

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 85 (1994)

**Heft:** 18

**Artikel:** Energiespeicherung durch Druckluft am Grunde tiefer Seen zur Deckung des elektrischen Spitzenbedarfs

**Autor:** Witt, Herrmann de

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902599>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

In der Schweiz ist der Bau von neuen Wasserkraftwerken sehr erschwert. Das gilt auch für projektierte Pumpspeicherwerke als Lieferanten von Spitzenenergie. Der Verfasser schlägt deshalb ein anderes Medium für diese Aufgabe vor: die Speicherung von *Druckluft* in tiefen Seen, mit denen die Schweiz reich gesegnet ist. Die Form solcher Druckluftspeicher ähnelt einem umgedrehten Schiffsrumpf, und die Statik folgt einem Zelt, dessen Stoff durch eine dünne Blechhaube ersetzt wird. Diese ist unten offen, wo das Seewasser den Abschluss der Druckluftblase übernimmt. Da sich der Druck der gespeicherten Luft dem Wasserdruck in der Tiefe anpasst, wirken auf die Blechhaube nur geringe Druckdifferenzen. Während ein Pumpspeicherwerk nur 70% der aufgenommenen Energie wieder abgeben kann, lässt sich ein Druckluftspeicher durch eine Gasturbine als Wärmekraftwerk betreiben. Der Artikel beschränkt sich auf den geographisch-physikalischen Rahmen und enthält deshalb keine näheren Angaben zur Konstruktion oder zur Energiebilanz solcher Anlagen.

# Energiespeicherung durch Druckluft am Grunde tiefer Seen zur Deckung des elektrischen Spitzenbedarfs

■ Herrmann de Witt

## Einleitung

Die Speicherung elektrischer Energie mit «zyklisch umgewälzten Wasser» zwischen zwei Niveaus wurde bereits 1904 verwirklicht. Zwanzig Jahre später begann die Nachrüstung von Saisonspeichern mit Pumpen zwecks Verlängerung des Turbi-

neneinsatzes über den natürlichen Zulauf hinaus. Seitdem wird die Erweiterung des Einzugsgebietes durch (z.T. weitläufige) Stollen mit Hilfe kleinerer Pumpen vielfach praktiziert. Auf dem Höhepunkt dieser Entwicklung veröffentlichte das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft in Bern 1972 «Pumpspeichermöglichkeiten in der Schweiz» als umfangreiche Mitteilung Nr. 46 – im folgenden als [1] bezeichnet. Darin wurden von 273 gemeldeten Standorten 26 ausgewählt und als Vorprojekte unter-

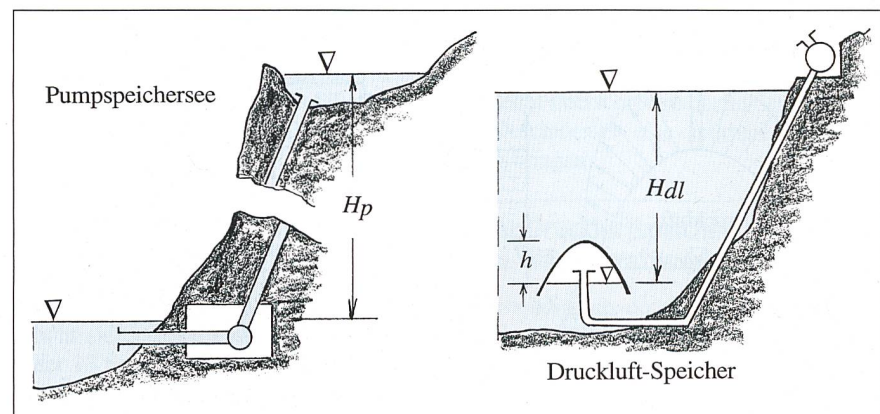


Bild 1 Prinzip von Wasser- und Druckluftspeicherung

Adresse des Autors:

Dr. Ing. H. de Witt, dipl. Physiker,  
Adligenswilerstrasse 64, 6045 Meggen/Schweiz.

Höher gelegener Pumpspeichersee	Druckluftspeicher auf Seegrund
Grosses Gefälle $H_p$ gegenüber natürlichem See (hängt vom Gebirge ab) Speichersee oben offen Wasser nach oben pumpen Antrieb des Generators durch Wasserturbine Wasser ist praktisch inkompressibel	Mittleres Druckgefälle $H_{dl}$ gegenüber Atmosphäre (hängt vom Seegrund ab) Druckluft-Speicher unten offen Luft nach unten drücken Antrieb des Generators durch Druckluft-Turbine Verdichterarbeit überwiegt bei Luft die Verdrängungsarbeit Energie der Druckluft lässt sich durch Erhitzung vervielfachen (Gasturbinen-Betrieb)
verarbeitetes Wasser bleibt kalt	

Tabelle 1 Analogien zwischen Pumpspeicherwerk und Druckluftspeicher auf dem Seegrund

sucht. Die Verfasser kamen damals zum «realistischen» Schluss, dass in der Schweiz mindestens 10480 MW weitere Pumpspeicherleistung wirtschaftlich installiert werden könnte. Gegenüber der heutigen Generatorleistung bedeutete das fast eine Verdoppelung.

