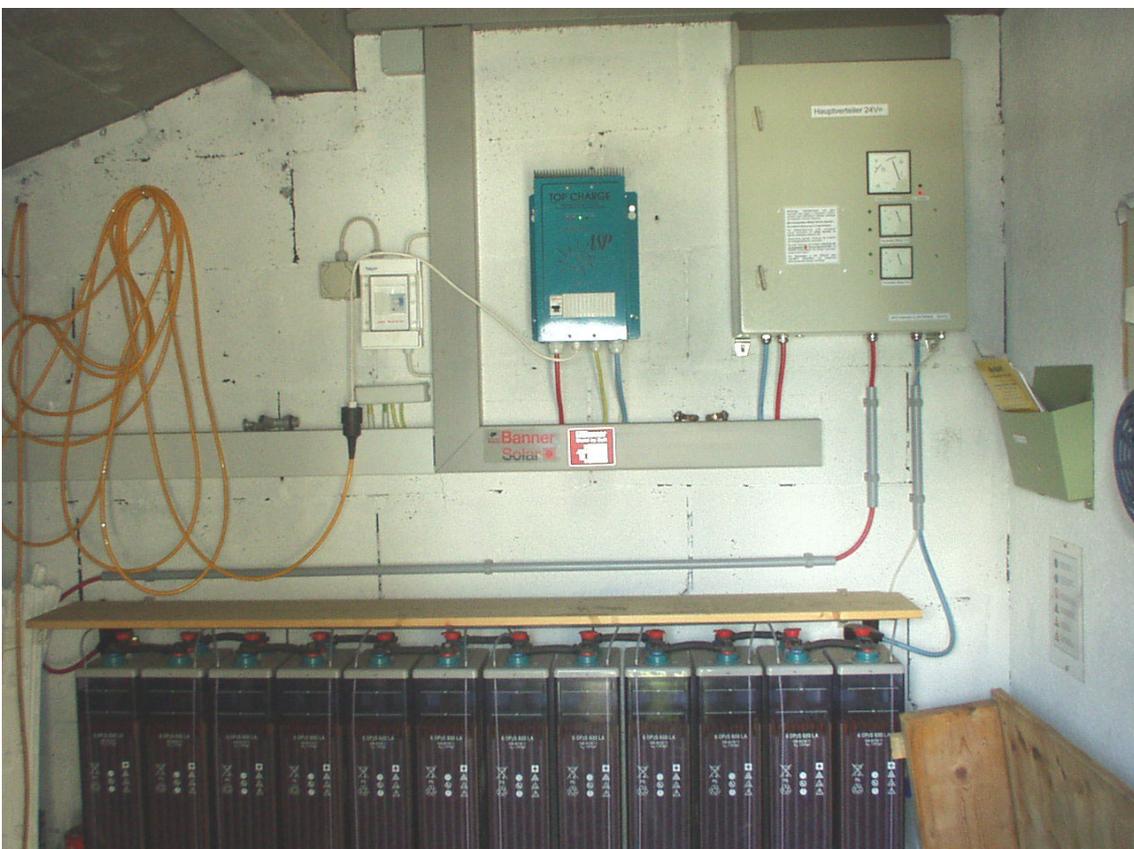


Abb. 3: Elektrozentrale der Mastrilser Alp. Die Batterien werden durch Solargeneratoren (2kW) geladen.



Abb. 4: Butterfass 24V DC auf der Mastrilser Alp

Wenn der Strom vor Ort erzeugt werden muss, wird man aus ökonomischen Gründen nur diejenigen Geräte mit Elektrizität betreiben, welche man nicht sinnvoll mit anderen Energieträgern versorgen kann. Vor allem Wärme wird man wenn immer möglich mit geeigneten Brennstoffen oder thermischen Sonnenkollektoren erzeugen und nicht mit Elektrizität. Andererseits soll aber die Stromversorgung so leistungsfähig sein, dass damit die Produktivität eines Unternehmens gegenüber der reinen Handarbeit signifikant gesteigert werden kann.

Unter diesen Voraussetzungen muss die Stromversorgung je nach Situation folgende Einrichtungen speisen:

<b>Anwendung</b>	<b>Leistungsbedarf</b>	<b>typ. tägl. Bedarf</b>
Beleuchtung	10...200W	240Wh
Elektrozaengerät	5W	120Wh
Melkmaschine (Eimeranlage mit 5 Aggregaten)	1200W Spitze, 400W im Mittel	300...1500Wh
Getreidemühle	1200W	1500Wh
Butterfass	700W	400Wh
Kühlung	50...1500W	
Rührwerk	30...70W	60Wh
Bügeleisen	800W max., 150W mittel	1200Wh in 8h
Küchengeräte	50...1000W	
Landwirtschaftliche Werkstatt	...1000W	

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, genügt bei häuslichem Einsatz der verschiedenen Anwendungen eine Spitzenleistung von etwa **2 kW**, um einen Familien-Produktionsbetrieb sinnvoll zu elektrifizieren. Die einzelnen Verbraucher weisen dabei alle Leistungen unter 1.5kW auf. Der Energieverbrauch solcher Anlagen bewegt sich zwischen 100Wh/Tag und 10kWh pro Tag, je nach dem, was alles betrieben werden muss. Entscheidend für den Erfolg dieses Energiekonzeptes ist eine Anlagestruktur, welche es zulässt, dass aus einer kleinen Anlage einmal eine grosse wird, ohne dass ein eigentlicher Systemwechsel vollzogen und alles Bisherige abgebrochen werden muss.

## A.2. Anlagenstruktur

Für den Aufbau eines solchen lokalen Stromversorgungsnetzes gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten:

- reines Wechselspannungsnetz (typisch 230V / 50Hz)
- reines Gleichspannungsnetz (typisch 12V oder 24V)
- eine Kombination von beiden

Allen Varianten gemeinsam ist die Notwendigkeit eines Energiespeichers. Bei der Verwendung alternativer Energiequellen ist es fast immer so, dass der Verbrauch und die Produktion von Strom zeitlich auseinander fallen.

Als Stromquellen für die Ladung des Speichers kommen vor allem Solargeneratoren, Windgeneratoren oder kleine Wasserturbinen in Frage. Falls sowieso ein Dieselmotor vorhanden ist, kann auch dieser während der Laufzeit zur Ladung herbeigezogen werden. Alle diese Quellen lassen sich bei geeigneter Anlagestruktur beliebig kombinieren.

### **Wechselspannungsnetz**

Da Wechselstrom nicht ohne weiteres direkt speicherbar ist, braucht auch diese Variante in der Regel einen Gleichstrom-Kreis mit Speicher. Für die Umwandlung des gespeicherten Gleichstromes in Wechselstrom benötigt man einen so genannten Wechselrichter (**2**). Die heute verfügbaren Wechselrichter weisen Wirkungsgrade von über 90% und Leerlaufverluste von typ. 0.6% der Nennleistung auf, sind also um einiges besser als noch vor einigen Jahren.

Grundsätzlich ermöglicht die Drucklufttechnik auch die direkte Speicherung von Wechselstrom (siehe Kapitel 2b). Dazu müsste allerdings eine Synchronmaschine 24h pro Tag bei voller Drehzahl arbeiten, was bei 2kW Nennleistung einen Leerlaufverlust von ca. 150W bzw. 3.6kWh täglich ergibt. Zudem müsste in diesem Fall Strom aus Solargeneratoren erst in Wechselstrom umgewandelt werden.

Die wichtigsten Vorteile dieser Variante sind:

- + normale Haushaltgeräte und Installationsmaterialien können verwendet werden, was eine grosse Auswahl bei relativ geringen Kosten mit sich bringt
- + die Leitungsverluste in der Installation sind vernachlässigbar klein

Diesen Vorteilen stehen aber einige gewichtige Nachteile gegenüber:

- Wechselrichter gehören vor allem in warmen Ländern nicht zu den zuverlässigen Bauteilen. Die Erfahrung zeigt, dass viele Wechselrichter den Anforderungen auf die Dauer nicht gewachsen sind. Insbesondere die hohen Rippelströme auf der Gleichstromseite sowie hohe Umgebungstemperaturen stellen ein Problem dar
- bei Ausfall des Wechselrichters steht alles still!
- gute Wechselrichter sind teuer und ein Ersatz ist nicht immer schnell auftreibbar
- die Spitzenleistung ist durch den Wechselrichter begrenzt

- Einphasen-Wechselstrommotoren unter 1.5kW haben oft einen sehr schlechten Wirkungsgrad (oft unter 50%)
- 230V Wechselspannung ist bei Berührung lebensgefährlich. Diese Tatsache ist bei korrekter Installation kein Problem, in Entwicklungsländern aber stellt das ein nicht unbeträchtliches Unfallrisiko dar

### **Gleichstromnetz**

Für kleine Produktionsbetriebe stellen Gleichstrom-Netze eine durchaus sinnvolle Alternative dar. Diese erlauben eine sehr kostengünstige, zuverlässige und energieeffiziente Elektrifizierung.

Das Herz einer solchen Anlage ist der Energiespeicher, heute typisch eine Bleibatterie, welche quasi den Sammeltopf für den Strom darstellt. Der Speicher ist mit einem Reservoir in einer Trinkwasserversorgung vergleichbar. Wird mehr Strom erzeugt als gerade verbraucht wird, wird die Batterie geladen und umgekehrt.

Der Energiespeicher stellt eine sehr niederohmige Spannungsquelle bzw. -senke dar, welche kurzzeitig sehr hohe Leistungsspitzen abgeben bzw. aufnehmen kann.

An den Energiespeicher werden alle Erzeuger- und Verbrauchergruppen sternförmig und über Überstromsicherungen angeschlossen. Die Erzeuger müssen dabei so ausgestaltet sein, dass eine Überladung des Speichers ausgeschlossen wird (Laderegler). Die Verbraucher müssen so ausgelegt sein, dass sie im Bereich der üblicherweise auftretenden Speicherspannung einwandfrei arbeiten. Bei einer 24V-Bleibatterie liegt dieser Bereich zwischen 21 und 30V.

Diese Anlagestruktur weist folgende Vorteile auf:

- + keine gefährlichen Spannungen, somit keine Gefahr beim Berühren von elektrischen Leitern (siehe unter "Systemspannung")
- + Antriebe und Beleuchtungen mit sehr gutem Wirkungsgrad sind realisierbar
- + Motoren lassen sich mit relativ geringem Aufwand effizient regulieren
- + Leistungsspitzen (z .B. Anlaufströme) stellen kein Problem dar
- + sehr hohe System-Zuverlässigkeit, da das "Nadelöhr" Wechselrichter entfällt

Wie überall weist aber auch diese Lösung gewisse Nachteile auf:

- weitläufige Installationen hoher Leistung sind wegen der Leitungsverluste nicht möglich
- solange es noch keine Massenproduktion gibt, sind die Geräte teurer, prinzipiell müssen die Geräte jedoch nicht teurer sein, im Gegenteil: viele Anwendungen des täglichen Gebrauches lassen sich prinzipiell günstiger für Kleinspannung herstellen, da an die Isolation nicht so hohe Anforderungen gestellt werden müssen.

### **Kombination von Gleich- und Wechselstrom**

Oft ist eine Kombination von beiden Netzarten die beste Lösung. So hat sich auf Alpbetrieben das Konzept bewährt, dass alle wichtigen Alpperäte und Antriebe sowie die Beleuchtung direkt ab 24V betrieben werden, während der Wechselrichter ausschliesslich Haushalt- und Komfort-Geräte versorgt. Auf diese Weise genügt in der Regel ein relativ kleiner Wechselrichter (1-2kW).

Für Wechselspannungsgeräte mit Schaltnetzteil am Eingang (fast alle Sparlampen, Computer, Fax, Telefone, TV, Video, DVD etc.) gibt es zudem eine weitere, sehr interessante Lösung. Da diese alle am Eingang einen Gleichrichter aufweisen, lassen sie sich nämlich sowohl mit 230V Wechselspannung als auch mit ca. 300V Gleichspannung betreiben. Dazu gibt es spezielle, kleine Wandler mit hohem Wirkungsgrad (MINIBATNET), welche die Batteriespannung auf 300VDC umsetzen. Mit diesen lassen sich sehr kostengünstig handelsübliche 230V-Sparlampen betreiben und viele 230V-Geräte in Kleinspannungsgeräte umrüsten. Da diese Wandler mit sehr hoher Taktfrequenz arbeiten, fällt die bei Wechselrichtern übliche Belastung durch 100Hz-Rippelstrom weg. Mit dieser Lösung lassen sich die Nachteile von Niederspannungs-Gleichstromnetzen weitgehendst eliminieren (Reichweite, Verfügbarkeit von Verbrauchern usw.)**(3)**.

### A.3. Systemspannung

In batteriegestützten Stromversorgungen haben sich fast ausschliesslich 12V und 24V als Systemspannung durchgesetzt. Höhere Nennspannungen (36V und 48V) gibt es zwar vereinzelt, die Probleme des Lichtbogens beim Öffnen eines Schaltkontaktes unter Strom sind jedoch bei Spannungen über 32V derart schwierig zu beherrschen, dass sich diese hohen Batteriespannungen nicht breit durchgesetzt haben. Dazu sei nur erwähnt, dass die Lichtbogenspannung beim Elektroschweissen etwa bei 42V, also bei der Ladespannung einer 36V-Batterie, liegt.

Ansonsten gilt die Regel, dass ein für 230V AC dimensionierter Schalter bis 32V DC den Schalter-Nennstrom zuverlässig abschalten kann.

