

Bergmännisch erstellte Speichersysteme für den Bau von Luftspeicherkraftwerken

Autor(en): **Gysel, Martin / Saredi, Libero**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 18

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74803>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Bergmännisch erstellte Speichersysteme für den Bau von Luftspeicherkraftwerken

Von Martin Gysel und Libero Saredi, Baden

Für die Spitzenstromerzeugung ist man bestrebt, Luftspeicher-Gasturbinenanlagen zu entwickeln, welche die Vorteile der Pumpspeicherung auch in Flachlandregionen ermöglichen. Durch die Einschaltung von unterirdischen Druckluftspeichern zwischen Verdichter- und Turbogruppe eines Gasturbinenaggregates ist es möglich, während Schwachlastzeiten erzeugte elektrische Energie als potentielle Energie zu speichern und während Spitzenstunden wieder abzurufen. Das erste Kraftwerk dieser Art wurde auf einem Salzstock in der Gemarkung Huntorf (BRD) erstellt. Die dazugehörigen Speicherkavernen wurden im Salzstock ausgesolt.

Geeignete Felsformationen für bergmännisch ausgebrochene Kavernen sind weit verbreiteter als unterirdische Salzstöcke, weshalb das Bedürfnis entstand, verschiedene Speichersysteme in Felskavernen zu untersuchen.

Die ungünstige Auslastung eines Elektrizitätsnetzes während der Nachtstunden hat schon früh zur Entwicklung von hydraulischen Pumpspeicherwerken geführt. Derartige Anlagen erfordern einen Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterbecken und können mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur in bergigem Gelände realisiert werden. «Underground Pumped Storage» mit unterirdischem Unterbecken stellt eine – wenn auch teure – Ausweitung der Wasser-Pumpspeicherung auf flache Gelände dar [1]. Als Alternativlösung bieten sich – besonders in flachem Gelände – Druckluftspeicherwerke an. Ihre grundsätzliche Wirkungsweise entspricht der von konventionellen Gasturbinen. Die Einschaltung eines Luftspeichers zwischen Verdichter und Brennkammer erlaubt jedoch, die Förderung und Kompression der Luft zeitlich vom Turbinenbetrieb zu trennen. Der motorangetriebene Verdichter wird dabei mit Nachtstrom aus dem Netz versorgt. Die Turbinenleistung für den Verdichterbetrieb entfällt und steht somit als nutzbare Leistung zur Verfügung.

Im vorliegenden Beitrag wird das Grundprinzip der Luftspeichersysteme beschrieben, und es wird ein Variantenvergleich verschiedener Speicherbauarten dargestellt. Oberirdisch angeordnete Druckluftspeicher, z. B. in Form von Kugelbehältern, sind sehr teuer und unterirdischen Anlagen wirtschaftlich unterlegen. Als Speicherkavernen stehen zwei Varianten im Vordergrund: in Salzstöcken ausgesolte Hohlräume und bergmännisch erstellte Kavernen.

Salzstöcke sind durch ihre natürliche Wasserdichtheit für den Bau von Druckluftspeichern hervorragend geeignet. Sie können allerdings – der Wasserlöslichkeit des Salzes wegen – nur als trockene Speicher betrieben werden. Beim Bau des Gasturbinenkraftwerkes

Huntorf (BRD) – dem ersten Luftspeicherkraftwerk der Welt [2] – wurden Kavernen in unterirdischen Salzstöcken ausgesolt. Das Aussolen von Salzlagern ist mit Hilfe moderner Solstechniken wesentlich billiger als die Erstellung bergmännischer Felskavernen – vorausgesetzt, dass entsprechende Salzlagertstätten vorhanden sind.

Geeignete Felsformationen für bergmännisch ausgebrochene Speicherkavernen sind weit verbreiteter als unterirdische Salzstöcke, weshalb diese Speicherbauart allgemein von grossem Interesse ist. Im folgenden werden ausschliesslich bergmännisch erstellte Speicherkavernen untersucht.