Diese Wachstumseuphorie wurde in der Schweiz durch das erwachende Umweltbewusstsein stark gedämpft, und für neue Kernkraftwerke musste sogar ein Baustopp hingenommen werden. Gleichzeitig wird im übrigen Europa das Grundlastangebot erweitert, was unweigerlich höhere Bedarfsspitzen nach sich zieht. Ist die Schweiz auf dem «Dach Europas» prädestiniert, diese wachsende Marktlücke zu schliessen? Dazu schlägt der Verfasser ein anderes Speichermedium, nämlich Druckluft, vor, die nicht bei konstantem Volumen – wie vereinzelt in unterirdischen Kavernen –, sondern unter konstantem Druck am Grunde der zahlreichen tiefen Seen gespeichert wird. Von den in [1] als Unterbecken verwendeten Seen interessierte nur das bei einer Seespiegeländerung um 10 cm verfügbare Wasservolumen. Ausser der Seeoberfläche berücksichtigt der Verfasser in seiner Studie die Seetiefe als 3. Dimension. Die Druckluftenergie nimmt sogar stärker als linear mit der Tiefe zu.

## Analogien zum Pumpspeichersee

Als Frucht seines langjährigen Analogie-Studiums fand de Witt ein zum Pumpspeichersee analoges System, das anhand von Bild 1 erläutert sei. Das linke Schema zeigt die bekannte Funktion hochgelegener Stauseen zur Energiespeicherung. Die zu ihrer Unterstützung eingesetzten starken Pumpen verbrauchen in der Schweiz heute erst 4% der gesamten hydraulischen Energie.

Das Pumpspeicherverfahren setzt immer ein paar genügend nahe gelegener Seen oder anstatt des unteren Sees einen entsprechend wasserführenden Fluss voraus. Dagegen lässt sich die vorgeschlagene Druckluftspeicherung in jedem genügend tiefen (und nicht zu kleinen) See allein verwirklichen. Das rechte Schema in Bild 1 enthält dieselben Elemente einer Pumpspeicheranlage, jedoch gleichsam umgestülpt. In Tabelle 1 stehen sich die entsprechenden Elemente und Funktionen der beiden Systeme analog gegenüber.

Das Gefälle  $H_p$  von Pumpspeicherseen dürfte stets grösser als die entsprechende Tiefe  $H_{dl}$  von Seen sein, die für eine Druckluftspeicherung in Frage kommen. Dieser Nachteil wird aber weitgehend durch die Kompressibilität ausgeglichen, wodurch

die Druckluft gegenüber demselben Volumen Wasser ein Mehrfaches an Energie aufnimmt. Diese Fragen werden im «Energetischer Vergleich» genauer behandelt.

## Grundlagen des Druckluftspeichers

### Form und Statik

Als Form des Druckluftspeichers bietet sich ein umgekehrter Schiffsrumpf an, der in der Regel einen langen zylindrischen Mittelteil hat. In beiden Fällen übt der statische Wasserdruck Kräfte aus, jedoch entfallen beim Druckluftspeicher die Beanspruchungen eines Schiffes im Seegang, da das Wasser am Seegrund ruhig bleibt, selbst wenn oben ein Föhnsturm toben sollte. Bei Druckluftspeichern vor einer Steilküste muss man jedoch mit gewissen Strömungen und restlichem Seegangs-Einfluss rechnen.

Da die auf die Speicherhülle wirkenden Druckdifferenzen  $\Delta p$  nur einen Bruchteil des Wasserdrucks am Seegrund ausmachen, kann sich die dünne und nur auf Zug beanspruchte Blechhülle des Druckluftspeichers den Formänderungen in Abhängigkeit des Füllungsgrades leicht anpassen. Wenn dem Speicher im leeren Zustand der stabilisierende Einfluss der Luftblase fehlt, muss ein Zusammenfallen, wie bei einem Zelt, anderweitig vermieden werden. Dazu bieten sich die entsprechenden Bug- und Heckteile eines Schiffes an. Der Verfasser schlägt vor, diese Abschlüsse als halbe Rotationskörper auszubilden, deren Umdrehungslinie derjenigen in Bild 2 links, jedoch bei maximaler Füllung des Speichers entspricht.