12V-Systeme sind zwar in kleinen Solaranlagen inzwischen weit verbreitet, sind jedoch für produktive Anwendungen völlig ungeeignet, da mit 12V der geforderte Leistungsbereich bis 1500W nicht sinnvoll realisiert werden kann. Das einzige Argument für 12V-Anlagen ist ein minimales Preisvorteil bei der Beschaffung kleiner Batterien. Die Erhältlichkeit billiger Verbraucher aus dem Campingbereich ist kein treffendes Argument, da deren Qualität oft so schlecht ist, dass sie für eine dauerhafte Anwendung nicht geeignet sind.

Somit bleibt eigentlich nur noch 24V als Systemspannung. Diese hat sich inzwischen in vielen Anlagen als durchaus tauglich bewährt. Insbesondere folgende Gründe sprechen für diese Wahl:

- 24V DC ist eine Industrie-Standardspannung. Somit sind sehr viele Geräte standardmässig erhältlich, vor allem im Bereich Automation und Antriebstechnik.
- Leistungen bis 1500W können mit normaler Installationstechnik realisiert werden (63A)
- der Abschalt-Lichtbogen ist bei normalen 230V AC-Schaltern noch kein Problem
- vier mal weniger Kupferverluste als bei 12V-Anlagen
- ausgedehnte Lichtinstallationen mit Sparlampen können in 1.5mm<sup>2</sup> ausgeführt werden, dem vorgeschriebenen Minimalquerschnitt in Hausinstallationen
- sehr viele Geräte sind in guter Qualität auf dem Solar-Markt (Lampen, Kühlschränke, Pumpen, Motoren, Wechselrichter etc.)

#### **Schlussfolgerung:**

**24V DC ist für die dezentrale Elektrifizierung die geeignetste Systemspannung**

### B. Die Problematik der Bleibatterie

Bis heute ist die Bleibatterie der einzige Energiespeicher, der in solaren Stromversorgungen eine weitere Verbreitung gefunden hat. Folgende Vorteile haben zu ihrer Verbreitung beigetragen:

- + relativ preiswert
- + niederohmiger Speicher, der kurzzeitig hohe Ströme zulässt
- + Leistungsfähigkeit und Speichervermögen stehen in einem sinnvollen Verhältnis zueinander (jedenfalls für Solaranlagen, nicht so für Fahrzeuge)
- + kompakt, keine beweglichen Teile
- + einfache Laderegelung durch Begrenzung der Ladespannung
- + relativ kleiner Arbeitsspannungsbereich (typisch 22V bis 29V für 24V-Batterie)
- + guter Ladungs-Wirkungsgrad (max. 95%), vernünftiger Energie-Wirkungsgrad (60-80%)
- + wartungsarm bzw. wartungsfrei (bei geschlossenen System)

Diesen günstigen Eigenschaften stehen aber leider eine Reihe von gravierenden Nachteilen gegenüber:

- ökologisch ist sie nur bei weitgehend vollständiger Rezyklierung verantwortbar
- der Energiebedarf für die Herstellung ist meist grösser als der Energieumschlag während der Lebensdauer, selbst bei Verwendung rezyklierter Rohstoffe **(4)**.
- die Lebensdauer ist in warmen Gegenden ist völlig ungenügend
- immer wieder Frühausfälle einzelner Zellen, dadurch schlechte Systemzuverlässigkeit
- es gibt keine wirklich brauchbare Ladezustandsanzeige
- rasche Schädigung durch Lagerung in nicht vollgeladenem Zustand (Sulfatierung)
- Schädigung durch Tiefentladungen
- Schädigung durch häufige Lade-Entlade-Wechsel mit hohem Strom
- Explosionsgefahr bei Überladung der Batterien (Knallgas)

Insbesondere die ersten drei Nachteile zeigen, wie dringend notwendig eine Alternative zur Bleibatterie ist. Tatsache ist, dass gerade in Entwicklungsländern nur ein sehr kleiner Teil der eingesetzten Batterien nach Ablauf ihrer meist sehr kurzen Lebensdauer wirklich rezykliert werden, die meisten landen auf irgend einer Deponie, wo sie sich selbst überlassen werden, bis sie dann irgendwann wieder in der Nahrungsmittelkette auftauchen **(5)**.

Bedenklich ist auch der hohe Energieeinsatz bei der Produktion. Die Herstellung einer Bleibatterie braucht gemäss einer Studie von Patrick Jourde bei 60% Recycling-Anteil etwa 6.2kWh pro kg Batteriegewicht. Für die Herstellung einer typischen Solarbatterie (12V / 90Ah / 32kg) braucht es also etwa 200kWh. Gemäss Herstellerangaben erreicht eine solche Batterie bei optimalen 20°C Umgebungstemperatur etwa 400 Zyklen bei 50% Ladungsentnahme. Das bedeutet also, dass insgesamt 216kWh umgeschlagen werden können, also in etwa so viel wie es zur Herstellung gebraucht hat. In der Praxis werden diese optimalen Werte jedoch nur selten erreicht, sei es weil die Temperatur höher ist oder andere betriebliche Umstände (z.B. längere Zeiten ohne Volladung oder hohe Entladeströme durch Wechselrichter) die Lebensdauer verkürzen. Dazu kommen immer wieder unerklärliche Frühausfälle einzelner Zellen, welche dann das frühzeitige Auswechseln eines ganzen Batteriesatzes erzwingen.

Wahrscheinlich der Hauptgrund für die steckengebliebene solare Elektrifizierung in vielen warmen Ländern ist jedoch der Umstand, dass die Bleibatterien ungeachtet der Betriebsweise bei hohen Temperaturen sehr schnell altern. Dabei gilt die bei vielen physikalischen Vorgängen zu beobachtende Gesetzmässigkeit, dass sich die Alterungsgeschwindigkeit mit jeder Erwärmung um 10°C verdoppelt. Das heisst, dass eine Batterie, welche bei 20°C eine durchaus akzeptable Lebensdauer von etwa 6 Jahren erreicht, bei 40°C gerade noch 1.5 Jahre alt wird. Das ist leider nicht nur Theorie, sondern wird durch viele Erfahrungen in warmen Ländern bestätigt.

Die Schädigung der Bleibatterie durch Tiefentladungen lässt sich durch übliche Tiefentlade-Schutzeinrichtungen kaum verhindern, da diese immer erst dann ansprechen, wenn die Batterie bereits tiefentladen ist. Bei falsch dimensionierten oder falsch betriebenen Anlagen kommt es aber immer wieder vor, dass die Batterien regelmässig bis zum Ansprechen des Tiefentladeschutzes entladen werden. Das führt zwangsläufig zu kurzen Lebensdauern.

Um eine Bleibatterie "gesund" zu betreiben, muss sie regelmässig immer wieder richtig vollgeladen werden und dann einige Stunden bei maximaler Ladespannung verweilen. Nur so wird eine allfällige Sulfatierung immer wieder abgebaut. Gerade bei Solaranlagen ist diese Bedingung kaum einzuhalten, sie kann eigentlich nur durch eine massive, und damit unwirtschaftliche Überdimensionierung des Solargenerators erreicht werden.

All diese Probleme machen deutlich, dass eine wirklich nachhaltige Energiewirtschaft in grösserem Stil nicht auf der Basis von Bleibatterien realisierbar ist. Die Suche nach einer alternativen Speichermöglichkeit ist daher eine sehr dringliche Aufgabe, ohne deren Lösung kein wirkliches Vorwärtkommen in der Technik der Alternativenenergien möglich ist. Insbesondere in den warmen Entwicklungsländern könnte durch eine taugliche, dezentrale Elektrifizierung ein grosser Beitrag für eine sinnvolle wirtschaftliche Entwicklung geleistet werden.

### C. Wunscheigenschaften des Energiespeichers

Im Folgenden sollen die Wunsch-Eigenschaften eines Energiespeichers für stationäre, dezentrale Stromversorgungen aufgelistet werden, und zwar etwa in der Rangordnung ihrer Gewichtung. Weniger wichtige Eigenschaften kommen demnach erst gegen Schluss der Liste.

#### Wunscheigenschaften:

- lange Lebensdauer und viele Lade-Entladezyklen
- oekologisch unbedenklich im Einsatz und beim Transport (möglichst wenig toxische Materialien, insbesondere Säuren)
- rezyklierbar
- hoher Lade-Entlade-Wirkungsgrad
- geringe Selbstentladung, geringe Standby-Verluste bei vorhandener Ausgangsspannung
- einfache und eindeutige Anzeige des Ladezustandes
- niederohmig, fähig hohe Impulsströme zu liefern und aufzunehmen
- ohne Schädigung lagerbar bei beliebigem Ladezustand
- wartungsarm
- erweiterbar ohne alles austauschen zu müssen
- kompatibel zu bisherigen Batterieanlagen
- einfach und anspruchslos in der Handhabung
- kostengünstig
- hohe Energiedichte

### D. Vorschlag für einen Druckluft-Energiespeicher

Der im Folgenden skizzierte Vorschlag soll aufzeigen, wie mit Hilfe von Druckluft ein Speicher realisiert werden könnte, der viele der oben genannten Wunscheigenschaften aufweist. Er basiert auf den Grundgesetzen der Gasdynamik und funktioniert im Wesentlichen so, dass die überschüssige Energie dazu benutzt wird, Luft aus der Umgebung in einen Druckbehälter zu pumpen. Mit der so erzeugten Druckluft kann dann bei Bedarf wieder Strom erzeugt werden. Damit dieses an sich einfache Prinzip auch wirtschaftlich realisiert werden kann, müssen aber zwei Bedingungen eingehalten werden:

1. Die Luft muss weitgehend isotherm komprimiert und expandiert werden. Das bedeutet, dass die bei der Kompression entstehende, adiabatische Erwärmung der Luft während dem Kompressionsvorgang möglichst vollständig an die Umwelt abgeführt wird. Umgekehrt muss während der Expansion wieder Wärme aus der Umwelt zugeführt werden, um die adiabatische Abkühlung möglichst klein zu halten. Physikalisch lässt sich nämlich zeigen, dass die ganze Energie, die man in den Speicher pumpt, in Form von Wärme an die Umwelt abgegeben wird. In der Druckluft selbst steckt also gar keine Energie (ähnlich wie bei einem Pumpspeicherwerk, bei dem im hoch gepumpten Wasser selbst auch keine Energie steckt). Grundsätzlich gilt dabei: je näher die Lufttemperaturen während der Kompression und während der Expansion zusammenliegen, desto besser ist der Lade-Entlade-Wirkungsgrad des Speichers.

2. Die eingesetzten Maschinenelemente müssen so ausgebildet sein, dass der Energiefluss in beide Richtungen möglich ist. So arbeitet z.B. die Elektromaschine beim Laden als Motor und beim Entladen als Generator.

Aufgrund der vorangehenden Bedarfsanalyse ergeben sich folgende **Eckdaten** für den Speicher:

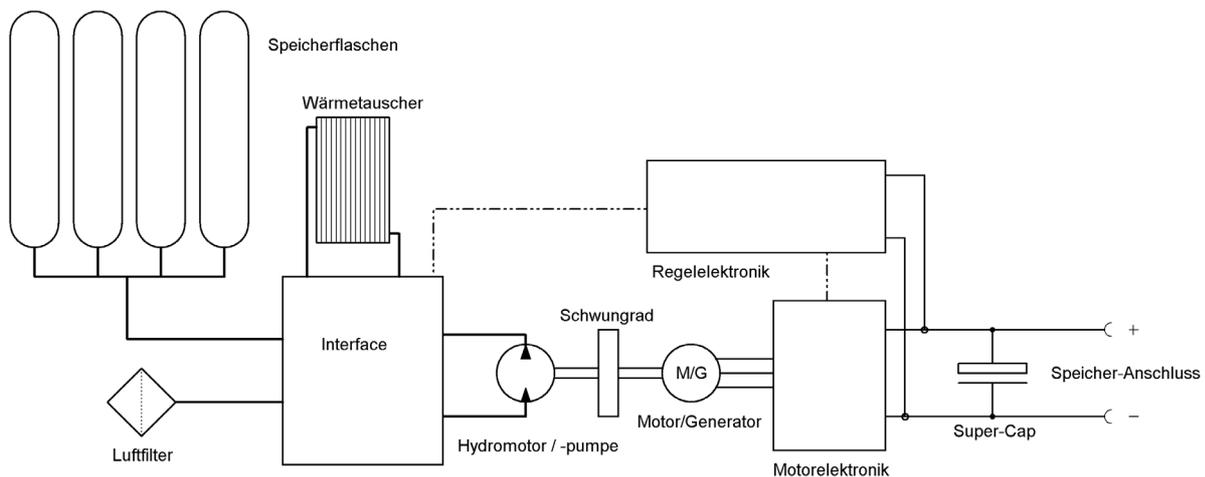
Nennspannung	24V DC
zulässiger Spannungsbereich	23...29V DC
Maximale Dauerleistung:	1.5kW elektrisch
Spitzenleistung:	2kW elektrisch während 10min

Speicherkapazität:	10kWh elektrisch, ca 13kWh pneumatisch
Speicherdruck (leer...voll):	50...250bar
Speichervolumen	ca. 400 Liter

### D.1. Systemkomponenten

Der Energiespeicher besteht aus folgenden Baugruppen (siehe Prinzipschema):

- Super-Cap-Kondensatorbatterie parallel zu den Eingangsklemmen als Kurzzeitspeicher und zum Abdecken von Leistungsspitzen
- bürstenloser Motor-Generator (Motgen) mit dazugehöriger Leistungselektronik
- Schwungrad zum Glätten der Leistungsschwankungen
- Hydropumpe bzw.-Motor zur Umwandlung von hydraulischer zu rotierender Leistung
- Interface Luft-Hydraulik, ein Flüssigkolben-Kompressor bzw.-Motor (Typ BOP-B)
- Wärmetauscher zur thermischen Ankopplung an die Umwelt
- Speicherflaschen
- Regelelektronik



#### Super-Cap-Kondensatorbatterie

Ein Paket von 12 in Serie geschalteten Super-Kondensatoren von je 5000F Kapazität ergeben zusammen eine Kapazität mit 416F mit einem Energiespeichervermögen von 16.6Wh bei einer Entladung von 29V auf 23V. Dieser Spannungsbereich entspricht dem Betriebsspannungsbereich einer 24V-Bleibatterie.