Speichersysteme

Der Luftspeicher stellt in der heutigen Kraftwerktechnik ein neues Bauelement dar. Von der Wirkungsweise her sind zwei Speichersysteme zu unterscheiden:

- Gleichraumspeicher mit variablem Druck,
- Gleichdruckspeicher mit konstantem Druck.

Der Gleichraumspeicher (Bild 1) arbeitet nach einem einfachen Prinzip: Luft wird in den Speicher eingefüllt und bis auf einen oberen Speicherdruck p_{so} komprimiert. Beim Entladen sinkt der Druck wieder bis zum minimalen, dem Arbeitsdruck der Turbine entsprechenden Speicherdruck p_{su} ab.

Der Lade- und Entladevorgang erfolgt über eine Druckluftleitung, die – in einem Vertikalschacht geführt – das Maschinenhaus mit der Speicherkaverne verbindet.

Der Gleichdruckspeicher (Bild 2) ist ein Verdrängungsspeicher, bei dem Wasser als Verdrängungsmedium verwendet wird. Der konstante Speicherdruck wird durch eine hydrostatische Wasservorlage erzeugt. Beim Laden verdrängt die Luft das Wasser aus dem Speicher in ein oberirdisches Ausgleichsbecken; beim Entladen während des Nutzeinsatzes strömt das Wasser in den Speicher zurück. Der gewünschte Speicherdruck bestimmt die Tiefenlage der Kaverne bzw. die Wasserspiegeldifferenz zwischen Speicher und Ausgleichsbecken.

Bei diesem System ist das Problem der Luftausscheidung aus dem Wasser zu beachten:

Eine Flüssigkeit in Kontakt mit Gas unter Druck nimmt eine gewisse Menge dieses Gases in Lösung auf. Wird der Lade-/Entladevorgang längerfristig unterbrochen, kommt es zur Sättigung des Wassers. Während eines erneuten Aufladevorganges gelangt gesättigtes Wasser in den Wasserschlacht und steigt mit stetig zunehmender Geschwindigkeit auf. Dieses Ausperlen (Champagner-Effekt) würde einem Geysir ähnliche Wasserfontänen über dem Ausgleichsbecken verursachen.

Bild 1. Prinzip des Gleichraumspeichers. 1 Speicherkaverne, 2 Maschinenhaus, 3 Vertikalschacht, 4 Zugangsstollen

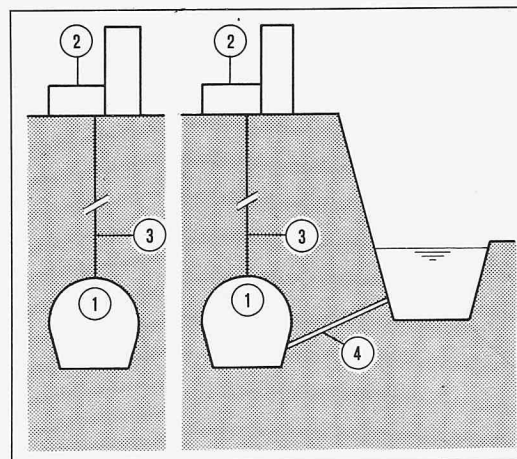
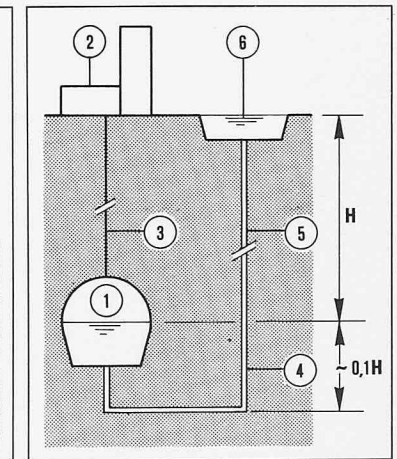


Bild 2. Prinzip des Gleichdruckspeichers. 1 Speicherkaverne, 2 Maschinenhaus, 3 Vertikalschacht, 4 Wassersiegel, 5 Wasserschlacht, 6 Ausgleichsbecken



Durch die Anordnung eines U-förmigen «Wassersiegels» unter der Speicherkaverne (Bild 2) kann ein Ausperlen verhindert werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Tiefe des «Wassersiegels» etwa 10 Prozent der hydrostatischen Höhe H betragen soll [3].