Dieses Schema stellt einen Schnitt durch den zylindrischen Teil des Druckluftspeichers bei einer mittleren Füllung dar. Im oberen Teil befindet sich die Druckluft, die nach unten durch Seewasser abgeschlossen wird. Dieses steht mit dem umgebenden Wasser im Gleichgewicht, und vom inneren Wasserspiegel baut sich nach oben ein linear wachsender Überdruck  $\Delta p$  auf, da der Luftdruck fast konstant ist und der äussere Wasserdruck linear abnimmt. Der untere Teil des Speichers bleibt unbelastet ( $\Delta p = 0$ ), doch bewirkt das Eigengewicht des Bleches eine leichte konkave Krümmung.

Der Auftrieb  $A$  der Druckluftblase muss als Kräftepaar  $Z_A - Z_A$  nach unten in die Verankerung übertragen werden. Die zweidimensionale konvexe Krümmung ergibt sich aus  $1/r = \Delta p/Z$  und nimmt innerhalb der Luftblase von unten nach oben linear zu – jedoch nicht mit der Bogenlänge. Die angenäherte Parabelform der Luftblase bei mittlerer Füllung streckt sich

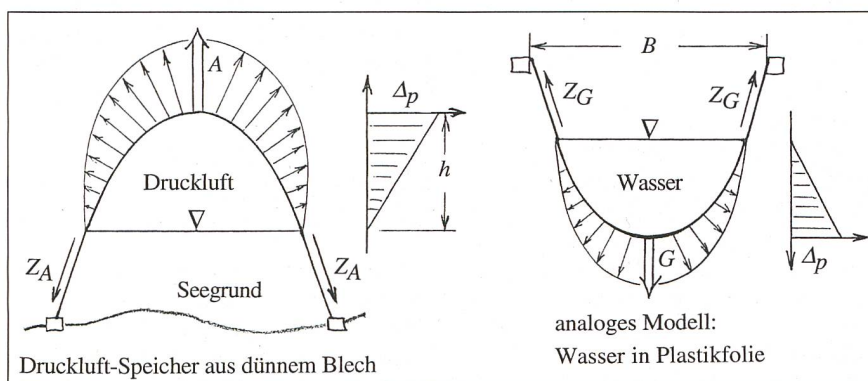


Bild 2 Zur Statik von Grossausführung und Modell

bei fast leerem Speicher ähnlich einer Hyperbel. Umgekehrt weitet sich die Luftblase bei maximaler Füllung etwa zu einer Ellipse, wobei sich ihre Höhe vermindert.

**Modell**

Da die Kurvenschar als Funktion der Füllung mathematisch kompliziert ist, sei ein analoges Modell gemäss Bild 2 rechts zur Verfügung gestellt. Das biegeweiche Blech wird im Modell zu einer Plastikfolie, die oben an zwei parallelen Leisten befestigt ist. Die geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Grossausführung bleibt für einen bestimmten Füllungsgrad gewahrt, wenn die Bogenlänge im Verhältnis zur Aufhängebreite übereinstimmt.

Im Modell steigt der Überdruck  $D_p$  vom kleinen Wasserspiegel linear nach unten, während  $D_p$  bei der Grossausführung linear nach oben steigt. Diese Beziehungen lassen sich zur Analogie-Tabelle 2 zusammenfassen:

Zur Optimierung der lang gestreckten, praktisch zweidimensionalen Form, variiert man beim Modell die Aufhängebreite  $B$  bei konstanter Bogenlänge und füllt Wasser bis zu einer bestimmten (maximalen) Marke ein. Dann berechnet sich die (in der Folie konstante) Zugkraft  $Z_G$  aus dem Wassergewicht und dem Winkel, der sich oben im unbelasteten Teil der Folie einstellt. Aus dieser Zugkraft folgt bei der Grossausführung die erforderliche Blechstärke und mit der Blechlänge in Umfangsrichtung der Materialaufwand. Er sollte im Verhältnis zum Druckluftvolumen – analog zum Wassergewicht beim Modell – ein Minimum annehmen. Für dieses optimale Verhältnis zwischen Aufhängebreite  $B$  und Bogenlänge kann man dann die Kurvenform am Modell bei einigen Füllungsgraden ausmessen.