Eine aktive Ausgleichsschaltung über allen Kondensatoren verhindert dabei Spannungsunterschiede über den einzelnen Kondensatoren, welche für eine Nennspannung von 2.5V ausgelegt sind.

Die ganze Kapazität hat ein Gewicht von ca. 10kg und ein Volumen von ca. 18 Liter.

Dieser Pufferkondensator erfüllt verschiedene Aufgaben:

- er stellt die gewünschte Impulsbelastbarkeit zur Verfügung
- er gewährt den gewünschten kleinen Innenwiderstand des Speichers ( $3m\Omega$ )
- er dient als Kurzzeit-Speicher, um die stark schwankende Leistungsaufnahme bzw. -abgabe des Interfaces auszugleichen

- er dient dem Spannungserhalt im Ruhezustand oder bei ganz kleinen Lastströmen (stand by). Bei einem Verbrauch von z.B. lediglich 20W muss der Kondensator nur alle 45min einmal nachgeladen werden (was etwa 1min dauert).

Die Entwicklung der Super-Caps ist noch voll im Gange und es kann sein, dass es schon bald ohne grosse Mehrkosten möglich sein wird, mit grösseren Kapazitäten den Wirkungsgrad zu verbessern und den Spannungshub zu verkleinern.

#### *Motor-Generator (Motgen) mit Leistungselektronik*

Der Motor-Generator ist als bürstenloser DC-Motor mit rotierenden Permanentmagneten gebaut. Solche Motoren in dieser Leistungsklasse (bis 2kW) gibt es bereits für verschiedene Zwecke, für die Speicheranwendung ist jedoch eine weitere Wirkungsgradoptimierung angesagt. Dabei geht es vor allem darum, die Ummagnetisierungsverluste durch den Einsatz von Metallpulverkernen oder durch eisenlose Stator Konstruktionen zu minimieren.

Ein solcher Motor kann nur mit einer passenden Leistungselektronik betrieben werden, da ja die Kommutierung durch Halbleiter erfolgt. Die Steuerung der Kommutierung kann dabei entweder durch im Motor integrierte Hallsonden oder durch einen Rechenalgorithmus erfolgen. Im letzteren Fall ist ein digitaler Signalprozessor erforderlich.

Auch bei der Elektronik sind höchste Wirkungsgrade anzustreben. Dank sehr niederohmiger MOSFet-Transistoren ist das heute auch im 24V-Bereich möglich. Am besten ist der Wirkungsgrad immer dann, wenn der Motor voll angesteuert betrieben werden kann, also im sogenannten Vollblock-Betrieb arbeitet. Dann sind die Schaltverluste minimal.

Der Energiefluss in der Motorelektronik wird durch eine übergeordnete Regelelektronik gesteuert.

#### *Schwungrad*

Physikalisch bedingt sind die hydraulischen Abgabe- und Aufnahmeleistungen des BOP-B-Interfaces starken Schwankungen innerhalb eines Arbeitszyklus unterworfen. Bei einer mittleren Leistung von 2kW liegt die hydraulische Spitzenleistung kurzzeitig bei etwa 10kW. Um diese Leistungsspitzen aufzufangen, ist auf der Motgen-Welle ein etwa 10kg schweres Schwungrad angebracht. Somit muss der Motgen nicht für die Spitzenleistung, sondern nur für die mittlere Leistung ausgelegt werden.

#### *Hydromotor*

Der Hydromotor, der beim Laden auch als Pumpe arbeitet, ist als Axialkolbenpumpe mit fixer Verdrängung ausgebildet. Diese Maschinen erreichen Wirkungsgrade von über 92%<sup>(6)</sup>, vorausgesetzt, sie werden in der Nähe der Nennleistung betrieben. Geeignete Hydromotoren sind bereits auf dem Markt erhältlich, jedoch sind diese vor allem bezüglich Lagerverluste noch nicht auf diese Anwendung optimiert. Um die Leerlaufverluste so klein wie möglich zu halten, wird der Hydromotor wenn immer möglich bei Nennleistung betrieben. Bei Teillast wird der ganze rotierende Teil also periodisch ein- und ausgeschaltet, wobei die kinetische Energie beim Abbremsen jeweils zum Pumpen oder zum Laden des Super-Caps verwendet wird.

#### *Interface*

Das Interface ist das eigentliche Herzstück der Anlage. Darin wird mit Hilfe von je zwei im Gegentakt arbeitenden Flüssigkolben die Luft in zwei Stufen annähernd isotherm verdichtet (beim Laden) bzw. expandiert (beim Entladen). Die Zylinder sind dabei so gebaut, dass die adiabatische Erwärmung bzw. Abkühlung bei jedem Zyklus an die Verdränger-Flüssigkeit abgegeben wird. Da der Wärmeaustausch Zeit braucht, ist das Interface zwangsläufig eine relativ langsam arbeitende und grossvolumige Maschine. Ein Halbzyklus dauert dabei etwa 3s und die Zylindervolumina betragen etwa zwei mal 0.36 Liter im Hochdruckteil bzw. 5.4 Liter im Niederdruckteil.

### *Wärmetauscher*

Da die abzuführende bzw. aufzunehmende Wärmeleistung praktisch identisch ist mit der momentanen mechanischen Eingangs- bzw. Ausgangsleistung, muss in diesem Beispiel der Wärmetauscher so dimensioniert sein, dass er etwa 2kW Wärmeleistung bei einem Temperaturunterschied von ca. 20°C an die Umwelt abgeben kann. Nötigenfalls wird der Wärmewiderstand durch das Zuschalten eines Ventilators verkleinert.

### *Speicherflaschen*

Als Speicherflaschen kommen handelsübliche Gasflaschen aus Stahl zum Einsatz. So kann der hier beschriebene 10kW-Speicher aus 4 Flaschen zu je 100 L aufgebaut werden. Bei Bedarf kann der Speicher jederzeit durch das Hinzufügen weiterer Flaschen vergrößert werden. Dies ist z.B. dann nötig, wenn bei einer solaren Stromversorgung längere Schlechtwetterperioden überbrückt werden sollen. Ein einfaches Manometer an den Speicherflaschen ermöglicht jederzeit eine exakte Anzeige des aktuellen Speicherstandes.

### *Regelelektronik*

Die Regelelektronik hat die Aufgabe, möglichst energieeffizient die Ausgangsspannung innerhalb der zulässigen Grenzen von 23 bis 29V zu halten. Dies geschieht dadurch, dass bei Bedarf immer ein oder mehrere Vollzyklen ent- oder geladen werden. Beim Entladen muss die Regelung das Einlassventil in Abhängigkeit des aktuellen Speicherdruckes so schliessen, dass nach vollständiger Entspannung gerade Umgebungsdruck erreicht ist.

Das Interface, der Hydromotor mit Schwungrad und Motgen, die Regelelektronik mit Super-Caps und der Wärmetauscher sind zu einer Einheit zusammengebaut, welche ein Volumen von etwa 150Liter beansprucht und etwa 80kg schwer ist. Somit kann diese Einheit relativ problemlos aufgestellt werden. Die eigentlichen Speicherflaschen können dabei in einiger Entfernung vom Interface aufgestellt werden.

## **E. Entwicklungsstand der einzelnen Komponenten**

Für diese spezielle Anwendung müssen verschiedene Komponenten noch weiterentwickelt werden. Stichwortartig soll deshalb der Entwicklungsstand bzw. -bedarf der Einzelnen Komponenten aufgelistet werden:

### *Super-Cap-Kondensatorbatterie*

Hier gilt es vorerst, die immer noch schnelle technische Weiterentwicklung dieser Komponenten genau zu beobachten und dementsprechend die Kondensatorbatterie anzupassen. Zu hoffen ist insbesondere auf günstigere Preise, was aber absehbar ist. Schaltungen für den Ladungs-Ausgleich der einzelnen Kondensatoren wurden an der ETH Lausanne bereits entwickelt und erprobt. Leider liegen bis heute noch keine Langzeiterfahrungen mit Super-Caps in warmen Ländern vor.

### *bürstenloser Motor-Generator (Motgen)*

Beim Motgen ist noch ein hoher Entwicklungsbedarf in Richtung besserer Wirkungsgrad über einen möglichst grossen Leistungsbereich vorhanden.

Die Leistungselektronik für den Motor muss ebenfalls für diese spezielle Anwendung weiterentwickelt werden. Es gibt bereits Motorsteuerungen für den angestrebten Strom- und Spannungsbereich, im Bereich der Ansteuerung muss aber noch weiterentwickelt werden. Auch hier ist ein grösstmöglicher Wirkungsgrad bei hoher Lebensdauer anzustreben.

### *Hydropumpe bzw.-motor (Hydroeinheit)*

Hier geht es vor allem um eine Reduktion der Lagerverluste, was durch eine andere, nicht so kompakte Bauform möglich ist.

### *Interface Luft-Hydraulik (BOP-B)*

Dieses Bauteil besteht erst auf dem Papier. Wie aus dem Rest des Berichtes ersichtlich ist, liegt im diesem Bauteil der Löwenanteil der noch zu leistenden Entwicklungsarbeit.

### *Speicherflaschen*

Da marktübliche Speicherflaschen eine hohe Sicherheitsreserve aufweisen müssen (Erhitzung der Flaschen unter Druck), kann für die reine Speicheranwendung bei einer gegebenen Flasche mit höherem Druck als dem Zulassungsdruck gearbeitet werden. Da die Flaschen einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten für den Speicher ausmachen, ist hier in erster Linie eine Kostenreduktion als Entwicklungsziel angesagt.

### *Regelelektronik*

Bei der Regelung wird es in erster Linie darum gehen, möglichst energieeffiziente Regelverfahren für das Gesamtsystem zu entwickeln. Diesbezügliche Optimierungen sind durch die ETH Lausanne bereits in Angriff genommen worden. Ist ein Prototyp der Hardware einmal vorhanden, so lassen sich mit heute erhältlichen SPS-Komponenten relativ rasch verschiedene Regelverfahren ausprobieren. Zuvor müssen jedoch geeignete Regelstrategien entworfen werden.

## 2 GROSSANLAGEN

### Druckluft-Speichersystem für die Netzpufferung

#### A. Bedarfsanalyse

Verschiedene Entwicklungen der letzten Jahre haben dazu beigetragen, dass unsere Stromversorgungsnetze tendenziell instabiler geworden sind:

- zunehmend höhere Spitzenbelastungen (z.B. Airkondition an heißen Tagen)
- hohe Belastung der "Stromautobahnen" durch den freien Strommarkt
- Zunahme der stochastischen Energie durch Windkraftwerke und Solaranlagen
- minimierte Unterhaltsaufwendungen an den Verteilanlagen als Folge des liberalisierten Strommarktes

In einem Wechselstromnetz muss die erzeugte Energie immer sehr exakt dem aktuellen Verbrauch entsprechen. Schon Bruchteile von Prozenten Fehlanpassung bewirken ein Abdriften der Netzfrequenz. Diese Tatsache hat in sich den Vorteil, dass allein durch das Beobachten der Netzfrequenz an jedem beliebigen Punkt im Netz der Zustand des Gesamtnetzes beobachtet und dementsprechend eingegriffen werden kann. Diese Aufgabe übernehmen so genannte Regulierkraftwerke, welche ihrer Aufgabe entsprechend oft im Teillastbereich und damit verbunden mit unbefriedigendem Wirkungsgrad arbeiten. Je höher nun der stochastische Anteil der Erzeuger- und Verbraucherleistung ist, desto mehr Regulierleistung muss bereitgestellt werden, um das Netz stabil zu halten (als stochastischen Anteil bezeichnet man all jene Einspeisungen oder Bezüge, welche zeitlich nicht vorhersehbar sind). Im Falle der Windkraftnutzung hat sich in jüngster Zeit gezeigt, dass der ökologische Gewinn der Windkraftwerke zu einem nicht unerheblichen Teil wieder durch die Bereitstellung von Regulierleistung (durch thermische Kraftwerke..) aufgefressen wird. Hier könnte eine geeignete Speichertechnik helfen, den Regulierleistungs-Bedarf drastisch zu senken.

Bis heute ist es so, dass das gesamte Verteilnetz auf die Spitzenbelastung dimensioniert werden muss. Das führt insbesondere auf den Hauptversorgungsleitungen (Stromautobahnen) zu einer insgesamt schlechten Ausnutzung der getätigten Investitionen. Um den extremen Belastungsunterschieden entgegenzuwirken, sind einzelne Elektrizitätsunternehmen dazu übergegangen, den Verkaufspreis des Stromes der aktuellen Nachfrage anzupassen. Bei hoher Nachfrage ist der Strom teurer als zu Zeiten niedriger Nachfrage, wodurch die Verbraucher dazu gebracht werden sollen, den Stromverbrauch zu Spitzenzeiten möglichst einzuschränken. Zudem werden z.T. massive Gebühren beim Überschreiten der vereinbarten Anschlussleistung verrechnet.