Eine interessante Alternative zum hydrostatischen Gleichdruckspeicher stellt der *Gleichdruckspeicher mit gepumpter Wasservorlage* dar (Bild 3). In die Verbindung zwischen Speicherkaverne und Ausgleichsbecken werden Pumpenturbinen eingeschaltet, die zusammen mit einer hydrostatischen Wasservorlage den gewünschten Speicherdruck herstellen. Die gepumpte Wasservorlage erlaubt somit eine sehr freie Wahl der Tiefenlage der Kaverne, wobei einzig auf eine minimale Überdeckung – abhängig von den Felsverhältnissen und den Speicherdrücken – geachtet werden muss. Während des Aufladens des Speichers können die Pumpenanlagen als Turbinen arbeiten und so einen Teil der Pumpenenergie zurückgewinnen. Ferner kann in diesem System die Luftausscheidung aus dem Wasser weitgehend kontrolliert werden.

Dieser Vorschlag des Speichersystems mit gepumpter Wasservorlage [4] zeichnet sich besonders durch wesentliche Vorteile in der praktischen Bauausführung aus. Das System kann zudem auch an einer Talflanke angeordnet werden.

Geologie

Die *Gebirgsverhältnisse* sind *mitunter ausschlaggebend* für die Standortwahl von Luftspeicherkavernen. Das Gebirge soll den Speicherdruck aufnehmen können und die Dichtheit des Hohlraumes gewährleisten.

Häufig sind die Gebirgskörper von zahlreichen *Kluftsystemen* und *tektonischen Störungen* durchzogen, die aus den inneren Verformungen während der Gebirgsbildung entstanden sind. In solchen inhomogenen und anisotropen Gebirgsformationen ist meist ein wirksames Abdichtungssystem erforderlich, um die Dichtheit des Hohlraumes sicherzustellen. Massiges, ungestörtes Gebirge ist hingegen genügend dicht, um Druckverluste im Speicher zu verhindern. In diesem Fall ist keine besondere Abdichtung erforderlich; meist sind Felssicherungsmaßnahmen zur Stabilisierung des Hohlraumes ausreichend.

Bild 4 [5] zeigt weltweit, welche Zonen für unterirdische Speicherkavernen geeignet sind. Selbstverständlich müssen – besonders in stark wechselhaftem Gebirge – die Realisierungsmöglichkeiten

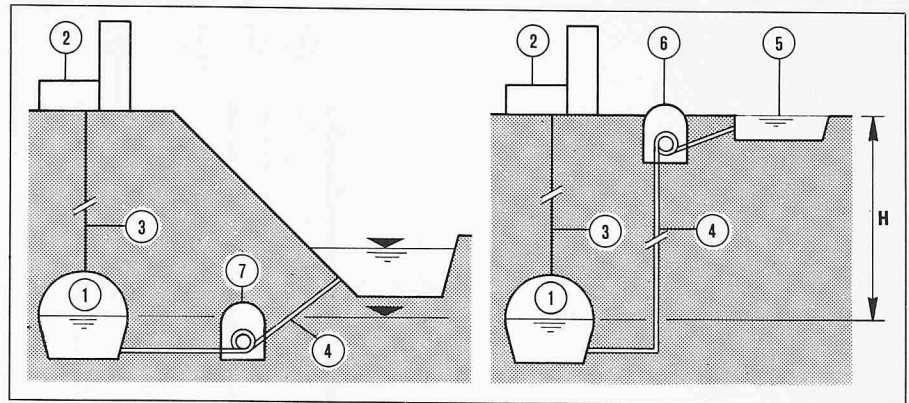


Bild 3. Prinzip des Gleichdruckspeichers mit gepumpter Wasservorlage.

