

# Druckluftspeicher in den Schweizer Alpen

Nach der Annahme des Energiegesetzes ist unbestritten, dass die Energiespeicherung in der Schweiz stark ausgebaut werden muss. Es ist allerdings noch unklar, wie stark die Kapazitäten einzelner Speicherformen vergrößert werden müssen und welche Speicherverfahren sich in den kommenden Jahrzehnten auf dem Markt durchsetzen werden können.

 Zusätzlich in der App:  Video: Druckluftspeicher

Die Speicherung von überschüssiger elektrischer Energie ist heute in der Schweiz im grossen Massstab durch Pumpspeicherkraftwerke (PSKW) möglich. Der Bau zusätzlicher PSKW ist derzeit aus zwei Gründen fraglich: Erstens ist deren Wirtschaftlichkeit wegen dem geringen Unterschied der Elektrizitätspreise bei hoher und geringer Nachfrage nicht garantiert. Zweitens wehren sich Umweltschutzorganisationen gegen den Bau neuer Anlagen.

Somit stellt sich die Frage, welche Alternativen es zu PSKW gibt. Batterien werden schon lange zur Speicherung von elektrischer Energie eingesetzt. Ob Batterien jedoch in der Schweiz je in einem Mass eingesetzt werden, das es erlaubt, PSKW zu ergänzen oder zu ersetzen, ist unsicher. Das liegt zum einen an den höheren spezifischen Kosten von Batterien, d. h. den Kosten pro Kapazität oder Leistungseinheit. Zum anderen ist die höhere Umweltbelastung durch die Herstellung und Entsorgung von Batterien kritisch.

## Komprimierte Luft

Eine weitere Alternative ist die Speicherung von elektrischer Energie in Form von komprimierter Luft. Die Funktionsweise ist einfach erklärt: Überschüssige elektrische Energie wird benützt, um über einen elektrischen Motor einen Kompressor anzutreiben. Der Kompressor verdichtet Umgebungsluft. Die verdichtete Luft wird in einer Kaverne gespeichert. Bei Bedarf wird die gespeicherte verdichtete Luft in einer Turbine expandiert, welche einen Generator antreibt und elektrische Energie erzeugt. Die Funktionsweise ist somit derjenigen von PSKW sehr ähnlich, ausser dass das Speichermedium Luft anstelle von Wasser ist und dass Kavernen anstelle von Stauseen benützt werden. Auf diese Unterschiede wird im Folgenden noch eingegangen.

## Unerwünschte Wärme

Es gibt zwei grundlegende Varianten, elektrische Energie in Form von komprimierter Luft zu speichern. Der Unterschied zwischen den

beiden Varianten liegt darin, was mit der Wärme geschieht, die bei der Komprimierung der Luft entsteht. Diese Wärme ist bei der Speicherung von komprimierter Luft in Kavernen aus zwei Gründen unerwünscht: Erstens benötigt man ein grösseres Kavernen-volumen für die Speicherung einer heissen Luftmasse als für die gleiche Masse kalter Luft bei gleichem Druck. Aus Kostengründen werden kleinere Kavernen bevorzugt. Zweitens würde die heisse Luft zu thermischen Spannungen im Kavernenmaterial führen, was die Dichtigkeit oder die Integrität der Kaverne beeinträchtigen könnte. Somit ist es notwendig, die Luft nach dem Kompressor und vor dem Eintritt in die Kaverne zu kühlen.

Bei der einfacheren Variante wird die Wärme einfach an die Umgebung abgegeben, d. h. verschwendet. Das bedingt allerdings, dass vor der Expansion der nun abgekühlten komprimierten Luft wieder Wärme zugeführt werden muss, z. B. durch das Verbrennen von fossilen Brennstoffen. Diese Variante wird oft als



Einer der Betonpfropfen mit Stahltüre, die die Kaverne im Schutterstollen begrenzen.

D-CAES (nach ihrer englischen Bezeichnung «Diabatic Compressed Air Energy Storage») bezeichnet. Das Abgeben und Wiederzuföhren von Wärme resultiert in einem relativ niedrigen Wirkungsgrad von 40 bis 55 %.