Der Steuerung allein durch den Tarif sind allerdings recht enge Grenzen gesetzt, da längst nicht alle Anwendungen einfach zeitlich verschoben werden können. Wirklich zum Tragen kommt ein solches Tarifsystem nur dann wenn ein geeignetes Speichersystem zur Verfügung steht.

#### B. Vorschlag für einen Druckluft-Energiespeicher

Die Druckluft-Speichertechnik basierend auf dem BOP-B (eventuell auch BOP-A) kann einen solchen Speicher ermöglichen, und zwar direkt mit einer Synchronmaschine, ohne den Weg über einen Gleichspannungs-Kreis und Leistungselektronik (wie bei Batterieanlagen üblich). Eine solche Speichereinheit besteht im Wesentlichen aus folgenden Elementen:

- + eine Synchronmaschine mit der gewünschten Lade- bzw. Entladeleistung, welche ständig am Netz mitläuft
- + ein oder mehrere Hydromotoren/Pumpen, welche alle auf einer Welle an die Synchronmaschine gekuppelt sind.
- + ein oder mehrere Interface (BOP-B) bzw. Hydraulik-Ventile (BOP-A)
- + Steuerung der Anlage

- + Druckluftspeicher (Stahlflaschen , Kaverne etc).

Eine solche Anlage eröffnet eine ganze Reihe von Möglichkeiten, welche z.B für ein Industrieunternehmen als Betreiber ökonomisch sehr interessant sind:

- Strom kann zu Zeiten mit günstigem Tarif eingekauft und bei hohem Tarif wieder abgerufen werden, wodurch der Strom insgesamt günstiger eingekauft werden kann
- Leistungsspitzen können gebrochen werden, indem bei hohem Leistungsbedarf der Speicher zu Hilfe genommen wird
- Die Synchronmaschine erlaubt eine komfortable Blindleistungskompensation, wodurch weitere Kompensationseinrichtungen entfallen
- Viele, im Netz verteilte Speichersysteme dieser Art können einen Netzcrash abwenden, indem sie so programmiert werden, dass bei Einbruch der Netzfrequenz sofort (d.h. innert Sekundenbruchteilen) alle Speicher Leistung ans Netz liefern.

Hydrostatische Motoren / Pumpen sind bei hohen Drehzahlen wegen zu hoher Gleitgeschwindigkeiten in ihrer Leistung begrenzt. Daher müssen grössere Leistungen durch mechanische Kupplung mehrerer Einheiten an eine Elektromaschine realisiert werden. Dieser Nachteil lässt sich jedoch sinnvoll nutzen indem durch das Zu -und Wegschalten einzelner Motoren die Leistung der Einheit in weiten Grenzen variiert werden kann, ohne dabei in einen schlechten Wirkungsgradbereich des Hydromotors zu kommen.

Der Leistungsbereich einer solchen Wandlereinheit mit einer Synchronmaschine liegt nach vorläufigen Abklärungen etwa zwischen 50kW und 20MW, wobei zur Leistungssteigerung mehrerer Wandlereinheiten an den gleichen Speicher angeschlossen werden können. Dadurch entsteht auch eine Redundanz, welche für Wartungsarbeiten sehr vorteilhaft ist.

Das Vorteile, welche ein so realisiertes Speichersystem aufweist, sind schon sehr bestechend:

- + Sehr viele Komponenten sind bereits ausgereift und bewährt (Motoren, Regelung der Synchronmaschine, Stahlflaschen, Hydraulikkomponenten)
- + keine heikle und teure Leistungselektronik
- + schnelle Umkehr von Laden und Entladen
- + guter Wirkungsgrad dank weniger Umwandlungsschritte
- + kaum toxische Materialien, alles ist rezyklierbar
- + sehr hohe Zyklenfestigkeit
- + exakte Ladezustandserfassung ermöglicht optimales Speichermanagement
- + robuste Netzankopplung durch die Synchronmaschine
- + integrierte Blindleistungs-Kompensation
- + die eingesetzten Komponenten sind alle für kostengünstige Serienproduktion geeignet, so dass bei einer sinnvollen Modularisierung günstige Gestehungskosten zu erwarten sind

### **C. Entwicklungsbedarf**

Folgende Elemente müssen bedürfen noch einer Weiterentwicklung:

- wirkungsgradoptimierter, stapelbarer Hydromotor (Ansätze sind vorhanden, siehe Kap. 4b)
- BOP-B-Interface, leistungsmässig auf den Hydromotor abgestimmt
- flexibles Regelkonzept, das den sinnvollen Einsatz des Speichers ermöglicht

#### D. Vergleich mit einem anderen Speicherkonzept (s. Bild 2)

Vergleicht man die Möglichkeiten der Druckluftspeicherung mit bereits realisierten Anlagen in existierender Technik, so zeigt sich deutlich das Potential der Druckluft-Speichertechnik.

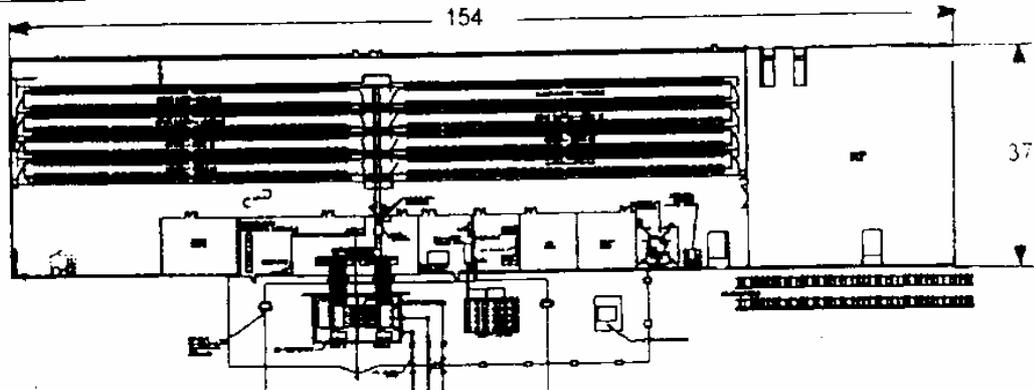
Verglichen werden dabei:

- Die NiCd-Netzpufferanlage von Golden Valley mit 13760 NiCd-Zellen zu je 920Ah **(7)**
- Druckluftspeicher BOP-B, gerechnet nach Golden-Valley-Spezifikationen

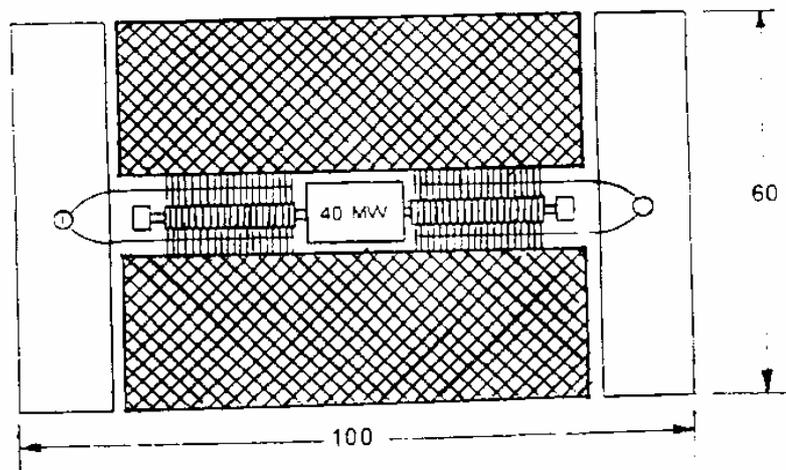
<b><i>Eigenschaft</i></b>	<b><i>Golden Valley (NiCd)</i></b>	<b><i>Druckluft BOP-B</i></b>
Nennleistung	40MW	40MW
Speicherkapazität	13.3MWh	13.3MWh
Gestehungskosten	30MEUR	9,91 MEUR
Raumbedarf	11400m <sup>3</sup>	5000m <sup>3</sup>
spez. Leistungskosten	750 EUR/kW	ca.250 EUR/kW
spez. Energiekosten	2250 EUR/kWh	ca. 745 EUR/kWh

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

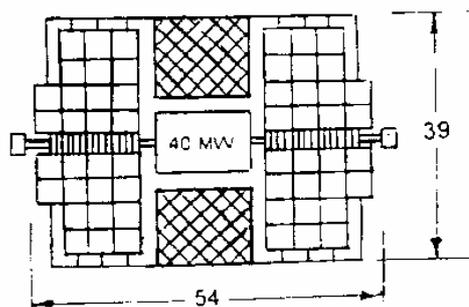
NiCd Golden Valley: **30 MEUR**, including 13'780 units of SAFT SBH 920 Ah, 5698 m<sup>2</sup>



**BOP A with steel bottles: 17,84 MEUR**, outline shown for a 2m height: 6000 m<sup>2</sup>  
 5320 m<sup>3</sup> of bottle capacity @ 2 EUR/ℓ for 250 bar max = 10,84 MEUR  
 40 MW sync. motgen with ancillaries = 2 MEUR  
 80 fixed displacement 0,8 ℓ/rev clutchable reversible hydrostatics = 1,2 MEUR  
 2500 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup>  
 475 m<sup>3</sup> 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**

### 3 Uebersicht der physikalischen Grundlagen

#### A. DRUCKLUFT ALS ENERGIETRÄGER

Für die auf Technik gegründete Zivilisation ist Energie ein zentraler, lebenswichtiger Faktor. Dabei geht es einerseits um die Bereitstellung von Primärenergie in Form von Erdöl, Kohle, Atomenergie, Wind- und Solarenergie, andererseits aber auch um die Verfügbarkeit der Energie zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, und in für die Anwendung geeigneter Form.

Für die Stromversorgungsnetzwerke ist Energiespeicherung zur Abdeckung von Spitzenbedarf oder für Notfälle wichtig. Es werden hierfür Pumpspeicherwerke, und, wo dies nicht möglich ist, aufwendigere Verfahren eingesetzt.

Energiespeicherung wird benötigt, wenn Energien nur in wechselndem Ausmaß zur Verfügung kommt, wie im Falle der Wind- oder Solarenergie, oder wenn Energie nur zeitweise benötigt wird.

Energiespeicherung ist auch im Verkehr nötig. Üblicherweise ist die Energie in Form von Benzin oder Dieselmotorkraftstoff im Tank gespeichert. Es werden aber alternative Möglichkeiten gesucht.

Druckluftenergie ist jedermann durch den Presslufthammer im Straßenbau bekannt. Druckluft bewegt auch die Hebel unzähliger Fabrikationsvorgänge. Druckluft kann aber, wenn der modernste Stand der Technik in sinnvoller Weise zum Tragen kommt, in viel größerem Maßstab als Energieträger dienen und viele Energiespeicherprobleme lösen.

Bei der Kompression und Entspannung von Luft kommt es zu Erwärmung (Die Fahrradpumpe wird heiß) und Abkühlung. Idealerweise sollten diese Prozesse ohne Temperaturänderung – „isotherm“ – ablaufen. Im Projekt BOP wird auf nahezu isotherme Prozessführung geachtet. Hierdurch wird ein hoher Wirkungsgrad erreicht.

Der traditionelle Speicherbehälter für Druckluft ist die Stahlflasche. Mit Hilfe moderner Kunststoff-Verbundwerkstoffe lassen sich jedoch viel leichtere Druckbehälter herstellen, die unter anderem auch als Energiespeicher für mobilen Einsatz, für Nutzfahrzeuge und PKWs, eingesetzt werden können.

Um Druckluft in großem Maßstab zu speichern, können Kavernen, Unterwasserblasen oder poröse Gesteinsformationen verwendet werden.

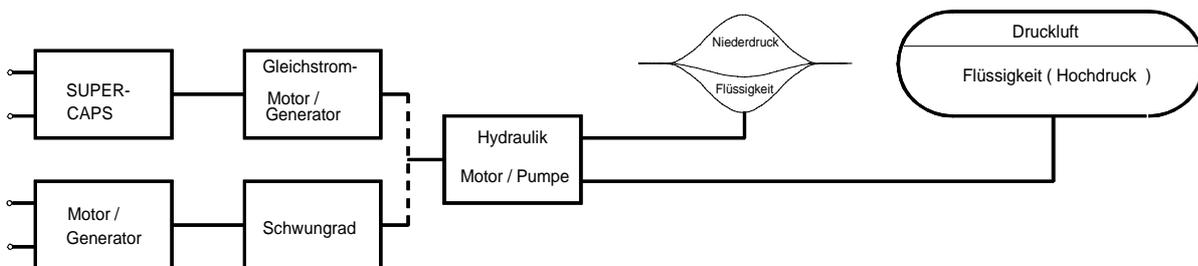
## B. BOP-A UND BOP-B, ZWEI PNEUMATISCH – ÖLHYDRAULISCHE SYSTEME

Zur Umwandlung der aus einem Druckluftbehälter zu gewinnenden Energie in mechanische oder elektrische Energie, und umgekehrt, zur Umwandlung anderer Energien in Druckluftenergie, sind viele technische Systeme denkbar. Kriterien für die Gestaltung solch eines Systems sind unter anderem die Beherrschung der thermodynamischen Probleme – der Lufterwärmung bzw. Luftabkühlung - die Baugröße, der Wirkungsgrad, die Komplexität, die Standzeit, die Bedienbarkeit, die Wartung, und nicht zuletzt die Umweltverträglichkeit.