1 Speicherkaverne, 2 Maschinenhaus, 3 Vertikalschacht, 4 Wasserschacht, 5 Ausgleichsbecken, 6 Druckerhöhungspumpen

Anordnung an der Talflanke

Anordnung in der Ebene

durch genauere Aufschlüsse der örtlichen Verhältnisse überprüft werden.

Kavernentechnik

Ein wesentliches Element in der modernen Kavernenbautechnik ist die Theorie der *Schutzhüllenbildung*. Sie besagt, dass durch die Herstellung eines *halb-elastischen* Ausbaues dem Gebirgsverband rings um den Hohlraum eine tragende Funktion zugewiesen wird.

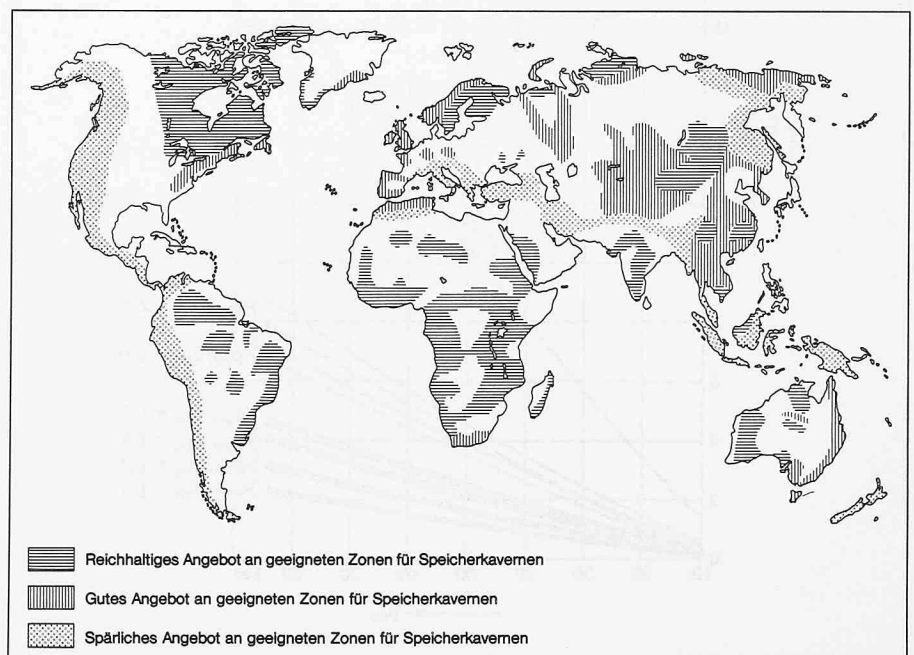
Diese Methode der Sicherung weist deutliche bautechnische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem herkömmlichen starren Verbau auf und braucht wegen der messbaren Sicherheit nicht mehr überdimensioniert zu werden. Ferner ermöglicht sie die Herstellung grosser Hohlräume ohne aufwendigen Verbau und einen zügigen Ausbruch bei kurzer Bauzeit. Dabei sind folgende *Grundsätze* zu beachten:

- Gebirgsschonender Ausbruch, um grössere Entfestigung zu vermeiden;
- Querschnittsform entsprechend dem herrschenden Spannungszustand gewölbeartig gekrümmt;
- Möglichst frühzeitiges Aufbringen des Ausbauwiderstandes, um einen Gebirgstragring um den Hohlraum zu aktivieren;
- Laufende Durchführung von Deformationsmessungen und Vergleich der Messwerte mit den Berechnungen. Damit wird der erreichte Sicherheitsgrad frühzeitig erkannt.

Diese Grundsätze erfordern jedoch eine gründliche Klärung der felsmechanischen Kennziffern, um Tragkörper und Ausbauwiderstand im voraus festlegen zu können.

