Energie
Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

Synthese

Stromspeicherung über adiabatische Druckluftspeicherung

Energie
Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

Stromspeicherung über adiabatische Druckluftspeicherung

Verbundsynthese

1. Stromspeicherung über adiabatische Druckluftspeicherung

Synthese des NFP-70-Verbundprojekts «Stromspeicherung über adiabatische Luftkompression»

1.1. Zusammenfassung

1.1.1. Zusammenfassung

Der Verzicht auf Kernkraftwerke und der Ausbau von Solar- und Windenergie führen dazu, dass die Stromproduktion volatiler wird. Damit Strom dann zur Verfügung steht, wenn er gebraucht wird, braucht es neue Speichersysteme.

Eine vielversprechende Technologie ist die adiabatische Druckluftspeicherung. Sie nutzt überschüssigen Strom aus Solar- und Windanlagen, um Umgebungsluft zu komprimieren und diese in einem unterirdischen Hohlraum zu speichern. Bei Bedarf wird die komprimierte Luft wieder expandiert; sie treibt dabei eine Turbine an und erzeugt wieder Strom. Da die bei der Komprimierung entstandene Wärme genutzt wird, beträgt die Effizienz 65 bis 75 Prozent; das ist ein ähnlicher Wert wie jener, den Pumpspeicher erreichen. Auch die Umweltverträglichkeit von Druckluftspeichern ist, gemessen am Treibhausgaspotenzial und an Schäden an Ökosystemen, vergleichbar mit jener von Pumpspeichern.

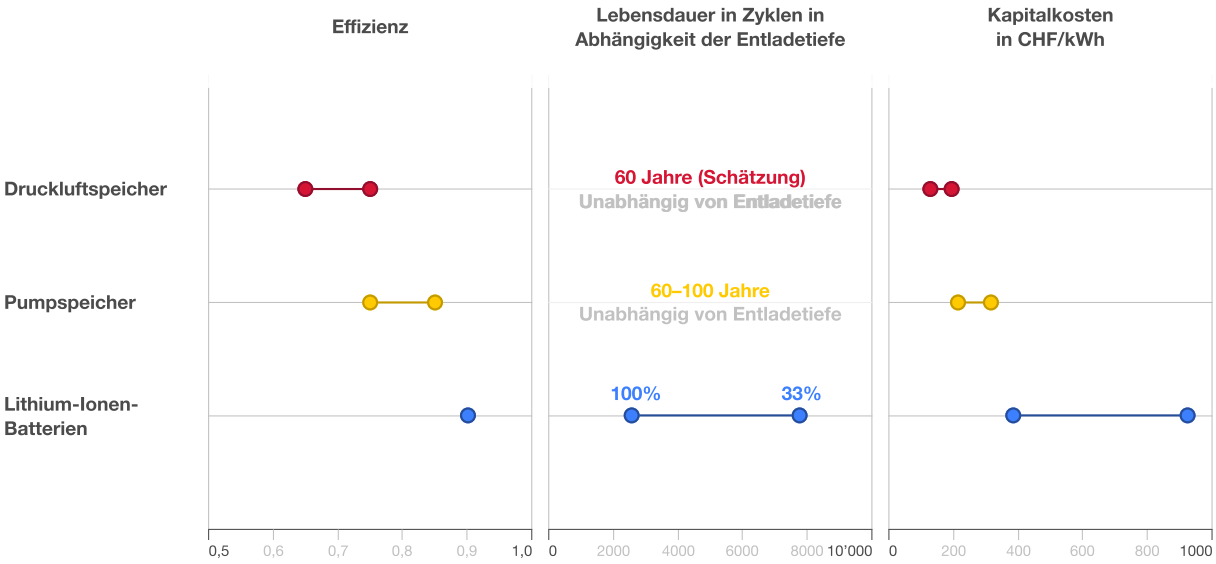
Druckluftspeicher sind technisch machbar. Wichtige Komponenten wie Turbomaschinen und Wärmespeicher sind entweder bereits auf dem Markt erhältlich oder wurden in einer Pilotanlage erprobt. Der Bau von Hohlräumen ist zudem durch die Erfahrungen im Tunnel- und Kavernenbau ausgereift.