Die hier vorgestellten Systeme BOP-A und BOP-B stellen eine günstige Lösung basierend auf dem neuesten technischen Stand dar. Sie sind für stationäre Großanlagen, für kleine alleinstehende Einheiten und für mobilen Einsatz – etwa in einem Druckluft-betriebenen PKW – geeignet. Die Abkürzung „BOP“ geht zurück auf die Bezeichnung „Batterien auf Ölhydraulik und Pneumatik“. Beim Einsatz dieser Druckluftsysteme treten keine Schadstoffe auf.

Anhand der nachstehenden Skizzen von Anlagen zur Energiespeicherung mit Hilfe von Druckluft sollen die Prinzipien BOP-A und BOP-B erläutert werden.

BOP-A:

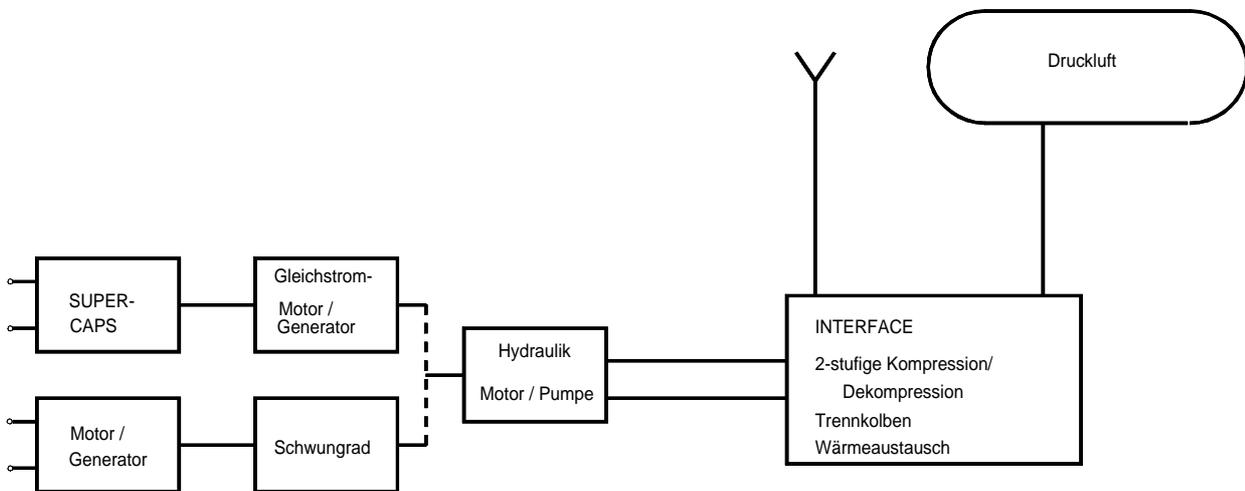


Im Falle von BOP-A wird die Luft im rechts dargestellten Hochdruckbehälter bei der Ladung komprimiert. Die zu speichernde Energie wird über einen Motor eingebracht oder sie steht in Form geladener Supercaps (elektrischer Kondensatoren) zur Verfügung. Mit dieser Energie wird eine hydraulische Pumpe angetrieben. Diese pumpt Flüssigkeit (z.B. Hydraulik-Öl) aus einem Niederdruck-Reservoir in den Hochdruckbehälter, der zum Teil mit Luft gefüllt ist. Die Luft wird z.B. bis 250 bar komprimiert.

Wird Energie benötigt, so treibt die unter Druck stehende Luft das im Hochdruckbehälter befindliche Öl zur Hydraulik-Einheit, die jetzt als Motor arbeitet. Mit der Abnahme des Drucks im Speicher nimmt auch das Drehmoment des Hydraulikmotors ab. Mit Hilfe einer Pulsdauermodulierung kommt man trotzdem zu einer gleichbleibenden – oder zu der gewünschten – Leistung. Hierbei wird dem Hydraulikmotor das Öl nur Pulsweise zugeführt. Ein nachgeschaltetes Schwungrad sorgt für ein gleichmäßiges Drehmoment am Generator.

Die für die Energiespeicherung verwendete Luft bleibt immer im System, sie wird nur komprimiert und dekomprimiert.

## BOP-B:



Im Falle von BOP-B wird die zu speichernde Energie ebenfalls über eine Hydraulikpumpe ins pneumatische System eingebracht, allerdings wird hier Umgebungsluft angesaugt und in vielen Arbeitszyklen in den Hochdruckbehälter gepumpt. Der Vorteil von BOP-B ist, dass ein viel kleineres Behältervolumen und viel weniger Öl benötigt werden, der Nachteil, dass die Kompression beziehungsweise Dekompression in den Arbeitszyklen relativ rasch abläuft, so dass die Lufttemperatur in den Arbeitszylindern mit Hilfe von Wärmetauschern stabilisiert werden muss.

## Einige Charakteristika von BOP-A und BOP-B:

Wie schon erwähnt, ist das benötigte Speichervolumen im Falle von BOP-A viel größer als bei BOP-B. Die Luft im Hochdruckspeicher wird bei der Entladung – wenn also die Druckluft arbeitet – von beispielsweise 250 bar auf 125 bar entspannt. Dieses Verhältnis 2:1 stellt ein Optimum dar, wie weiter unten im Abschnitt „BOP-A und BOP-B: Formeln und Funktionen“ näher erläutert wird. Ein Liter Luft kann bei einer Entspannung von 250 auf 125 bar im Idealfall eine Arbeit von 2,4 Wh leisten.

Im Fall von BOP-B wird die Luft im Hochdruckspeicher jedoch von 250 bar bis 50 bar entladen (wie weiter unten erläutert) und dann im „Interface“, der hydraulisch-pneumatischen Einheit, bis zum Umgebungsdruck von 1 bar entspannt. Ein Liter Hochdruckluft kann in diesem System 27,4 Wh leisten.

Die für die Speicherung einer bestimmten Energiemenge benötigten Volumina verhalten sich wie 11,4 : 1. Der Raum- und Materialaufwand für die Luftspeicherung ist also bei BOP-A wesentlich höher. Hinzu kommt bei BOP-A ein Ölbedarf, der dem halben Volumen des Hochdruckbehälters entspricht.

Ein Nachteil von BOP-B liegt, wie schon erwähnt, in der Thermodynamik. Bei BOP-A wird die Luft nur im Hochdruckbehälter (Das kann natürlich eine Batterie von Einzelbehältern sein) entspannt. Dieser Vorgang ist in den meisten Anwendungsfällen langsam. Die Luft im Hochdruckbehälter kühlt sich zwar wegen der Entspannung ab, das System hat aber Zeit, Wärme mit der Umgebung auszutauschen, so dass die Temperaturänderung im Hochdruckbehälter in tragbaren Grenzen bleibt.

Der selbe Vorgang spielt sich bei BOP-B ab, hinzu kommt aber die Entspannung im Interface, am Anfang von 250 bar auf 1 bar, bei „leerem“ Hochdruckbehälter von 50 bar auf 1 bar. Dieser Vorgang ist relativ schnell, die Zyklendauer des Interface hat die Größenordnung von Sekunden. Ohne forcierten Wärmeaustausch würde die Lufttemperatur im Expansionsbetrieb stark sinken und im Kompressionsbetrieb stark steigen. Dies wäre nicht nur verfahrenstechnisch untragbar, es würde auch zu einem niedrigen Wirkungsgrad führen. Die hierfür verantwortlichen Funktionen werden später diskutiert.

Auch in Bezug auf die Leistungsvariation unterscheiden sich BOP-A und BOP-B. Wird im Falle von BOP-A verlangt, dass sich das mechanische System stets gleich schnell bewegt, so entnimmt auch der ölhydraulische Motor dem Hochdruckspeicher immer gleich viel Öl pro Zeiteinheit. Dieses Öl steht aber am Anfang eines Ladezyklus unter 250 bar und am Ende unter 125 bar. Die Leistung (Druck x Volumen x Geschwindigkeit) beträgt daher bei „leerem“ Speicher (125 bar) nur die Hälfte der Anfangsleistung. Neben der aufwendigen Lösung, das Verdrängervolumen des Motors zu variieren, gibt es auch die Möglichkeit einer hydraulischen Pulsdauermodulation zur Leistungssteuerung. Hierbei steht das dem Motor zugeführte Öl nur in Intervallen zur Verfügung, die so bemessen sind, dass sich im Mittel die gewünschte Leistung ergibt. Praktisch wird die nur portionsweise gelieferte Leistung durch das Schwungrad gemittelt.

Was hier für den Entladebetrieb formuliert wurde gilt sinngemäß auch für den Ladebetrieb, in dem der Motor als Pumpe arbeitet.

Das System BOP-B bietet eine zusätzliche Möglichkeit der Leistungssteuerung. Wie im Abschnitt „BOP-A und BOP-B: Formeln und Funktionen“ näher erläutert wird, kann im Interface die wirksame Kolbenfläche verändert werden. Der Zeitpunkt innerhalb eines Arbeitszyklus, zu dem diese Kolbenänderung eingeschaltet wird („Anschnittsteuerung“), ist wählbar. Hiermit wird die Zyklusdauer verändert und es ergibt sich die Möglichkeit der Leistungssteuerung um den Faktor 2,5. Der Leistungsabfall im System BOP-B zwischen vollem Speicher (250 bar) und „leerem“ Speicher (50 bar) beträgt 71%. Dieser Unterschied lässt sich mit Hilfe der geschilderten Anschnittsteuerung leicht überbrücken. Zusätzlich ist auch im System BOP-B die weiter oben beschriebene Pulsdauermodulation anwendbar.

Größere Anlagen werden mit einer Vielzahl hydraulischer Pumpen-Motoren ausgerüstet sein. Die Zu- oder Abschaltung von Einheiten ergibt eine zusätzliche Möglichkeit der Leistungsregelung.

## **C. THERMODYNAMIK**

### **C.1 Adiabatische und isotherme Prozesse**

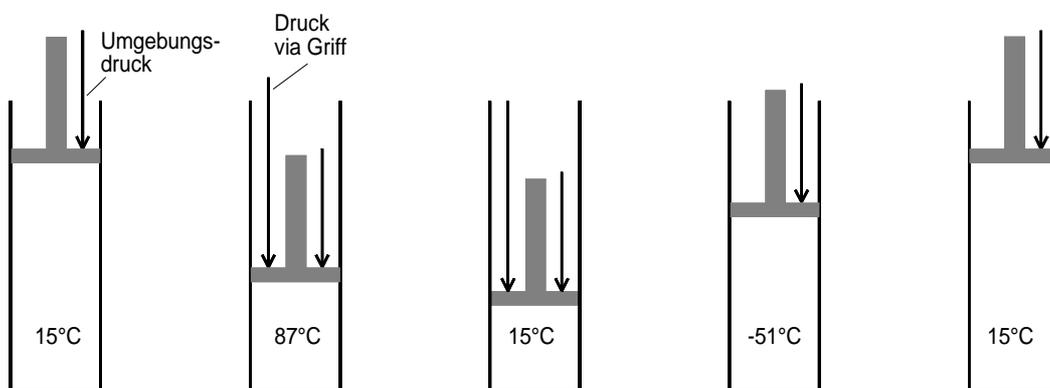
Das Öl in einem hydraulischen System behält bei Druckänderungen in erster Näherung sein Volumen. Im Öl selbst spielen sich während eines Arbeitszyklus keine Änderungen ab, das Öl gibt nur Druck beziehungsweise Kraft weiter, im Falle von BOP-A von Druckluft an metallische Teile des Hydromotors. Ein Gas, im konkreten Fall Luft, verhält sich prinzipiell anders. Erhöht sich der Druck, so verringert sich das Gasvolumen und

seine Temperatur steigt. Die Energie, die aufgewandt wurde, um die Luft zu komprimieren, liegt in Form von Wärme vor.

Zu veranschaulichen ist dies an Hand einer Fahrradpumpe: Hält man den Luftauslass zu und drückt auf den Kolben, so ist die Erwärmung des Pumpenkörpers spürbar. Wartet man eine Weile in dieser Situation, so treten zwei Erscheinungen auf: Die Pumpe kühlt wieder ab, weil sie Wärme an die Umgebung verliert, und der Kolben bewegt sich (bei gleichbleibendem Druck) ein Stück weiter in Kompressionsrichtung. Im Endzustand steht die Luft unter höherem Druck, hat aber wieder die ursprüngliche (Umgebungs-) Temperatur. Wesentlich für das Verständnis der Thermodynamik der Luft ist, sich klar zu machen, dass die komprimierte Luft in diesem Zustand nicht mehr Energie enthält als die ursprünglich nicht komprimierte Luft. Die Energie, die aufgewandt wurde, um die Luft zu komprimieren, ist als Wärme in die Umgebung übergegangen.

Will man umgekehrt mit Hilfe der komprimierten Luft die Kompressionsarbeit wiedergewinnen, so muss die Wärme aus der Umgebung der Luft wieder zugeführt werden. Wird im konkreten Fall der Kolbendruck erniedrigt, so bewegt er sich einen Teil des Weges zurück und die Luft kühlt unter die Umgebungstemperatur ab. Auch dies ist spürbar. Nach einiger Zeit wird die Pumpe sich wieder bis zur Umgebungstemperatur erwärmt haben. Gleichzeitig dehnt sich die Luft wieder zum ursprünglichen Volumen aus und der Kolben kommt wieder in seine ursprüngliche Position.