Bei der komplizierteren Variante wird die Kompressionswärme nicht verschwendet, sondern in einem sich nach dem Kompressor befindenden Wärmespeicher abgegeben und vor der Expansion in der Turbine wieder aufgenommen. Damit wird das Verbrennen von fossilen Brennstoffen vermieden. Mit dieser als AA-CAES (von «Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage») bezeichneten Variante lassen sich Wirkungsgrade von bis zu 75 % erreichen.

### Günstige Alternative zu PSKW

Diese hohen Wirkungsgrade, vergleichbar mit denjenigen von PSKW, sind ein Grund, weshalb AA-CAES als eine Ergänzung zu bestehenden oder Alternative zu zukünftigen PSKW angesehen wird. Für dieses Speicherungsverfahren sprechen jedoch noch weitere Gründe: Zum einen werden die Kapitalkosten

von Luftspeicherkraftwerken (LSKW) im Vergleich zu PSKW von einer wachsenden Anzahl Studien als vergleichbar oder sogar geringer eingeschätzt. Damit wird es vielleicht möglich sein, LSKW auch bei geringen Preisunterschieden wirtschaftlich zu betreiben. Zum anderen greifen LSKW deutlich weniger in die Landschaft ein: Im Gegensatz zu PSKW müssen keine Bergtäler überflutet werden, da die Kavernen zur Speicherung der komprimierten Luft unterirdisch gebaut werden können. Besonders in der Schweiz, wo zusätzliche Speicherkapazitäten notwendig sind und der Landschaftsschutz in Bergregionen grossgeschrieben wird, ist der geringe Eingriff von LSKW in die Landschaft als wichtiges Argument einzustufen.

### Technologie im praktischen Einsatz

Ein weiterer bedeutender Vorteil von CAES gegenüber anderen Speicherkonzepten ist, dass sich die einfachere D-CAES-Variante bereits seit mehreren Jahrzehnten in der Praxis bewährt hat: Seit 1978 wird in Huntorf bei Bremen ein LSKW mit 321 MW<sub>e</sub> betrieben

und bei McIntosh im US-Gliedstaat Alabama ist seit 1991 ein LSKW mit 110 MW<sub>e</sub> im Einsatz. Für diese Kraftwerke wurden aus Salzablagerungen Kavernen von 310 000 m<sup>3</sup> und 538 000 m<sup>3</sup> ausgespült. Kavernen in Salzablagerungen haben den Vorteil, dass sie als sehr dicht gelten. Somit werden Druckverluste minimiert, die die Effizienz von LSKW vermindern würden. Allerdings sind Salzablagerungen nicht sehr weit verbreitet. In der Schweiz zum Beispiel sind nur geringe Salzablagerungen vorhanden, weshalb unterirdische Kavernen nur in Fels gebaut werden können.

### Dichte Kavernen in der Schweiz

Die Idee, komprimierte Luft in Felskavernen zu speichern, ist nicht neu. In den USA wurden Felskavernen bereits in den späten 1970er- bis frühen 1980er-Jahren untersucht. In Japan wurden in den 1990er-Jahren zwei Felskavernen in stillgelegten Bergwerken erbaut und getestet. Die Dichtheit von Felskavernen hängt sehr stark von den Felseigenschaften ab. Kavernen in brüchigem oder mit Rissen durchzogenem Fels sind nur dann zur



Sicht auf die Auskleidung in unmittelbarer Nähe des Betonpfropfens.



Sicht auf die beiden Wärmespeicher. Links befindet sich der erste Wärmespeicher, der mit einer Gesteinsschüttung gefüllt ist. Rechts der zweite Wärmespeicher, in welchem Wärme im Phasenwechsel einer in Stahlrohre abgefüllten Metalllegierung gespeichert wird.

Speicherung von komprimierter Luft geeignet, wenn sie mit zusätzlichen Massnahmen abgedichtet werden. Das Erstellen von luftdichten Auskleidungen ist allerdings nicht trivial, wie einer der Versuche in Japan gezeigt hat. In der Schweiz gibt es glücklicherweise viele Gebiete, in denen die Felsqualität sehr hoch ist. Damit wird es entweder unnötig, Kavernen mit Auskleidungen abzudichten, oder die Anforderungen an die Dichtheit der Auskleidung werden reduziert.