Die *Spritzbeton-Ankerbauweise* kommt dem Modell des halb-elastischen Ausbaues am nächsten. Dabei dient der systematische Ankerbau vor allem der Vergütung der selbsttragenden Gebirgs-

Bild 4. Zonen geeigneter Felsformationen für bergmännisch ausgebrochene Speicherkavernen nach [5]



Reichhaltiges Angebot an geeigneten Zonen für Speicherkavernen
Gutes Angebot an geeigneten Zonen für Speicherkavernen
Spärliches Angebot an geeigneten Zonen für Speicherkavernen

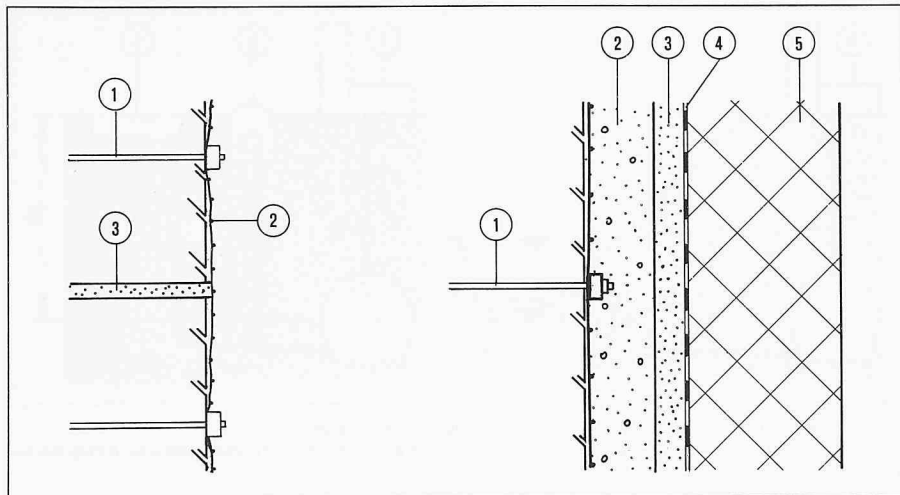


Bild 5. Mögliche Auskleidungssysteme (schematisch)

Links: In kompaktem Gebirge: 1 Felsanker, 2 Bewehrungsnetze gegen Ablösen von Gestein und Spritzbetonversiegelung, 3 evtl. Zementinjektionen

Rechts: In zerklüftetem Gebirge: 1 Felsanker (und Netze), 2 Spritzbeton (15-20 cm), 3 Feingunit (6 cm), 4 Dichtungsfolie (mehrschichtig), 5 Innenring (30-40 cm)

schale. Die Ankertiefe richtet sich nach der gedachten Dicke des Tragkörpers.

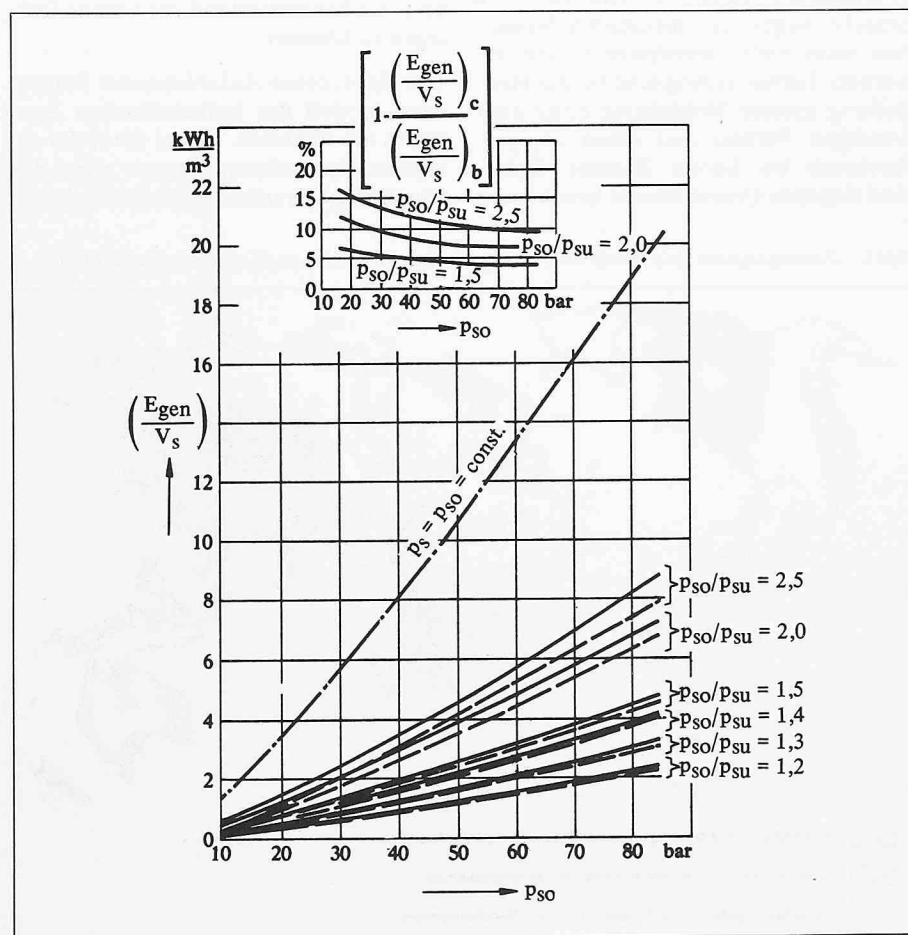
In Bild 5 sind mögliche Auskleidungssysteme in kompaktem und in zerklüftetem Gebirge dargestellt. Für die Abdichtung kommen nur Materialien in Frage, die den gestellten Anforderungen an Dichtheit, Schlitzdruckfestigkeit, Temperaturbeständigkeit usw. genügen.