Adiabatische Druckluftspeicher sind also eine effiziente, umweltverträgliche und technisch machbare Speicherlösung. Wegen der hohen Kapitalkosten sowie der unklaren wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen ist allerdings ungewiss, ob sie wirtschaftlich sein können. Dies erschwert auch die Finanzierung einer Demonstrationsanlage.

1.2. Kernbotschaften

Nachhaltigkeit

1.2.1. Druckluftspeicher sind effizient, technisch machbar und umweltverträglich



Grafische Übersicht vergleichender Daten zu Druckluftspeichern, Pumpspeichern und Lithium-Ionen-Batterien. *Quelle: Quellen für die Lebensdauer: C. J. Rydh und B. A. Sandén, Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies, Energy Conversion and Management, 46(11–12): 1980–2000, 2005 (für Lithium-Ionen-Batterien) und J. Giesecke, S. Heimerl und E. Mosonyi, «Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb», 6. Auflage, Springer-Verlag, 2014 (für Pumpspeicher). Quelle für die Kapitalkosten: «Lazard's Levelized Cost of Energy Storage», Version 2.0, Dezember 2016 (Umrechung 1 $ = 1 CHF).*

Im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 ist die Energiespeicherung ein viel diskutiertes Thema. Dabei sollten Druckluftspeicher grössere Beachtung finden, weil sie eine effiziente, technisch machbare und umweltverträgliche Technologie darstellen.

Die Effizienz von Druckluftspeichern mit Wärmerückgewinnung liegt bei etwa 65 bis 75 Prozent.[1] Diese Werte liegen nahe bei den von Pumpspeichern in der Praxis erzielten Werten von 75 bis 85 Prozent. Druckluft- und Pumpspeicher sind weniger effizient als Lithium-Ionen-Batterien, deren Effizienz mit etwa 90 Prozent angegeben wird. Bei diesem Vergleich muss allerdings berücksichtigt werden, dass Druckluft- und Pumpspeicher bedeutend längere Lebensdauern haben und diese – anders als bei Lithium-Ionen-Batterien – nicht von der Entladetiefe abhängen.

Dem Bau von Druckluftspeichern stehen keine grösseren technischen Hürden im Weg: Wichtige Komponenten wie Turbomaschinen, Wärmespeicher, Motoren und Generatoren sind entweder bereits auf dem Markt erhältlich oder wurden in einer Pilotanlage demonstriert – und

die Technik zum Bau von Speicherhohlräumen ist durch langjährige Erfahrungen mit Tunneln und Kavernen ausgereift. Die grösste Herausforderung ist – angesichts der hohen Investitionskosten und der unklaren rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen – die Finanzierung einer Demonstrationsanlage.

Gemessen an verschiedenen Indikatoren, etwa dem Ausstoss von Treibhausgasen, sind Druckluftspeicher ähnlich umweltverträglich wie Pumpspeicher. Gegenüber Pumpspeichern haben Druckluftspeicher den wichtigen Vorteil, dass sie komplett unterirdisch gebaut werden können und für sie keine Bergtäler überflutet werden müssen. Es ist daher anzunehmen, dass der Bau von Druckluftspeichern weniger Widerstand auslösen wird als der Bau oder Ausbau von Pumpspeichern.

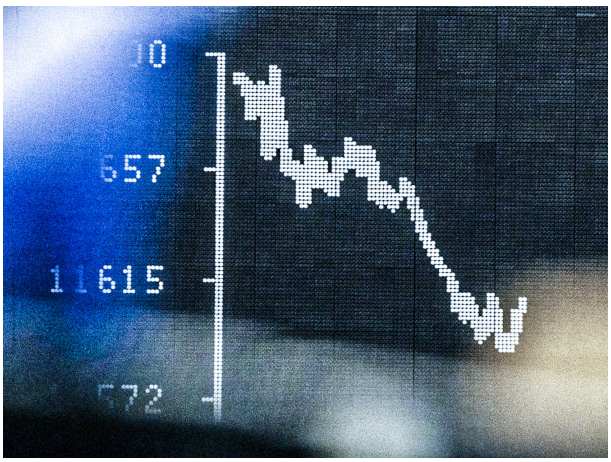
Aus diesen Gründen stellen Druckluftspeicher eine attraktive Speichertechnologie dar. In der Schweiz könnten sie zur Speicherung grosser Mengen an elektrischer Energie und als Alternative zu Pumpspeichern interessant sein. Zudem stellen Druckluftspeicher eine Chance für die Wirtschaft dar, da hiesige Unternehmen beim Bau und als Zulieferer tätig sein könnten.