### Viel Erfahrung vorhanden

Diese Überlegungen zeigen, dass es auch in der Schweiz sinnvoll ist, LSKW zur Energiespeicherung und Felskavernen zur Speicherung von komprimierter Luft genauer zu untersuchen. Weitere Faktoren, die LSKW gerade für die Schweizer Energieversorgung interessant machen, sind die enorme Erfahrung von Schweizer Unternehmen im Kavernen- und Tunnelbau sowie die grosse Anzahl von stillgelegten Armeekavernen, die umgebaut und weiterbenützt werden könnten. Dass LSKW in der Schweiz sinnvoll und machbar sind, zeigt folgendes Beispiel: Eine 100 MW<sub>el</sub>-/500 MWh<sub>el</sub>-Anlage benötigt ein Kavernenvolumen von rund 170 000 m<sup>3</sup>. Dies entspricht etwa dem Volumen der Haupthalle des Hauptbahnhofs Zürich und ist etwas kleiner als das Volumen der Kavernenzentrale des PSKW Linth-Limmern.

### Weitere Forschung

Die genauere Untersuchung von adiabatischer Luftkompression als Speichertechnologie in der Schweiz ist das Ziel eines vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) im

Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 70 finanzierten Verbundprojekts. Im Projekt, das im Dezember 2015 begann und 4 Jahre dauert, arbeiten Forschende von ETH, EPFL, SUPSI und PSI mit der Firma



Blick in den ersten Wärmespeicher. Die Steine mit einem Durchmesser von rund 2-3 cm stammen aus Flussablagerungen in der Nähe von Zürich.

ALACAES zusammen. Das Ziel des Forschungsprojekts ist es, ein neues Anlagenkonzept für adiabatische LSKW theoretisch und experimentell zu untersuchen. Das neue Anlagenkonzept unterscheidet sich von anderen Konzepten in drei Punkten:

- Es werden Felskavernen benützt. Um die Kapitalkosten niedrig zu halten, wird die Kaverne entweder gar nicht oder nur zum Teil ausgekleidet.
- Der Wärmespeicher befindet sich in der Felskaverne. Somit wirken von innen und aussen die gleichen Druckkräfte auf die Wände des Wärmespeichers. Im Vergleich zu einem Wärmespeicher, der sich ausserhalb der Kaverne befindet, können die Wände dünner und einfacher gebaut werden, was die Kapitalkosten reduziert.
- Der Wärmespeicher besteht aus zwei Teilen: Im ersten Teil wird Wärme in einer Schüttung von Steinen gespeichert. Die Steine mit einem Durchmesser von etwa 2–3 cm stammen aus Flussablagerungen in der Nähe von Zürich. Der Vorteil von Steinen ist, dass sie im Vergleich zu anderen Speichermaterialien sehr billig sind und trotzdem gute thermophysikalische Eigenschaften aufweisen. Im zweiten Teil des Speichers wird Wärme im Phasenwechsel einer in Stahlrohren abgefüllten Aluminium-Kupfer-Silikon-Legierung gespeichert. Das Speichern von Wärme in dieser Legierung ist von Interesse, weil während Phasenwechseln die Temperatur bei rund 520°C konstant bleibt, was während des Entladevorgangs für die Effizienz der Tur-

bine vorteilhaft ist. Simulationen zeigen, dass solche zweiteiligen Wärmespeicher bei vergleichbarem thermischem Verhalten billiger sind als Speicher, die nur aus einer Schüttung von Steinen bestehen.

Das Verbundprojekt besteht aus vier Teilprojekten, die sich mit der ganzen Anlage (SUPSI), dem Wärmespeicher (ETH), dem Phasenwechselmaterial (EPFL) und der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Anlage (PSI) beschäftigen. In allen Teilprojekten wird eng mit ALACAES zusammengearbeitet.