Variantenvergleich

Für den Variantenvergleich der Luftspeichersysteme sind die maschinentechnischen Einzelheiten unbedeutend. Bei gleichbleibenden Arbeitsdrücken kann jede maschinentechnische Anordnung des Kraftwerkes mit jedem Speichersystem gekoppelt werden.

Bild 6. Bestimmung der Speichergrösse nach [6].

E_{gen} : Generatorenergie V_s : Speichervolumen p_{so} : oberer Speicherdruck p_{su} : unterer Speicherdruck



Auslegungsdaten

Für den Variantenvergleich wurde ein Kraftwerk-Anlagekomplex zu vier Einheiten vorgesehen. Die Festlegung der folgenden Auslegungsdaten beruht auf Erfahrungswerten aus der Kraftwerktechnik [6, 7] und soll zudem den Vergleich mit anderen bekannten Studien [3] ermöglichen.

Gesamtleistung Turbine	$4 \times 220 \text{ MW}$
Eintrittsdruck Turbine	$p_T = 45 \text{ bar}$
Energieausbeute der Luft	$E_L = 750 \text{ kJ/kg}$
Druck und Temperatur im Speicher	
- Gleichdruck	$p_s = 50 \text{ bar}$ $T_s = 60^\circ \text{C}$
- Gleichraum	$p_{so} = 70 \text{ bar}$ $p_{su} = 50 \text{ bar}$ $T_s = 45-75^\circ \text{C}$

Gesamtenergie Generator (bei 10 h Vollastbetrieb) $E_{gen} = 8,8 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

Dem Gleichdruckspeicher kann theoretisch die gesamte Luftmenge entnommen werden. Hier ist bei der definitiven Dimensionierung der Speichergrösse ein geringer Zuschlag von etwa 10 Prozent vorzusehen, um zu verhindern, dass am Ende der Entladeperiode Wasser in die Turbine gelangt.

Beim Gleichraumspeicher kann der Speicherinhalt nur teilweise genutzt werden, da der minimale Betriebsdruck der Turbine vorgegeben ist. Dies hat zur Folge, dass bei gleichen Betriebsbedingungen der Gleichraumspeicher etwa drei Mal grösser wird als der Gleichdruckspeicher.