Anmerkungen und Referenzen

1 Eine Effizienz von 75 Prozent bedeutet, dass von 4 kWh einzuspeicherndem Strom 1 kWh verloren geht. Die Verluste beeinflussen die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit. Eine hohe Effizienz ist vor allem bei geringen Potenzialen für Strom aus Wind- und Solarenergie wichtig.

Kosten / Nutzen # Investition # Anreize

1.2.2. Die Wirtschaftlichkeit von Druckluftspeichern ist noch unklar



Gemäss Berechnungen könnte ein Druckluftspeicher unter idealen Bedingungen im Schweizer Sekundärregelmarkt[1] rentieren. Ob er dies auch unter realistischen Bedingungen tut, bedarf weiterer Untersuchungen. Sollte dabei die Rentabilität bestätigt werden, bleibt aber weiterhin fraglich, ob ein Energieversorger einen grossen Druckluftspeicher baut. Der Hauptgrund ist das hohe Investitionsrisiko, das auf zwei Faktoren beruht: Zum einen müssen die hohen Investitionskosten während eines langen Zeitraums abgeschrieben werden; zum anderen ist unsicher, ob sich während dieser Zeit die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Energiespeicherung verändern.[2]

Nicht nur Druckluftspeicher, auch andere Speichertechnologien kämpfen mit der Rentabilität. Das liegt zum Teil an den Bedingungen zur Teilnahme an Energiemärkten, die nicht auf die technischen Eigenschaften von Speichern zugeschnitten sind. Voraussetzung für die Teilnahme am Regelleistungsmarkt sind z. B. Mindestdauern und konstante Leistungen. Die Mindestdauern können zu Speicherkapazitäten führen, die sich ungünstig auf die Rentabilität von Batteriespeichern auswirken. Die Voraussetzung, konstante Leistungen zu erbringen, kann für Druckluftspeicher eine Herausforderung darstellen, die zurzeit näher untersucht wird.

Die Verbreitung von Speichern wird nicht nur in der Schweiz, sondern auch in anderen Ländern gehemmt. So werden in Deutschland die Betreiber von Wind- und Solarenergieanlagen entschädigt, wenn der Netzbetreiber sie wegen Netzüberlastung auffordert, die Produktion zu drosseln. Dadurch entstehen falsche Anreize – es gibt für die Betreiber von Wind- und Solarenergieanlagen keine Gründe, in Energiespeicher zu investieren, um ihre Produktion zeitlich zu glätten.

Anmerkungen und Referenzen

1 Auf dem Sekundärregelmarkt bieten Energieversorgungsunternehmen elektrische Leistung an, die dazu dient, nach einer Störung das Gleichgewicht zwischen Stromproduktion und -verbrauch wiederherzustellen. Die Störung kann zum Beispiel durch den Ausfall eines