Vom Standpunkt des Materialaufwandes (kg Blech/gespeicherte kWh) empfehlen sich kleinere Speichereinheiten, da die massgebende Druckdifferenz  $\Delta p$  proportional zur Speicherhöhe ist. Die Anzahl der Speichereinheiten lässt sich durch grössere Länge des zylindrischen Mittelteils begrenzen. Damit der Auftrieb punktweise auf die Verankerungen zu übertragen ist, versieht man die dünne Blechhaut, wie bei einem Zelt, mit örtlichen Verstärkungen.

**Energetischer Vergleich zwischen Pumpspeichersee und Druckluftspeicher**

Dieser stichwortartige Vergleich betrifft hauptsächlich technisch-energetische Belange. Er beginnt mit fünf gemeinsamen Merkmalen beider Systeme, denen sieben unterschiedliche folgen.

Druckluftspeicher auf Seegrund	geometrisch ähnliches Modell mit Wassersack
(innerer) Wasserspiegel unten Überdruck steigt linear nach oben Aufhängekräfte $Z_A$ folgen aus Druckluft-Auftrieb $A$	Wasserspiegel oben Überdruck steigt linear nach unten Aufhängekräfte $Z_G$ folgen aus Wassergewicht $G$

Tabelle 2 Analogien zwischen Grossausführung und Modell

**Gemeinsame Merkmale**

- Beide Systeme sind durch die zulässigen Seespiegeländerungen begrenzt, die von verschiedenen Faktoren und Interessen abhängen. Für einen ersten Überblick wird zur Berechnung des Energiepotentials der 13 Seen vorausgesetzt, dass ihr Seespiegel nur um 0,2 m variiert – in [1] um 0,1 m.
- Die Gefälleschwankungen bleiben im Betrieb relativ gering, da einerseits die Tiefe eines Pumpspeichersees im Verhältnis zu seinem Gefälle und andererseits gemäss Bild 1 rechts  $h \ll H_{st}$  beim Druckluftspeicher sein wird.
- Ziemlich guter Gesamtwirkungsgrad der Energiespeicherung, der trotz vierfacher Umsetzung und Leitungsverlusten im allgemeinen mit 70% gerechnet wird – in [1] häufig mit 73%.
- Je nach Energiepotential und installierter Leistung können beide Speichersysteme zur Deckung von Tagesspitzen, zum Ausgleich der Wochenperioden oder sogar als Saisonspeicher eingesetzt werden.
- Bereitschaft zur Lieferung elektrischer Energie in kurzer Zeit.

**Unterschiede zwischen beiden Systemen**

- Die Trägheit von Druckluft ist bedeutend geringer als von Wasser in langen Leitungen, wo Druckspitzen von einem Wasserschloss übernommen werden müssen.
- Bei der Stromerzeugung eines Pumpspeichersees steigt der untere See, während er beim Druckluftspeicher fällt. Deshalb ergänzen sich beide Systeme vorzüglich an einem gemeinsamen See.
- Pumpspeicherseen haben in der Regel ein bedeutend grösseres Gefälle als es die Tiefe der Seen für die Druckluftspeicherung bietet.
- Ein Druckluftspeicher enthält ausser der sichtbaren Verdrängungsarbeit – Hebung des Seespiegels – noch unsichtbare Kompressionsarbeit. Unter der Annahme isothermer Zustandsänderungen erhöht sich die Gesamtenergie im Mittel der 13 Seen (Tabelle 3) auf das 3,42fache der Verdrängungsenergie.
- Die Arbeit der Druckluft lässt sich durch Erhitzung im Gasturbinenbetrieb ge-

mäss nächsten Abschnitt beträchtlich erhöhen.

- Im Gegensatz zu Pumpspeicherseen werden Druckluftspeicher versenkt und bleiben unsichtbar, was eine eventuelle Opposition entschärft.
- Druckluftspeicher leisten nebenbei einen Beitrag zur Gesundung der Seen, indem sie das Tiefenwasser mit Sauerstoff anreichern und für eine regelmässige Zirkulation sorgen – was zum Beispiel dem Zugersee Not täte.

**Rohrleitungen**

Ein Unterschied zwischen beiden Systemen verdient genauere Beachtung. In den Pumpspeicherprojekten [1] sind Druckschächte bis zu 7,5 m Durchmesser (bei 1040 MW) vorgesehen, um den Rohrwiderstand niedrig zu halten. Zwecks Vergleich mit dem Druckluftspeicher nehmen wir an, dass beide dasselbe Gefälle haben. Für dieselbe Leistung entspricht dann ein Durchsatz von 100 m<sup>3</sup>/s Druckluft wegen des Kompressionsfaktors 3,42 einen Wasserdurchsatz von 342 m<sup>3</sup>/s durch die entsprechende Rohrleitung.