Disposition der Anlage

Gleichraumspeicher

Die Bestimmung der Speichergrösse erfolgt gemäss Bild 6 nach [6]. Sie beträgt für diesen Speichertyp $V_s = 2\,700\,000 \text{ m}^3$ (für vier Leistungseinheiten). Die Grösse des Ausbruchquerschnittes wird je nach den Felsverhältnissen festgelegt – in unserem Fall beträgt er $A_s = 850 \text{ m}^2$. Somit ergibt sich folgende Disposition der Anlage:

- 4 Leistungseinheiten:
- 8 Kavernen zu 400 m Länge
- 1 Leistungseinheit:
- 2 Kavernen zu 400 m Länge

Die minimale Überdeckung der Speicherkaverne – ermittelt aus den felsmechanischen Kennwerten und dem oberen Speicherdruck p_{so} – beträgt etwa 150 m.

Gleichdruckspeicher

Dieser Speichertyp benötigt eine Speichergrösse von $V_s = 900\,000 \text{ m}^3$ (inkl. Zuschlag von etwa 10 Prozent). Die Grösse des Ausbruchquerschnittes ist gleich der des Gleichraumspeichers.

Das ergibt folgende *Disposition* der Anlage:

4 Leistungseinheiten:

4 Kavernen zu 270 m Länge

1 Leistungseinheit:

1 Kaverne zu 270 m Länge.

Die *Tiefenlage* der Kaverne entspricht der hydrostatischen Druckhöhe für einen Speicherdruck von 50 bar und beträgt etwa 500 m.

Die *geschätzte Bauzeit* bis zur betriebsfertigen Erstellung der Speicheranlagen variiert je nach Speichersystem zwischen fünf bis sechs Jahren für eine Leistungseinheit und zwischen sechs bis acht Jahren für vier Leistungseinheiten.

Kostenvergleich für schweizerische Verhältnisse

Zu diesem Zeitpunkt ist es relativ schwierig, einen genauen Kostenvergleich für den Bau der Speicherkavernen zu erstellen, da ein solcher von verschiedenen Kriterien abhängig ist:

- örtlich bedingte geologische Verhältnisse,
- jeweiliger Stand der Kosten für Untertagarbeiten,
- Ausrüstung und Grad der Automation,
- Bauzeit,
- Wahl der Verkleidungssysteme.

Allgemeine Kosten wie Gebühren, Erhebungen, Landerwerb usw. sind – mit Ausnahme des Landerwerbes für das Ausgleichsbecken des Gleichdruckspeichers – für den Kostenvergleich unbedeutend.

Der Kostenschätzung wurden *gute geologische Verhältnisse* zugrunde gelegt, d. h. es wurde keine besondere Auskleidung berücksichtigt. Für eine ausgekleidete Kaverne ist ein Zuschlag von etwa 30.– Fr./KW und für den Gleichraumspeicher – entsprechend dem grösseren Kavernenvolumen – ein Zuschlag von etwa 80.– Fr./KW einzurechnen.

Die Anlagekosten des Gleichraumspeichers liegen höher als die des Gleichdruckspeichers. Daraus kann man schliessen, dass beim Gleichdruckspeicher die Kosten für die tieferen Schächte und das Ausgleichsbecken wesentlich geringer sind als die Mehrkosten für das grössere Kavernenvolumen des Gleichraumspeichers.

Die spezifischen Anlagekosten der hydraulischen und gepumpten Gleichdruckspeicher liegen nahe beieinander. Für die Bauausführung weist das System mit *gepumpter Wasservorlage* jedoch folgende *Vorteile* auf:

Tabelle 1. Kostenvergleich der Speichersysteme (in Mio. Fr.)