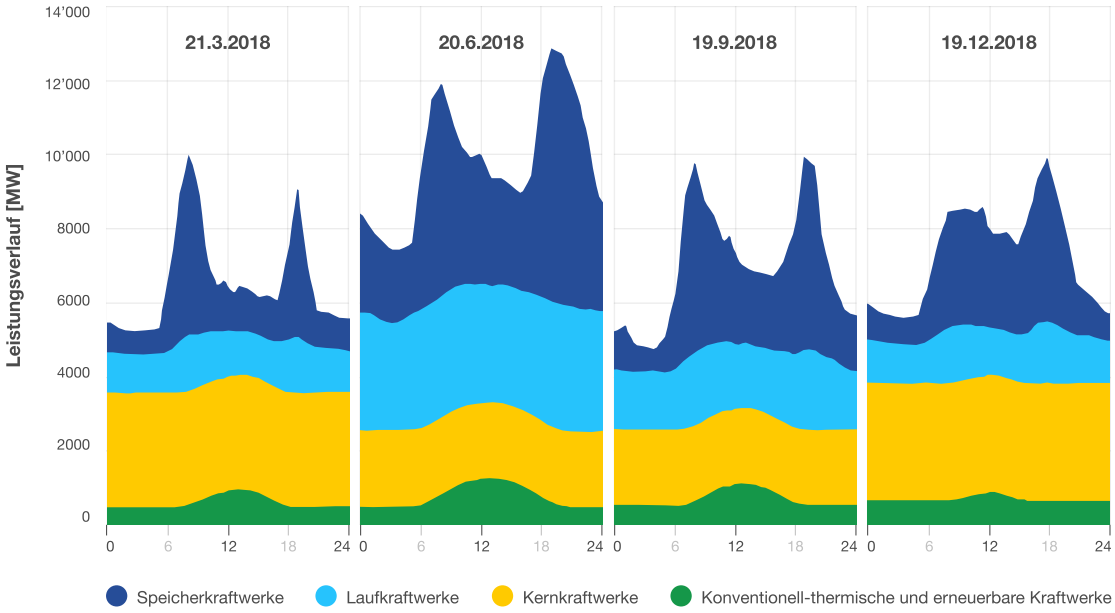
Kraftwerks entstehen.
2 Das hohe Investitionsrisiko ist nicht auf Druckluftspeicher beschränkt, sondern bremst auch den Ausbau von Stauseen. Siehe «Wo mit der Gletscherschmelze aus neuen Gletscherseen Stauseen werden könnten – und warum keiner sie bauen will», Neue Zürcher Zeitung, 20. September 2019.

1.3. Technologie mit viel Potenzial

Künftig wird die Stromproduktion volatiler – weil die Kernkraftwerke stillgelegt und gleichzeitig Wind- und Solaranlagen ausgebaut werden. Damit die Stromversorgung auch bei unregelmässiger Produktion jederzeit sichergestellt ist, braucht es grosse Stromspeicher. Adiabatische Druckluftspeicher bieten sich an, weil sie effizient, technisch machbar und umweltverträglich sind.

CO2 / Treibhausgase # Versorgungssicherheit

1.3.1. Es braucht neue Energie- und Stromspeicher



Leistungsverlauf am 3. Mittwoch der Monate März, Juni, September und Dezember 2018. *Quelle: «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2018», Bundesamt für Energie, 2019*

Der Wohlstand unserer Gesellschaft beruht auch auf der Verfügbarkeit von kostengünstiger Endenergie, also von jenen Energieformen, die von Konsumenten genutzt werden. Der schweizerische Endenergieverbrauch setzte sich 2018 wie folgt zusammen: 49 Prozent Erdölprodukte, 25 Prozent Elektrizität und 14 Prozent Gas.[1] Der Konsum von Erdölprodukten und Gas muss abnehmen, soll der Ausstoss von Treibhausgasen reduziert werden; die Bedeutung der Elektrizität nimmt folglich zu.[2 3]

Eine Besonderheit der Elektrizität ist, dass die Produktion stets mit dem täglich, wöchentlich und monatlich schwankenden Verbrauch im Gleichgewicht stehen muss. Die Schwankungen in der Produktion werden in der Schweiz gegenwärtig hauptsächlich durch den Import und den Export von Strom und durch Speicherkraftwerke aufgefangen. Der stabile Anteil, die sogenannte Grundlast, wird mehrheitlich durch Kernkraftwerke und Laufwasserkraftwerke abgedeckt.