Die geringere Dichte der Druckluft erlaubt eine 2- bis 3fache Geschwindigkeit und einen auf 1/3 der Wasserleitung verminderten Durchmesser. Dadurch sinkt die *Re*-Zahl (Strömungskoeffizient) der Druckluftleitung auf weniger als 1/10 der Wasserleitung. Die geringere Strömungsenergie der Druckluft kompensiert diesen Einfluss jedoch und führt für beide Fälle zum gleichen spezifischen Rohrwiderstand (Druckverlust  $\Delta p$  je Längeneinheit). Das bedeutet bei gleich langen Rohrleitungen auch etwa gleichen Energieverlust. Für den Unterwasserbau der Druckluftleitung, deren Auftrieb eventuell ihr Gewicht überschreitet, dürfte der reduzierte Durchmesser eine spürbare Erleichterung bringen.

**Vom Druckluftspeicher zum Wärmekraftwerk**

Ursprünglich dachte der Verfasser nur an die «kalte» Version eines Druckluftspeichers analog zum Pumpspeicherwerk, wobei die Druckluftturbine der Wasserturbine entspricht. Diese Betriebsart dürfte im Sommer angemessen sein, wenn reichlich

	$H_o$ (m)	$F_o$ (km <sup>2</sup> )	$T_{max}$ (m)	$F_u$ (km <sup>2</sup> )	$T_u$ (m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	$E_v$ (10 <sup>9</sup> m <sup>4</sup> )	$E_k$ (10 <sup>9</sup> m <sup>4</sup> )	$E_k$ (10 <sup>6</sup> kWh)	Bezeichnungen
Genfersee	372	581	310	103,3	272	116	31,5	109,0	303	$H_o$ = Seespiegel über Meer
Gardasee	65	370	346	(49)	(300)	74,0	(22,2)	(78,8)	(219)	$F_o$ = Oberfläche
Bodensee	396	541	252	61,0	196	108,0	21,2	67,5	187	$T_{max}$ = grösste Tiefe
Laggo Maggiore	193	212	372	26,7	333	42,4	14,1	51,4	143	$F_u$ = Bodenfläche im See
Comersee	198	145	412	(19,3)	(350)	29,0	(10,2)	(37,5)	(104)	$T_u$ = Bodentiefe
Neuenburgersee	429	218	153	29,3	129	43,6	5,6	15,9	44	$V = F_o \Delta T$ = Wasserverdrängung
Vierwaldstättersee	434	114	214	(5,1; 9,8)	194	22,8	4,4	14,1	39	$\Delta T = 0,2$ = Seespiegeländerung
Luganersee	271	49	288	4,0	271	9,8	2,7	9,2	26	$E_v$ = Energiepotential Wasserverdr.
Thunersee	558	48	217	11,6	208	9,6	2,0	6,5	18	$E_k$ = Energiepotential Druckluft
Zürichsee	406	90	143	9,5	116	18,0	2,1	5,8	16	$E_k / E_v = (1+10 \text{ m} / T_u) \ln (1+T_u / 10 \text{ m})$
Brienzersee	564	30	261	7,4	244	6,0	1,5	4,9	14	bei isothermer Druckänderung
Zugersee	413	8,5	198	4,1	183	7,7	1,4	4,4	12	
Walensee	419	24	150	7,3	139	4,8	0,7	1,9	5	
Total	–	2460	–	347	243	492	120	407	1130	
					(Mittelwert)					

Tabelle 3 Geographie und Energiepotential der 13 tiefsten Seen in den Alpen

Wasserkraft zur Verfügung steht. Die isotherme Expansion der Druckluft könnte man durch Zwischenerwärmung mit Seewasser annähern. Noch wirksamer wäre eine solche Erwärmung der Druckluft vor der Turbine, dass ihre Expansion auf die Umgebungstemperatur führt, wobei sich die zugeführte Wärme vollständig in zusätzliche Turbinenleistung verwandelt.

Die Maschinen können analog zum bewährten dreiteiligen Maschinensatz von Pumpspeichieranlagen angeordnet werden: in der Mitte der umschaltbare Motor-Generator und auf jeder Seite fest damit gekoppelt Turbine und Pumpe. Der nicht arbeitende Teil wird jeweils vom Wasser entleert. Das ist aber bei der Druckluftanlage nicht möglich, da die viel grösseren Druckluftturbinen und Verdichter im Leerlauf zu grossen Widerstand leisteten. Sie müssen vom Motor-Generator zu- oder abgekoppelt werden: dies bedeutet kein grösserer Aufwand als die Betätigung der entsprechenden Wasserschieber bei der Pumpspeichieranlage.