Generatoreinheiten	Gleichdruckspeicher						Gleichraumspeicher			
	Hydrostatisch		Gepumpte Wasservorlage							
			Talflanke		Ebene		Talflanke		Ebene	
	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
Installation	14,3	39,7	8,3	27,0	9,8	30,2	13,6	51,7	14,8	57,5
Kaverne	18,8	75,0	16,6	66,4	18,8	75,0	49,5	197,7	56,2	224,7
Stollen	–	–	5,1	5,1	–	–	3,6	7,5	–	–
Schächte	23,6	30,2	0,8	0,8	5,4	7,4	1,3	1,3	3,0	5,2
Ausgleichsbecken	52	205	52	205	52	205	–	–	–	–
Baulicher Teil	61,9	165,4	36,0	120,3	38,2	133,8	67,9	258,1	74,0	287,1
Elektromechanischer Teil	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0
Unvorhergesehenes ~10%	6,1	16,6	4,5	13,4	4,8	14,2	7,1	25,9	7,0	29,6
Pumpanlage	–	–	7,5	30,0	7,0	27,0	–	–	–	–
Baukosten	71,0	190,0	51,0	172,0	53,0	183,0	78,0	292,0	84,0	325,0
Projekt- u. Bauleitung ~10%	7,0	19,0	5,0	17,0	5,0	18,0	8,0	29,0	9,0	32,0
Bauzinsen 6%	15,0	48,0	11,0	44,0	19,0	54,0	17,0	87,0	22,0	111,0
Anlagekosten	93,0	257,0	67,0	233,0	71,0	255,0	103,0	408,0	115,0	468,0
Leistung Turbine ¹ (MW)	220	880	190	758	193	771	220	880	220	880
Spez. Anlagekosten des Speichersystems (Fr./KW)	422.–	292.–	353.–	307.–	368.–	331.–	468.–	464.–	523.–	532.–

¹ Im Falle von gepumpter Wasservorlage ist die Nettoleistung massgebend: $P_{\text{Netto}} = P_{\text{Turbine}} - P_{\text{Pumpe}}$

- Freiheit in der Wahl der Höhenlage der Speicherkaverne unter Einhaltung der erforderlichen minimalen Überdeckung bei vorgegebenem Speicherdruck,
- Standortwahl unabhängig von den topographischen Verhältnissen;
- Erleichterung der Bauausführung, besonders für Systeme an der Talflanke;
- Kontrolle der Luftausscheidung aus dem Wasser.

Schlussbetrachtung

Gleichraumspeicher benötigen von der Betriebsweise her ein etwa dreimal grösseres Speichervolumen als Gleichdruckspeicher, was höhere Investitionskosten zur Folge hat. Die spezifischen Anlagekosten schwanken zwischen 460.– und 530.– Fr./KW; mit etwa 600.– Fr./KW für den Maschinenhausteil wachsen sie auf 1060.– bis 1130.– Fr./KW an. Demgegenüber liegen die Investitionskosten von Gleichdruckspeichern mit etwa 290.– bis 370.– Fr./KW bzw. 890.– bis 970.– Fr./KW für die Gesamtanlage tiefer.

Im Vergleich dazu liegen die Kosten von hydraulischen Pumpspeicherwerken in der Grössenordnung von 900.– bis 1100.– Fr./KW.

Die zu erwartenden guten wirtschaftlichen Eigenschaften lassen das Konzept der Luftspeicherkraftwerke interessant und zukunftsfruchtig erscheinen.

Literaturverzeichnis

- [1] Electric Power Research Institute (EPRI): «Underground Pumped Storage Research Priorities». Technical Planning Study, ACRES, Buffalo/New York, April 1976
- [2] Weber, O.: «Das Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf der Nordwestdeutschen Kraftwerke AG». BBC-Nachrichten, Heft 7/1975
- [3] United Technologies Research Center, East Hartford, Connecticut, USA: «Preliminary Feasibility Evaluation of Compressed Air Storage Power Systems». National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, December 1976
- [4] Hartmann, O.: «Ein neuer Weg zum Bau von Luftspeicherkraftwerken». Elektrizitätswirtschaft, Jg. 77 (1978), Heft 8
- [5] Skanska-Sentab: «Information on New Techniques for the Storage of Petroleum Products in Rock Caverns». Rockstore 77, Stockholm 1977
- [6] Zaugg, P.: «Luftspeicherkraftwerke». BBC-Nachrichten, Heft 7/1975
- [7] Herbst, H.-Chr.: «Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerk: Eine neue Möglichkeit der Spitzenstromerzeugung». VDI-Berichte Nr. 236

Adresse der Verfasser: M. Gysel, Dr.-Ing., Dipl. Bauing. ETH; L. Saredi, Bauing. HTL; Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Parkstr. 27, 5401 Baden.