### Adiabatische Kompression / Entspannung und Temperatenausgleich



Druck:	1	2,5	2,5	1	1
Volumen:	1	0,5	0,4	0,77	1

Mit obiger Skizze soll der Vorgang verdeutlicht werden. Im Anfangsstadium links befindet sich die Luft unter normalem Umgebungsdruck, etwa 1 bar. Durch mechanisch ausgeübten Zusatzdruck von 1,5 bar wird die Luft auf das halbe Volumen komprimiert. Diese Kompression läuft schnell ab, so dass Wärme nicht entweichen kann. Der Vorgang ist „adiabatisch“. Die Luft erwärmt sich hierbei auf 87°C (Im konkreten Fall der

Fahrradpumpe wäre bereits viel Wärme in die Wandung geflossen). Hält man den Druck aufrecht und lässt die Luft abkühlen, so nimmt das Volumen auf 0,4 ab. Nimmt man den mechanischen Druck weg, so entspannt sich die Luft und kühlt gleichzeitig auf  $-51^{\circ}\text{C}$  ab. Nach Temperatenausgleich hat das Volumen wieder seinen ursprünglichen Wert.

Schnell ablaufende Prozesse, bei denen es nicht zum Temperatenausgleich kommen kann, werden adiabatisch genannt, sehr langsam ablaufende Prozesse, bei denen stets dieselbe Temperatur herrscht, heißen isotherm. Beide Fälle sind technisch nicht exakt realisierbar, es wird immer zu einem Prozessverlauf zwischen diesen Extremen kommen. Diese Prozesse heißen dann polytrop.

## C.2 Einige Formeln der Thermodynamik

Die Zustandsgleichung für ein ideales Gas lautet

$$p V = m R T$$

Hierin ist

$p$	Druck in Pascal, 1 bar = $10^5$ Pa, 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
$V$	Volumen einer Luftmenge [m <sup>3</sup> ]
$T$	absolute Temperatur; 0°C = 273,15 °K
$m$	Masse [kg]
$R$	Gaskonstante; Luft: $R = 287$ Ws/(kg K), $R = C_p - C_v$
und $C_v$	spezifische Wärme von Luft bei konstantem Volumen $C_v = 717$ Ws/(kg K)
$C_p$	spezifische Wärme von Luft bei konstantem Druck $C_p = 1004$ Ws/(kg K)
$\gamma$	Adiabatexponent; $\gamma = C_p / C_v$ ; $\gamma_{\text{Luft}} = 1,40$
$n$	Polytropenexponent

Aus der Gasgleichung geht hervor, dass  $p \times V$  bei konstanter Temperatur immer konstant ist. Im mittleren Zustand der obigen Skizze ergibt 2,5 x 0,4 wieder 1.

$$p V = \text{const}$$

beschreibt den isothermen Zustand.

Für adiabatische Prozesse gelten andere Beziehungen:

$$p * V^\gamma = \text{const}$$

$$T * V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$T * p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}$$

Mit Hilfe dieser Beziehungen wurde die obige Skizze dimensioniert. Der in diesen Formeln auftretende Adiabatenkoeffizient  $\gamma = 1,4$  gilt für völlig adiabate Prozesse. Zur Abschätzung der Verhältnisse bei einem polytropen Prozess kann man einen Polytropenkoeffizienten definieren. Ist ein Prozess nicht strikt isotherm sondern ergibt eine Temperaturänderung von  $\Delta T$ , so ist der Polytropenexponent

$$n = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{\ln(p_2 / p_1) - \ln[(T + \Delta T) / T]}$$

### C.3 Mechanische und thermische Energie

Im Falle von BOP-A befindet sich im voll geladenen Zustand im Hochdruckbehälter Luft bei 250 bar. Diese Luft treibt den Hydraulikmotor bis der Druck auf 125 bar gesunken ist. Das Differential der geleisteten mechanischen Arbeit  $dE_{\text{mech}} = p dV =$   
Druck x Kolbenfläche x Weg, und die gesamte mechanisch zu gewinnende Energie wird

$$E_{\text{mech, isotherm}} = \int_{p_2}^{p_1} p * dV = p_1 V_1 * \ln(p_2 / p_1)$$

Setzt man für die Drücke 125 bzw. 250 bar ein und für  $V_1$  1 Liter, so kommt man zu einer mechanisch geleisteten Arbeit pro Liter Luft bei 125 bar von 2,4 Wh/Liter-Luft. Bei 125 bar ist aber das Luftvolumen gleich dem Behältervolumen, deshalb gilt

$$E_{\text{mech, isotherm}} / \text{Liter-Behälter} = 2,4 \text{ Wh/Liter-Behälter}$$

Bei BOP-B wird aus dem Hochdruckspeicher Luft in kleinen Portionen entnommen und bis Umgebungsdruck (1 bar) entspannt, und zwar bei voll geladenem Speicher von 250 bar auf 1 bar und zuletzt von 50 bar auf 1 bar. Die pro Liter geleistete Arbeit kann man berechnen, indem man von der Entspannungsarbeit von 250 auf 1 bar die Entspannungsarbeit von 50 auf 1 bar (die ja nicht geleistet wird) abzieht. Dabei ist zu bedenken, dass bei BOP-B die Luft nicht in einem geschlossenen System arbeitet sondern gegen den äußeren Luftdruck  $p_U$  entspannen muß, es gilt also die Formel

$$E_{\text{mech, isotherm}} = \int_{p_1}^{p_2} (p - p_U) dV = p_1 V_1 [\ln(p_1 / p_2) + p_U / p_1 - p_U / p_2]$$

Setzt man für  $p_1$  entsprechend obiger Erläuterung 250 und 50 bar ein, und für  $p_2$  den Umgebungsdruck  $p_U = 1$  bar, so ergibt sich eine Leistung pro Liter von 31,4 Wh/Liter – 4,1 Wh/Liter, insgesamt 27,4 Wh/Liter. Bei BOP-B sind Luftvolumen und Speichervolumen immer gleich. Daher gilt:

$$E_{\text{mech, isotherm}} / \text{Liter-Behälter} = 27,4 \text{ Wh/Liter-Behälter}$$

Aus einem Liter bei 250 bar gespeicherter Luft ist also bei BOP-B 11,4 mal so viel mechanische Energie zu gewinnen wie bei BOP-A. Diesem Vorteil steht gegenüber, dass im System BOP-B für Wärmeaustausch gesorgt werden muss, um nicht zu weit vom isothermen Betrieb abzuweichen.

Im isothermen Betrieb ist die zurückgewonnene Arbeit gleich der für die Kompression notwendigen Arbeit. Der Wirkungsgrad ist daher – von anderen Verlusten abgesehen – 100%.

#### C.4 Adiabatischer und polytroper Betrieb

Im System BOP-A ist sowohl bei der Kompression wie bei der Entspannung das gesamte verfügbare Speichervolumen beteiligt. Die Druckänderung vollzieht sich daher relativ langsam, die Lufttemperatur kann durch Wärmeaustausch über die Behälterwandung in der Nähe der Umgebungstemperatur gehalten werden.

Bei BOP-B wird dem Speicherbehälter jeweils nur eine kleine Portion Hochdruckluft zugeführt oder entnommen. Beim Laden wird Luft bei 1 bar der Umgebung entnommen und in der Zykluszeit von – größenordnungsmäßig – 1 Sekunde komprimiert. Diese Zeit ist zu kurz für Temperaturengleich ohne spezielle Maßnahmen. Es muß durch Wärmetauscher dafür gesorgt werden, daß die Temperatur bei der Kompression nicht zu hoch ansteigt und bei der Entspannung nicht zu tief absinkt. Im Folgenden werden die Konsequenzen adiabatischer und polytroper Prozessführung angedeutet.

Bei einer adiabatischen Expansion von 250 bar auf 1 bar fällt die Lufttemperatur von 15°C auf – 213°C. Dies ist natürlich ohne alle Nebeneffekte gerechnet und für BOP-B in der Realität nicht maßgeblich. Trotzdem soll hier der rein adiabatische Wirkungsgrad angedeutet werden. Für die Arbeitsleistung im adiabatischen Fall gilt die Formel

$$E_{\text{mech.,adiabat.}} = (p_1 / p_2)^{1/\gamma} p_2 V_1 \left\{ \frac{1}{\gamma-1} \left[ (p_1 / p_2)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + p_U / p_2 \left[ (p_1 / p_2)^{\frac{-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\}$$

Setzt man hier für  $p_1$  250 bzw. für  $p_2$  50 bar wie oben im isothermen Fall, so wird die im adiabatischen Fall erreichbare mechanische Arbeit

$$E_{\text{mech.,adiabat./Liter}} = 10,4 \text{ Wh/Liter.}$$

dies sind nur 38% der Arbeit im isothermen Fall. Der Wirkungsgrad ist also

$$\eta_{\text{adiabat.}} = 38 \text{ \%}.$$

Nimmt man einen realistischeren Fall an, etwa, daß die Abkühlung durch Wärmetausch auf  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$  beschränkt werden kann, so ergibt sich ein Polytropenexponent von 1,03. Rechnet man hiermit wieder die mechanisch erzielbare Arbeit, so erhält man

$E_{\text{mechan, polytr./Liter}} = 24,6 \text{ Wh/Liter}$ , und der Wirkungsgrad wird

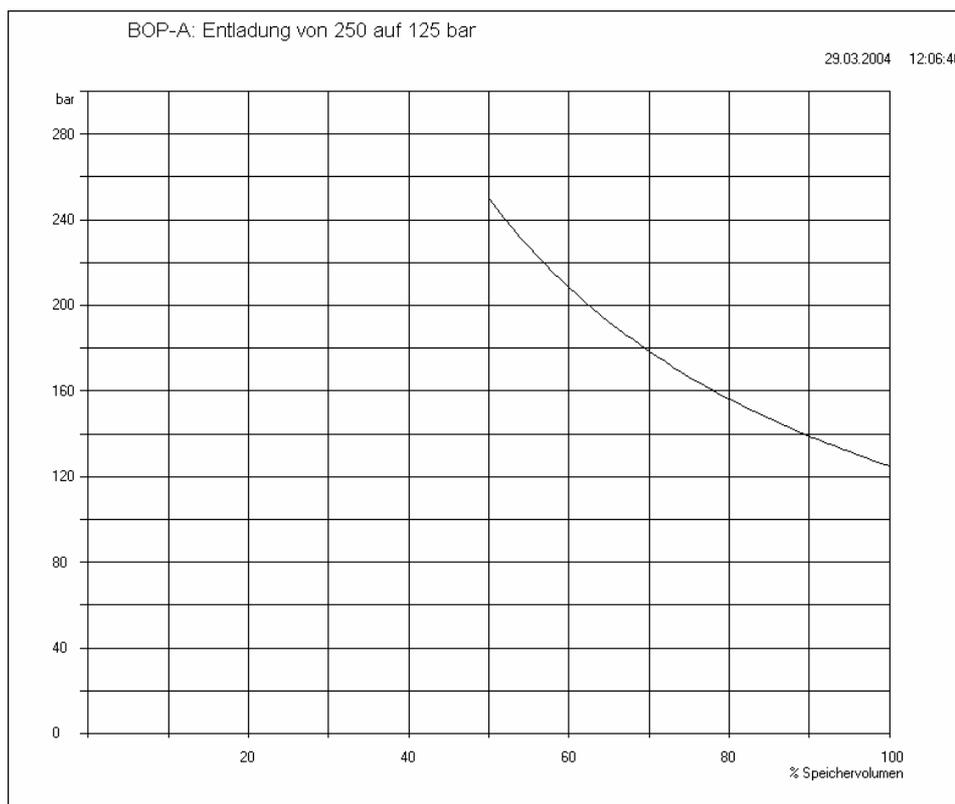
$$\eta_{\text{polytrop.}} = 90 \text{ \%}.$$

Dies bedeutet, daß BOP-B bei entsprechenden Vorkehrungen für Wärmeaustausch mit gutem Wirkungsgrad zu realisieren ist.

## D. BOP-A und BOP-B: Formeln und Funktionen

### D.1 Der Druck im Speichersystem BOP-A

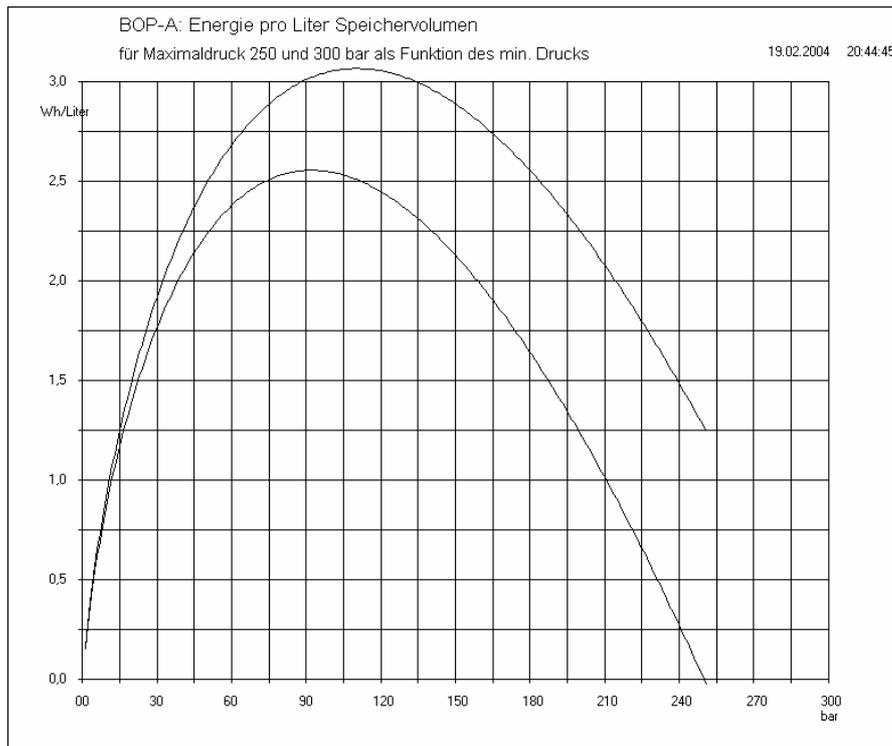
Der Speicher des Systems BOP-A enthält im entladenen Zustand Luft bei relativ niedrigem Druck – im eingangs genannten Beispiel 125 bar – und wird dann zur Hälfte mit Öl vollgepumpt, so dass die Luft zuletzt unter einem Druck von 250 bar steht und nur mehr die Hälfte des Volumens einnimmt. Im PV-Diagramm stellt sich das wie folgt dar:



Im „geladenen“ Zustand ist der Speicher zur Hälfte mit Öl gefüllt. Während der Leistung mechanischer Arbeit wird das Öl ausgetrieben. Der Restdruck beträgt dann 125 bar.