Zur Erweiterung der Druckluft-Speichieranlage als Wärmekraftwerk für den Winterbetrieb benötigt man eine Brennkammer zur Erhitzung der kalten Druckluft für eine 2. Turbine, die der ersten aerodynamisch vorgeschaltet wird. Diese 2. Turbine ist mit einem 2. Generator fest gekoppelt, der die zusätzliche Leistung in Strom verwandelt.

Anstelle der 2. Gasturbine hat sich die Vorschaltung einer Dampfturbine mit höherer Temperatur der Verbrennungsgase bewährt, die den grösseren Teil ihrer Wärmeenergie im Dampfteil abgeben. Ihre restliche Energie wird bei der Expansion in

der Druckluftturbine verbraucht. Zusammen mit der Dampfkondensation durch Seewasser ermöglicht diese kombinierte Anlage einen höheren Wirkungsgrad. Er wird jedoch mit einer grösseren Trägheit des Systems erkauft, wodurch – im Gegensatz zur zweistufigen Gasturbine – die Fähigkeit zur schnellen Lieferung elektrischer Spitzenenergie verloren geht. Immerhin bleibt diese Trägheit unter einem klassischen Dampfkraftwerk wie Chavalon (VS), das jeweils während einiger Wintermonate in Betrieb steht.

## Energiepotential der 13 tiefsten Seen in den Alpen

### Übersichtstabelle

Die meisten der in Tabelle 3 zusammengestellten Seen liegen auf Schweizer Boden bzw. in Norditalien. Sie sind gemäss ihrem Druckluft-Energiepotential  $E_k$  geordnet, wobei der Genfersee gut  $1/4$  und die nächsten drei Seen fast die Hälfte zum Gesamt-potential beitragen. Die Bezeichnungen entnehmen man Tabelle 3 rechts.

Aus topographischen Karten 1:25000 wurde anhand der Tiefenlinien eine Bodenfläche  $F_u$  ermittelt, zu der die Bodentiefe  $T_u$  (unter dem Wasserspiegel) gehört. Die als zulässig angenommene Wasserspiegeländerung,  $\Delta T = 0,2$  m für alle Seen, ergibt als entsprechende Wasserverdrängung  $V = F_o \Delta T$  infolge der zu speichernden Druckluft. Das Verdrängungs-Potential  $E_v = VT_u$  wurde mit dem in der Tabelle 3 definierten Kompressionsfaktor  $E_k/E_v$  in das Gesamt-potential  $E_k$  umgerechnet. Dieser Faktor

berücksichtigt die Kompressionsenergie der Druckluft und liegt zwischen 2,76 (Zürichsee) und 3,68 (Genfersee).  $E_v$  und  $E_k$  wurden zunächst in m<sup>4</sup> ausgedrückt und  $E_k$  in kWh umgerechnet. – Die eingeklammerten Zahlen in Tabelle 3 bei Garda- und Comersee wurden mangels Kartenmaterial geschätzt.

Die 13 Seen von Tabelle 3 haben zusammen eine Oberfläche  $F_o = 2460$  km<sup>2</sup> und ermöglichen mit  $\Delta T = 0,2$  m eine Wasserverdrängung um  $492 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> – vergleichbar dem grössten Schweizer Speichersee Grande Dixence mit  $400 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>. Diese Wassermasse wartet in über 2000 m Höhe auf das Einsatzkommando, um nicht nur kurzfristig Stromspitzen abzudecken, sondern auch um Beiträge zur kostbaren Winterenergie zu leisten. Demgegenüber erscheint das mittlere Gefälle der Druckluftspeicher am Grunde der Seen mit  $T_u = 243$  m bescheiden. Wenn man jedoch diese 243 m mit dem mittleren Kompressionsfaktor 3,42 multipliziert, erhält man als effektives Gefälle der Druckluftspeicher 830 m.

### Beispiele

Die ersten Druckluftspeicher wird man für die täglichen Verbrauchsspitzen einsetzen. Betrachten wir zum Beispiel die Region Zürich. Der Zürichsee hat gemäss Tabelle 3 ein Energiepotential  $E_k = 5,8 \cdot 10^9$  m<sup>4</sup> =  $16 \cdot 10^6$  kWh. Bei einem 8-Stunden-Rhythmus stünden als Leistung 2000 MW zur Verfügung:  $2/3$  der fünf Schweizer Kernkraftwerke. Die Druckluftspeicher in 116 m Tiefe des Zürichsees würden als breit verteilte Senke wirken, die 625 m<sup>3</sup>/s schlucken könnten, während der Abfluss im langjährigen Mittel nur 96 m<sup>3</sup>/s beträgt.