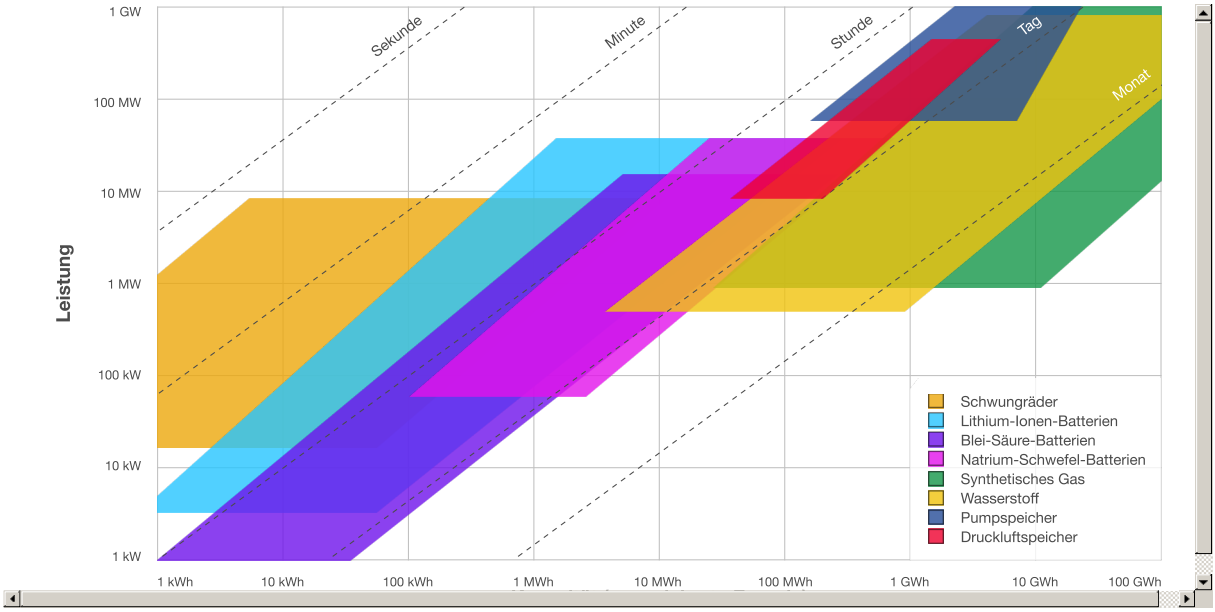
Durch den geplanten Wegfall der Kernkraftwerke steht die Schweiz vor der Herausforderung, die Grundlast künftig mit fluktuierenden Energiequellen wie der Solar- und Windenergie sicherstellen zu müssen, sofern sie nicht zunehmend von Stromimporten abhängig sein will. Dafür sind Energiespeicher nötig.

Anmerkungen und Referenzen

1 «Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018», Bundesamt für Energie.

2 G. Andersson, K. Boulouchos und L. Bretschger, «Energiezukunft Schweiz», ETH Zürich, 2011.
3 «Zukunft Stromversorgung Schweiz», Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2012.

1.3.2. Methoden der Stromspeicherung



Kapazitäts- und Leistungsbereiche sowie typische Speicherdauern, in denen verschiedene Speichertechnologien aufgrund ihrer Eigenschaften als sinnvoll erachtet werden. *Quelle: «Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030», Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2015*

Eine Besonderheit der Elektrizität ist, dass sie sich nur in relativ kleinen Mengen direkt speichern lässt. Sollen grosse Mengen gespeichert werden, muss die elektrische Energie umgewandelt werden.

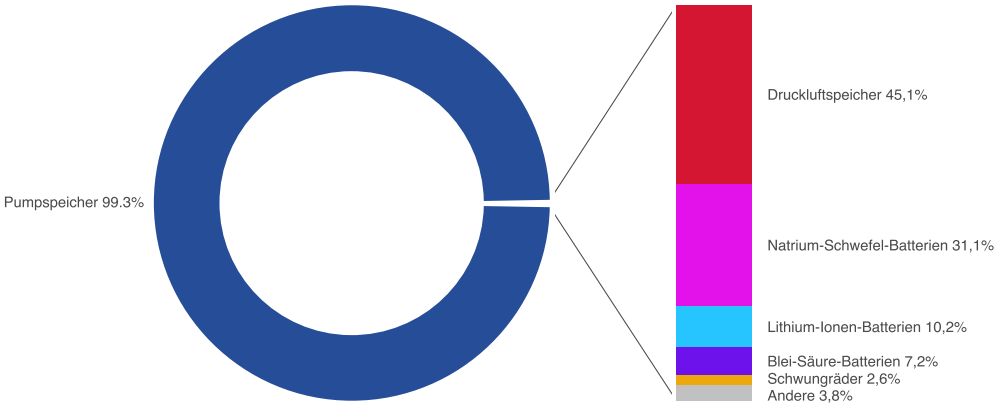
Es existiert eine breite Palette an Speichertechnologien:

- mechanische Speicher: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Schwungräder;
- chemische Speicher: Wasserstoff, synthetisches Erdgas;
- elektrochemische Speicher: Batterien;
- Wärmespeicher: sensibel, latent, thermochemisch.