Zur Wahl des Druckverhältnisses 1:2 führen zwei Überlegungen. Einerseits soll die Energiedichte so groß wie möglich sein, um das Speichervolumen klein zu halten, andererseits soll die Menge des Öls beschränkt werden. Die in der Luft „gespeicherte“ Energie ist

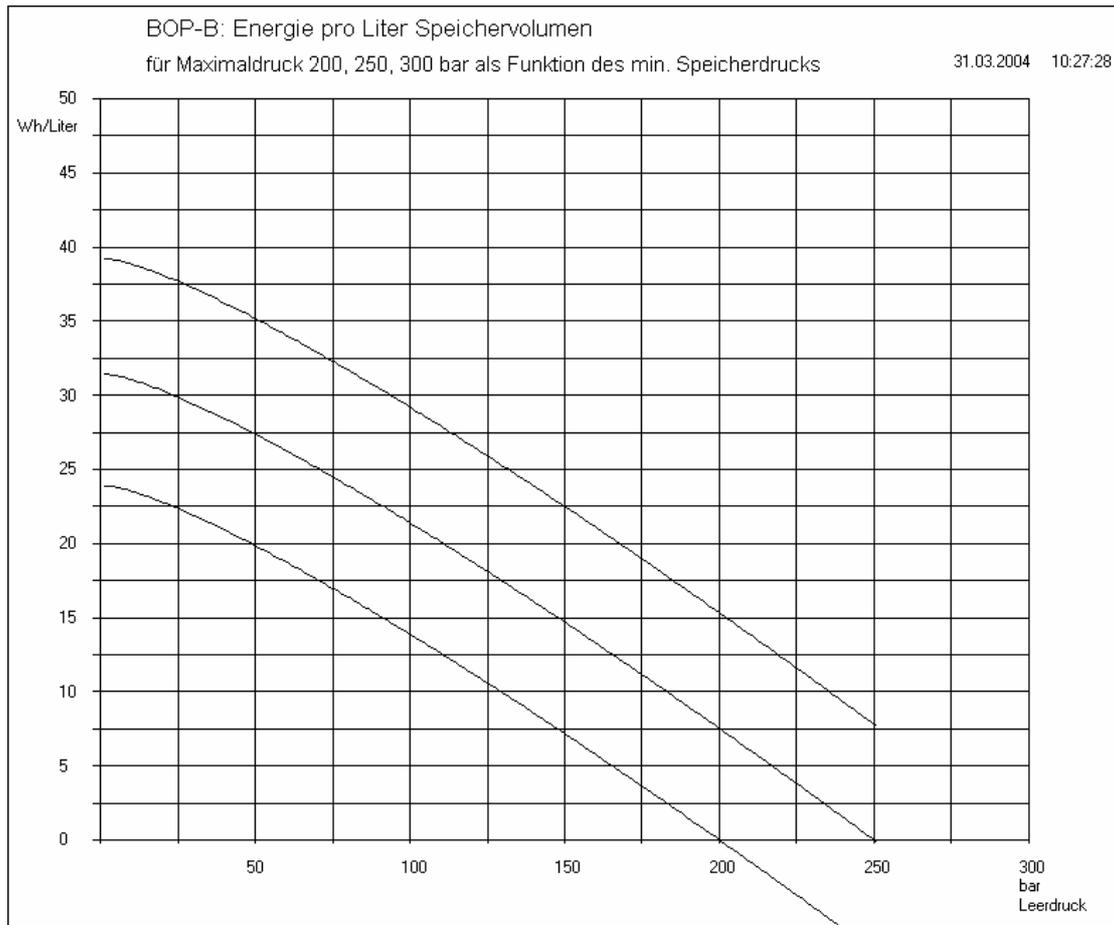
$$E = \int_{p_1}^{p_2} p dV = p_{leer} V_{leer} \ln(p_{voll} / p_{leer})$$



Die Energiedichte  $E/V_{leer}$  hat für  $p_{voll} = 250$  bar ein Maximum bei etwa  $p_{leer} = 90$  bar. Es wurde in diesem Bericht das Verhältnis 250 zu 125 bar gewählt. Das geringere Druckverhältnis ist einerseits für das Hydrauliksystem günstig, andererseits ist das für den Betrieb erforderliche Ölvolumen kleiner.

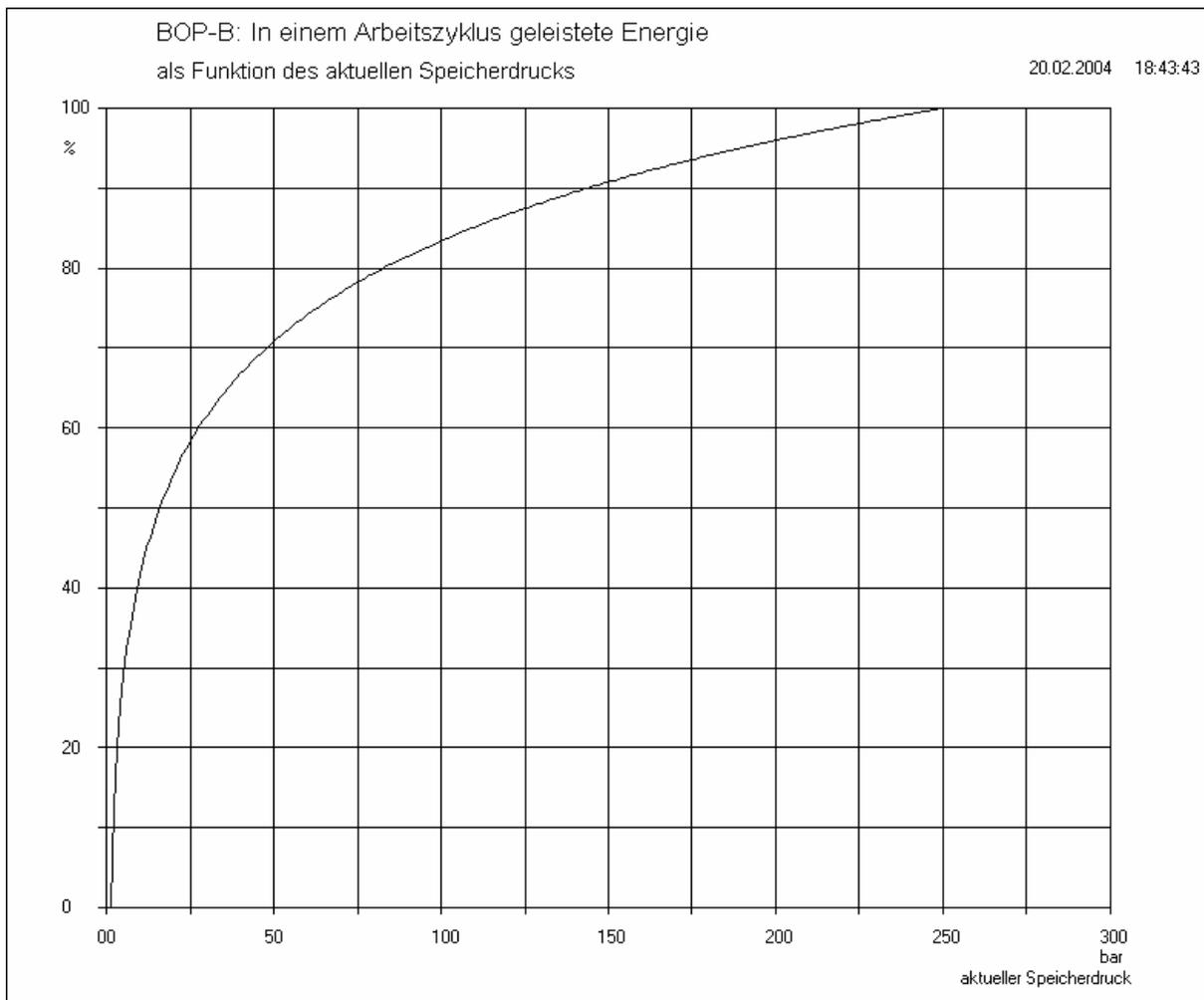
## D.2 Der Druck im Speichersystem BOP-B

Die pro Liter Speichervolumen umwandelbare Energie ist einerseits vom Maximaldruck, andererseits aber auch vom „Leerdruk“ abhängig, also von dem Druck, bis zu dem das Speichersystem entleert werden soll. Die folgenden zwei Diagramme zeigen, dass 50 bar ein günstiger Kompromiss ist:



Nimmt man die 250-bar-Kurve, so sieht man, dass bei völliger Entleerung die Spezifische Energie 31,4 Wh/Liter des Speichervolumens beträgt. Wird der Speicher aber nur bis 50 bar entladen, so verliert man für den Lade/Entladebetrieb 4,1 Wh/Liter so dass nutzbare 27,3 Wh/Liter übrig bleiben.

Je weiter der Speicher entladen wird, desto höher ist die insgesamt gespeicherte Energie. Der Wirkungsgrad im Interface sinkt aber mit Abnahme des Speicherdrucks:



Dieses Diagramm zeigt, wie viel Energie in einem Arbeitszyklus umgewandelt wird. Nimmt man einen Zyklus bei 250 bar als Basis, so erreicht man bei 50 bar nur mehr 71 %. Bleibt der Arbeitsrhythmus konstant, so nimmt auch die Leistung auf 71 % ab.

Diese und die vorige Grafik haben in Bezug auf den niedrigsten Ladedruck gegenläufige Tendenz. 50 bar ist ein günstiger Kompromiss.

### D.3 Thermodynamischer Wirkungsgrad bei BOP-A

Bei langsamer Ladung oder langsamer Entladung, also im isothermen Betrieb, in dem alle Temperaturänderungen durch Wärmeaustausch mit der Umgebung ausgeglichen werden, ist der thermodynamische Wirkungsgrad 100%. Die für die Kompression von 125 auf 250 bar benötigte Energie ist genau so groß wie die mechanische Energie, die man bei Entladung von 250 auf 125 bar zurückerhalten kann. In der Solartechnik betragen die Lade- und Entladezeiten 4 – 6 Stunden, so dass annähernd isotherme Verhältnisse gelten.

In speziellen Anwendungsfällen, die kurzfristig hohe Leistung, also schnelle Entladung verlangen, kann es zu Abkühlung kommen. Man ist dann im polytropen Gebiet, und der Wirkungsgrad ist < 100%. Im adiabatischen Grenzfall beträgt die Abkühlung bei Entspannung von 250 auf 125 bar 52°C. So groß wird die Abkühlung nicht werden, denn einerseits stellt das Speichersystem eine Masse dar, die Wärme an die Druckluft abgibt, andererseits tritt auch während einer relativ schnellen Entladung Wärmeaustausch mit der Umgebung ein. Die Luft wird sich also um weniger als 52°C abkühlen, was den Wirkungsgrad verbessert.