Wie würde es mit derselben Leistung am Genfersee aussehen? Die 2000 MW könnten mit dem Energiepotential  $303 \cdot 10^6$  kWh 151 Stunden – das ist fast eine Woche – geleistet werden. Dadurch fiel der Seespiegel mit 32 mm/Tag viel langsamer als im Falle des Zürichsees (25 mm/Stunde). Der entsprechende Verbrauch an Druckluft betrüge 213 m<sup>3</sup>/s, worin die über doppelte Tiefe des Genfersees zum Ausdruck kommt. Andererseits erreicht sein mittlerer Abfluss 340 m<sup>3</sup>/s.

Hier mag ein Blick auf eines der stärksten Pumpspeicherwerke der Schweiz interessieren: Hongrin/Leman. Das Gefälle von 878 m ermöglicht bei 33 m<sup>3</sup>/s Wasserentnahme 242 MW Generatorleistung. Wollte man die Absenkung des Genfersees durch den Betrieb des Druckluftspeichers (213 m<sup>3</sup>/s) mit dem Pumpspeicherwerk Hongrin kompensieren, müsste man dessen Leistung auf 1560 MW erhöhen. Dies könnte mit  $52 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> Speichervolumen nur 44 Stunden aufrechterhalten werden. Wie die meisten Pumpspeicherwerke hat auch Hongrin ein Hinterland: das auf über 90 km<sup>2</sup> vergrösserte Einzugsgebiet erhöht seine jährliche Stromproduktion um 35–40%.

#### Gesamtleistung und Gas-/Dampfturbinen-Betrieb

Tabelle 3 weist in der rechten Spalte  $E_k$   $1130 \cdot 10^6$  kWh als Gesamtpotential der 13 Seen aus. Diese Zahl lässt sich durch Vergleich mit dem Schweizer Verbrauch an elektrischer Energie 1992 veranschaulichen. Wenn das gesamte Druckluftpotential im Durchschnitt einmal wöchentlich ausgeschöpft (oder auf die Wochentage entsprechend verteilt) würde, ergäbe sich der Schweizer Jahresverbrauch 1992. (Mit dem in [1] benutzten 87% Wirkungsgrad für die Turbogeneratoren genügen 49 Entladeperioden, und für die Aufladeperioden müsste mit 84% Wirkungsgrad für Pumpe/Generator  $1/3$  mehr Energie aufgewendet werden.)

Das in Tabelle 3 zusammengestellte Energiepotential setzt keine Erwärmung der Druckluft, allerdings isotherme Expansion in Analogie zur Wasserturbine voraus. Im Gegensatz dazu nehmen wir an, dass das Turbinenpaar infolge Erhitzung der Druckluft das 2,5fache leistet. Dann könnte das eingesetzte Generatorenpaar doppelt so viel elektrische Energie abgeben wie der Motor zur Luftverdichtung benötigte.

Jetzt fragen wir uns, welche Gas-/Dampfturbinen-Leistung nötig ist, um die 27% Verluste gemäss [1] der «gut 1300 MW» aller Schweizer Speicherpumpen [2] zu decken? Es sind 825 MW, etwa 800 MW Generatorleistung. Die 825 MW Turbinenleistung wäre mit dem Gesamtpotential aller Druckluftspeicher gemäss Tabelle 3 in

1370 Stunden zu erbringen, während in [1] mit wenigen Ausnahmen 1500 Stunden vorausgesetzt wurden.

#### Ausblick

Die vorliegende Studie beschränkt sich im wesentlichen auf den geographisch-physikalischen Rahmen der Energiespeicherung mittels Druckluft am Grunde tiefer Seen. Sie findet, ebenso wie fast alle Pumpspeicherseen, ihre Begrenzung in der zulässigen Seespiegeländerung. Es dürfte den Spezialisten überraschen, dass ein Druckluftspeicher während der Stromerzeugung den Seespiegel senkt, während sonst der untere Seespiegel gehoben wird. Beide Systeme ergänzen sich also, wenn sie am selben See zusammen arbeiten, und ermöglichen die Speicherung eines höheren Energiebetrages, als wenn sie allein arbeiten.