#### Erste Pilotanlage

Das neue Anlagenkonzept wurde von Oktober bis Dezember 2016 mit einer der weltweit ersten Pilotanlagen eines adiabatischen LSKW bei Biasca experimentell untersucht. Die Pilotanlage wurde von ALACAES mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie BFE in einem stillgelegten Schutterstollen erbaut. Durch diesen Schutterstollen mit einem Durchmesser von 4,9 m wurde während des Baus des Gotthard-Basistunnels Aushub zu einer Aufschüttstelle transportiert. Mit zwei rund 5 m dicken Betonpfropfen wurde im Schutterstollen eine Kaverne von 120 m Länge erstellt. Das Volumen der Kaverne beträgt etwa 1942 m<sup>3</sup>. Die Oberfläche des Schutterstollens wurde beim Bau mit Spritzbeton behandelt. Mit Ausnahme der Oberfläche bei den beiden Pfropfen ist die Kaverne somit nicht mit einer Auskleidung abgedichtet. Der Teil des Wärmespeichers, der mit der Ge-

steinsschüttung gefüllt ist, ist rund 10 m lang, 3 m hoch und 2,5 m breit und hat eine maximale Kapazität von 12 MWh<sub>th</sub>. Der andere Teil des Wärmespeichers mit der Metalllegierung ist je rund 1,4 m lang, breit und hoch und hat eine maximale Kapazität von 0.14 MWh<sub>th</sub>. Die Experimente mit Ladetemperaturen bis 550°C haben sehr wertvolle Ergebnisse geliefert. So wurde zum Beispiel festgestellt, dass die Kaverne insgesamt nicht dicht war. Untersuchungen zeigten aber, dass die Undichtheiten zwischen den Pfropfen und dem Fels auftraten und dass die Kaverne sonst dicht war. Lösungen für die Undichtheiten werden zurzeit evaluiert. Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass die gemessenen und simulierten Verhalten des Wärmespeichers übereinstimmen. Erste Abschätzungen zeigen, dass die Effizienzen des Wärmespeichers bei 76 bis 90 % und der gesamten Pilotanlage bei 67 bis 78 % lagen.

#### Die Wirtschaftlichkeit noch genauer untersuchen

Das Fazit der bisherigen theoretischen und experimentellen Untersuchungen des Verbundprojekts ist, dass adiabatische LSKW technisch machbar sind. Die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit zeigen, dass LSKW mit PSKW vergleichbar sind. Die Abklärungen zur Umweltverträglichkeit haben ergeben, dass LSKW auch in diesem Kriterium mit PSKW vergleichbar sind, was ein vielversprechendes Resultat ist, da PSKW heute als die umweltfreundlichste Speichertechnologie gelten.

Diese positiven Resultate haben die Projektpartner dazu bewogen, im Rahmen der Phase II (Januar 2017 bis Dezember 2020) des von der Kommission für Technologie und Innovation finanzierten Swiss Competence Center for Energy Research on Heat and Electricity Storage vor allem die Wirtschaftlichkeit von LSKW genauer zu untersuchen. Dazu werden die im vom SNF finanzierten Verbundprojekt entwickelten Modelle von LSKW mit Modellen des Schweizer Stromnetzes und des europäischen Strommarkts gekoppelt. Mithilfe der gekoppelten Modelle wird es möglich sein, die Wirtschaftlichkeit von LSKW bei deren Auslegung in Abhängigkeit des Standortes mitzuberücksichtigen. Bei diesem Projekt sind neben den erwähnten Projektpartnern auch Amberg Engineering, BKW, MAN Turbo und Swissgrid beteiligt. ●



Blick in das Innere des zweiten Wärmespeichers. Die Stahlrohre und das Isolationsmaterial sind sichtbar.

Prof. M. Barbato (SUPSI), V. Becattini (ETH),  
S. Binder (EPFL), Dr. P. Burgherr (PSI),  
Dr. A. Haselbacher (ETH),  
Prof. S. Haussener (EPFL), Dr. C. Mutel (PSI),  
J. Roncolato (SUPSI), Dr. W. Schenler (PSI),  
Prof. A. Steinfeld (ETH),  
Dr. G. Zanganeh (ALACAES)