Der Wirkungsgrad einer Anlage hängt wesentlich von der Betriebsweise ab. Es seien hier nur drei Varianten vorgestellt:

Variante A:

Die Anlage sei voll geladen und werde dann sehr schnell (adiabatisch) entladen. Die Luft kühlt sich um 52°C ab. Bei Erreichen von 125 bar ist noch nicht alles Öl aus dem Speicherbehälter getrieben, weil die abgekühlte Luft weniger Volumen einnimmt. Bei dem Entspannungsvorgang wurde mechanische Energie in Höhe von 1,56 Wh/liter gewonnen (isotherm wären es 2,41 Wh/liter). Der Wirkungsgrad wird daher

$$\eta = 65\%.$$

Variante B:

Hat man im Anschluss an Variante A Zeit, so dass sich das System erwärmen kann, so wird der Druck um  $T/(T - \Delta T)$  steigen (Das Luftvolumen bleibt konstant, weil die Hydraulik still steht). Kann man das System dann langsam (isotherm) weiter entspannen lassen, so lässt sich nochmals Energie in Höhe von 0,69 Wh/liter gewinnen. Damit wird der Wirkungsgrad dann

$$\eta = 93\%.$$

Variante C:

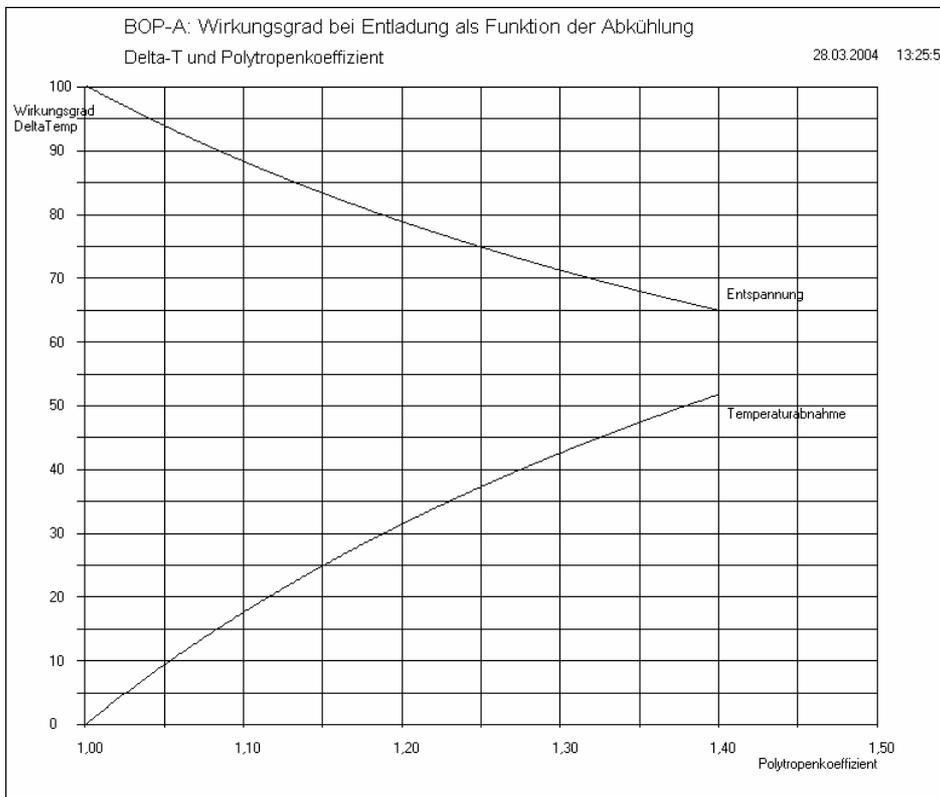
Fordert man nicht extrem schnelle Energieabgabe sondern mit der Möglichkeit eines teilweisen Wärmeaustausches, um z.B. 25°, so ergibt sich auf einem bestimmten polytropen Weg ein Wirkungsgrad von

$$\eta = 83\%,$$

und man hat immer noch die Chance, eine Variante B anzuhängen.

Die Verluste bei schneller Ladung hängen in ähnlicher Weise von den Einzelheiten des Betriebes ab. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass die Steuerung der Anlage von großer Bedeutung ist.

Der Wirkungsgrad nach Variante C, als Funktion der Abkühlung, ist in folgendem Diagramm dargestellt:

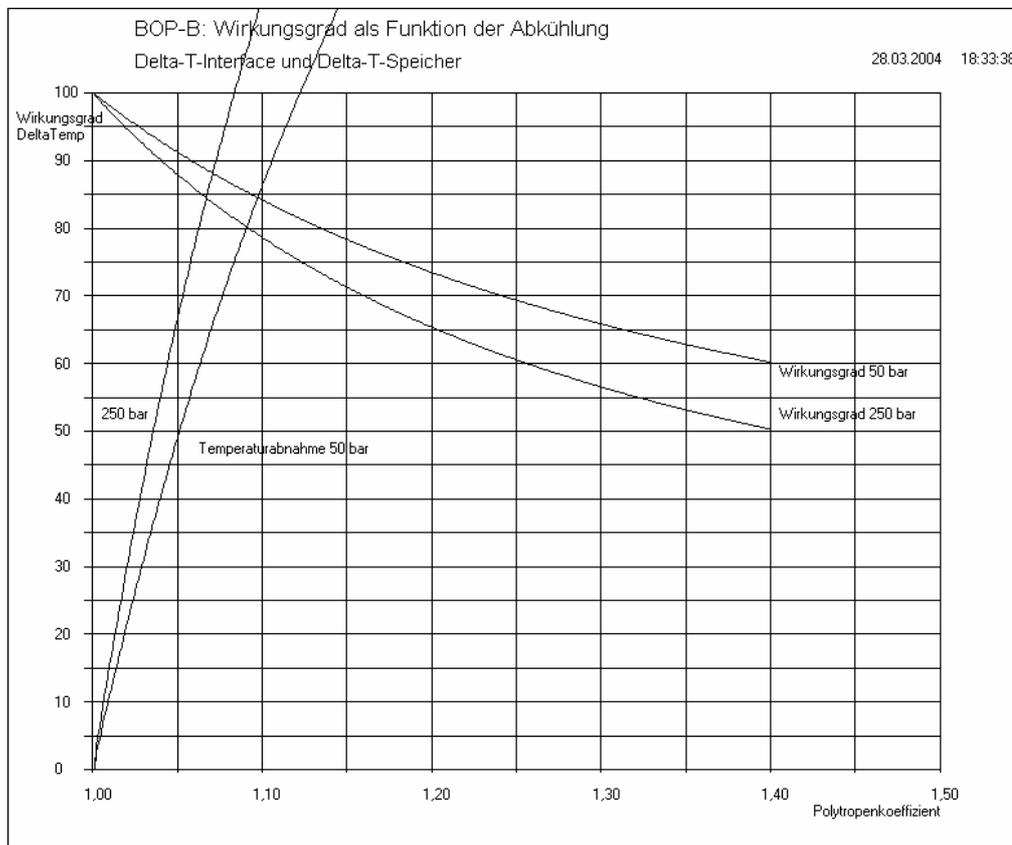


#### D.4 Thermodynamischer Wirkungsgrad bei BOP-B

Die Betrachtung soll wieder mit der Entladung beginnen. Das pneumatisch-hydraulische System, das „Interface“, entnimmt dem Speicher Luft bei hohem Druck, anfangs bei 250 bar, am Ende der Entladung des Speichers bei 50 bar. Im Prinzip wird sich der Speicher bei diesem Vorgang abkühlen, wie oben für BOP-A beschrieben. Es soll aber hier der Einfachheit halber angenommen werden, dass die Entladung so langsam verläuft, dass die Temperatur des Speichers konstant bleibt. Dies im Gegenteil zu den Vorgängen im Interface, die prinzipiell wärmetechnisch gesehen schnell sind (Zykluszeiten von Sekunden).

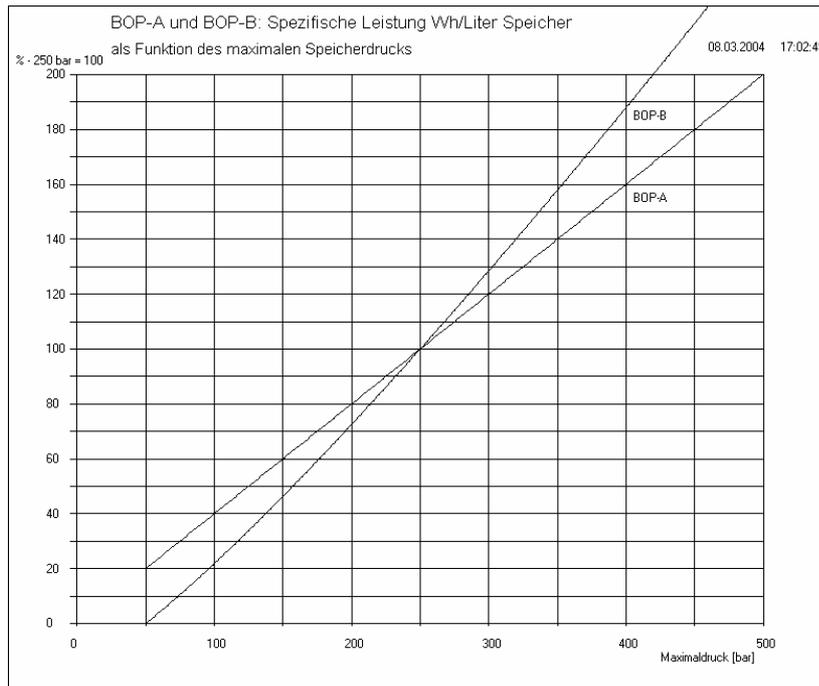
Im Interface wird die Luft z.B. von 250 bar auf 1 bar (Umgebungsdruck) entspannt. Im adiabatischen Extremfall kühlt sich die Luft hierbei um 229°C ab. Wie oben beschrieben, ist das Interface mit Wärmetauschern ausgestattet, die die Abkühlung wesentlich beschränken. Nimmt man eine Abkühlung der Luft um 50°C an, so gewinnt man bei dieser „polytropen“ Betriebsweise eine mechanische Zyklusenergie von 35,4 Wh pro Liter Speichervolumen. Im isothermen Fall beträgt die entsprechende Zyklusleistung 38,3 Wh/liter, der Wirkungsgrad beträgt also, wenn die Abkühlung auf 50°C beschränkt wird, 92%.

Das nachstehende Diagramm zeigt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Abkühlung. Die Effekte sind, wie zu erwarten, bei 50 bar, dem Ende der Speicherentladung, geringer.



Die Abhängigkeit der spezifischen Energie vom maximalen Speicherdruck:

Bisher wurde sowohl bei BOP-A als bei BOP-B von einem maximalen Speicherdruck von 250 bar ausgegangen. Das folgende Diagramm zeigt, was eventuell durch einen höheren Speicherdruck zu gewinnen ist:



## D.5 Verluste in Rohrleitungen

In größeren Anlagen haben auch die Rohrleitungen, die die einzelnen Teile der Anlage verbinden, schon Längen, die berücksichtigt werden müssen. Der Druckabfall ist grob durch die Formel

$$\Delta p / m = \frac{\rho \cdot v}{2}$$

zu beschreiben. Der Wert ist allerdings von den Einzelheiten der Leitungsführung, der Rauigkeit etc. abhängig.  $\rho$  ist die Dichte von Luft, bei 250 bar etwa  $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $v$  ist die Geschwindigkeit. Sie errechnet sich aus der geforderten Leistung, der Energiedichte und dem Rohrquerschnitt. Die Energiedichte im System BOP-B beträgt bei 250 bar  $250 \cdot \ln(250) = 138 \cdot 10^6 \text{ Ws/m}^3$ . Bei einer Leistung von 1 MW und einem Rohrdurchmesser von 30 mm wird die Geschwindigkeit 10 m/sec und der Druckverlust  $\Delta p = 0,15 \text{ bar}$ .

Der Druckverlust bei 100 m Rohrleitung beträgt 15 bar und der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\ln(235)}{\ln(250)} = 98,9\%$$

Man kann auch die Frage stellen, welcher Rohrquerschnitt erforderlich ist, um bei einer Leistung von 40 MW und einer Leitungslänge von 2,5 km auf einen Druckabfall von 50 bar zu kommen (dies würde einem Wirkungsgrad von 96% entsprechen). Die Rechnung ergibt einen Rohrdurchmesser von 0,32 m.

Abschliessend können diese Zahlen und Kurven dahingehend interpretiert werden, dass insbesondere für Systeme mit mechanischem Eingang bzw. Ausgang (Turbine, Fahrzeugantriebe usw.) ausserordentlich günstige Eigenschaften ausgewiesen werden (8), zu denen die Möglichkeit einer ultraschnellen Füllung mit Wirkungsgraden über 90 % (9) addiert werden muss. Im Vergleich mit Elektroantrieben fällt auf, dass hier die Wirkungsgradeinbusse durch Elektromotore – die ja bei elektrochemischer Speicherung unumgänglich sind – restlos wegfällt (was für Produktive Maschinen in der Landwirtschaft sehr günstig ist, s. das Anwendungsfeld (10)) und das Speichergewicht beachtlich kleiner ist als z.B. bei Bleibatterien.

Umgekehrt gilt natürlich, dass bei Speicherungen von Energie in elektrischer Form der Motor/Generator mitsamt Wirkungsgrad-Einbussen mitberücksichtigt werden muss.

## REFERENZEN:

- 1 Ph. Brückmann, M. Hintermann, ***Stromversorgung in den Alpen mit Kleinspannungsanlagen***, Fachstelle für Wasser & Energiewirtschaft, Graubünden 1992
- 2 M. Villos, A. Labourdet, ***Energie solaire photovoltaïque***, DUNOD 2003, ISBN 2 10 005610 7, p 130
- 3 Alternativas CMR, ***Der Gleichstromhochsetzer Minibatnet***, [www.alternativascmr.com](http://www.alternativascmr.com)
- 4 P. Jourde, ***Battery Energy Pay-Back Time***, CEA Cadarache, [patrick.jourde@cea.fr](mailto:patrick.jourde@cea.fr)
- 5 Pape Cissé, ***Espérons que ce ...plomb d'achoppement sera bientôt éliminé***, Le Nord-Ouest No. 22, Octobre 2002, rubrique „énergie solaire“.
- 6 M. Guillon, ***Commande et asservissement hydraulique et électrohydraulique***, TECDOC Lavoisier, 1992, ISBN 2-85206-756-0
- 7 Tim de Vries, Niklaus Umbrich & Al., ***Stromreserve im Eis***, VSE Bulletin 3/2004
- 8 W. Menhardt, ***Druckluft als Energieträger für Antriebe im Vergleich zu konventionellen und neuen Energieträger***, BFE Bern, 1999
- 9 I. Cyphelly, ***Schnelle Umfüllung von Gasen unter Hochdruck***, Forschungsbericht BFE Bern, 1998
- 10 I.Cyphelly, P. Jourde, ***DC Rural Off-Grid Motive Power for Developing Countries***, Paper OB8, 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Oct. 2001