Selbst wenn der wachsende Bedarf an Spitzenenergie in späteren Jahrzehnten durch die heute vorgesehenen Pumpspeicherprojekte befriedigt werden könnte, würde das wachsende Verluste (fast 30%) kosten. Soll die Schweiz die fehlende Energie importieren oder versuchen, ihre elektrische Selbständigkeit durch neue Wärmekraftwerke zu bewahren? Nach dem Vorschlag von de Witt arbeiten Druckluftspeicher im Sommer analog zu den bestehenden Pumpspeicheranlagen. Für den Winter werden sie zu Gas-/Dampfturbinen-Kraftwerken mit rund der doppelten Leistung erweitert, wodurch ein grosser Teil der jährlichen Umwälzverluste kompensiert werden kann. Im Gegensatz zu den frühe-

ren Kohleimporten ist die Schweiz heute an ein umweltfreundliches Erdgasnetz angeschlossen. Ausserdem dürfte die Verteilung der Druckluftspeicher an die Schweizer Seen einzelnen Grosskraftwerken vorzuziehen sein. Einem an massive Betonmauern gewöhnten Bauingenieur wird es schwerfallen, sich mit einer dünnen Blechhaut zur Speicherung von Druckluft in der Seetiefe zu befreunden. Wer aber vermöchte sich dem Trend unserer Zivilisation zum Leichtbau auf allen Lebensgebieten – von den «Schweizer Uhren» bis zur Luftfahrt – zu entziehen? Übrigens sind Ideen als Ursache aller technischen Gebilde sogar unwägbar.

Wesentliche Fragen mussten im Rahmen dieser Studie offenbleiben:

- Konstruktion und Materialwahl, Bau und Montage
- Gefährdung durch Schiffsuntergang und Überwachung analog zu Staumauern
- Zusammenarbeit mit bestehenden Pumpspeicherwerken und übrigen Kraftwerken
- Grösse und Standort, Bau- und Betriebskosten

Sobald die schwierige Standortwahl entschieden ist, könnte ein Vorprojekt beginnen.

#### Literaturverzeichnis

[1] Pumpspeicher-Möglichkeiten in der Schweiz. Mitteilungen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, Nr. 46, Bern 1972.

[2] Schnitter, Niklaus: Entwicklung der Wasserkraftnutzung im 19. Jahrhundert und Ausbau im 20. Jahrhundert. Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE Nr. 2/1992.

## Accumulation d'énergie sous forme d'air comprimé au fond des lacs pour couvrir la pointe de la demande d'électricité

Il est, de nos jours, très difficile de construire de nouvelles centrales hydrauliques en Suisse. Il en est de même en ce qui concerne les projets de centrales à accumulation par pompage en tant que fournisseurs d'énergie de pointe. L'auteur propose donc un autre moyen à cette même fin: l'accumulation d'air comprimé au fond des lacs de Suisse, pays qui en compte un grand nombre. Un tel accumulateur à air comprimé a la forme d'une coque de bateau renversée, et la statique s'inspire d'une tente dont l'étoffe est remplacée par une paroi métallique mince. Celle-ci est ouverte vers le bas, là où l'eau du lac sert de fermeture à la bulle à air comprimé. Etant donné que la pression de l'air accumulé s'adapte à la pression de l'eau au fond du lac, seules de faibles différences de pression agissent sur la calotte métallique. Alors qu'une centrale à accumulation par pompage ne peut restituer que 70% de l'énergie utilisée, un accumulateur à air comprimé peut entraîner une turbine à gaz comme centrale thermique. L'article se limite à un cadre géographique et physicomathématique et ne contient de ce fait aucune donnée détaillée sur la construction ou le bilan énergétique de telles installations.



Aare



Rhein



Mur



Donau



Saar



Lahn



Rhone

Was haben  
diese Flüsse und Ströme  
gemeinsam?

Optimal betriebene  
Wasserkraftwerke,  
mit einer  
Wasserhaushalt-Automatik  
natürlich von ...

90 Jahre

**rittmeier**

Rittmeyer ist seit 1904 ausschliesslich für die Wasser- und Energiewirtschaft tätig.

Wir entwickeln und fertigen zuverlässige und präzise **Messgeräte** für:

- Durchfluss
- Druck
- Füllstand
- Drehwinkel

Unser **RIDAT-Leitsystem** meistert alle Aufgaben zum Führen von technischen Prozessen im automatischen oder manuellen Betrieb. Die Prozessanordnung kann dabei zentral oder dezentral sein.

**Unsere Stärke** sind die umfassenden Prozesskenntnisse in der Wasser- und Energiewirtschaft. Wir liefern **schlüsselfertige Anlagen**

- von der Planung bis zur Realisierung
- vom Messgerät bis zur Leitzentrale
- von der Niederspannungsausrüstung bis zur Prozessdatenverarbeitung

**Schweiz:**

Rittmeyer AG  
Postfach 2143, 6300 Zug 2

**Deutschland:**

Rittmeyer GmbH  
Postfach 1908, 7012 Fellbach

**Oesterreich:**

Rittmeyer Ges.m.b.H.  
Postfach 69, 1152 Wien