Effizienz, Leistung, Kapazität, Landbedarf und Kosten der einzelnen Technologien werden durch die physikalischen Prozesse, die den Umwandlungen und der Speicherung zugrunde liegen, sowie die Komplexität der praktischen Umsetzung bestimmt. Aus diesen Kenngrössen lässt sich eine erste Bewertung der jeweiligen Speicher durchführen – und man kann daraus ableiten, in welchen Kapazitäts- und Leistungsbereichen eine bestimmte Speichertechnologie sinnvoll ist. Druckluftspeicher z. B. werden für Leistungen zwischen rund 10 MW bis rund 500 MW und Speicherdauern von mehreren Stunden bis zu etwa einem Tag als sinnvoll erachtet.

Pumpspeicher, Druckluftspeicher und Batterien werden bereits zur Speicherung grosser Mengen elektrischer Energie eingesetzt, wobei Pumpspeicher klar überwiegen.

Leistungsanteile von Stromspeichern, die bereits jetzt weltweit in Stromnetzen benützt werden.



Quelle: «Technology Roadmap Energy Storage», International Energy Agency, Paris, 2014 und «Electricity Energy Storage Technology Options», Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2010

1.3.3. Das Prinzip der adiabatischen Druckluftspeicherung

Schematische Darstellung einer adiabatischen Druckluftspeicheranlage mit einem Speicherhohlraum im Gestein. Blau und Rot zeigen tiefe (z. B. rund 20 °C) und hohe Temperaturen an, wobei «hohe Temperaturen» je nach Auslegung der Anlage zwischen 320 °C und 580 °C liegen. Die blauen und roten Pfeile zeigen die Strömungsrichtung der Luft während der Ladephase an. Während der Entladephase fliesst die Strömung in der umgekehrten Richtung.

Das Grundprinzip der Druckluftspeicherung ist einfach erklärt: Überschüssige elektrische Energie – zum Beispiel aus Solar- oder Windanlagen – treibt einen Motor an, der mit einem Kompressor verbunden ist. Dieser Kompressor saugt Umgebungsluft an. Durch die Komprimierung steigen der Druck und die Temperatur der Luft an. Die komprimierte Luft wird in einem Hohlraum gespeichert. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die komprimierte Luft durch eine Turbine zurück in die Umgebung geleitet. Die Turbine treibt einen Generator an, der wiederum elektrische Energie erzeugt.

Um möglichst viel Energie auf kleinem Raum speichern zu können, wird ein grosses Druckverhältnis benötigt, zum Beispiel 100:1. Dieses führt zu hohen Temperaturen, was zwei bedeutende Nachteile hat. Erstens müssen der Kompressor und die Turbine aus teuren Hochtemperaturmaterialien gefertigt werden. Zweitens belasten hohe Temperaturen den Speicherhohlraum umgebende Salzablagerungen oder Gesteinsformationen. Somit ist es vorteilhaft, die Luft nach der Komprimierung zu kühlen.

Die einfachste Kühlmöglichkeit ist, die Wärme an die Umgebung abzustossen. Um eine Vereisung der Turbine zu vermeiden, muss dann aber der gekühlten Luft vor der Turbine wieder Wärme zugeführt werden, etwa durch das Verbrennen fossiler Energieträger, dann spricht man von diabatischer Druckluftspeicherung. Diese Form der Druckluftspeicherung hat die Nachteile, dass Treibhausgase ausgestossen werden und dass die Effizienz bei nur rund 40 bis 50 Prozent liegt. Diabatische Druckluftspeicherkraftwerke existieren in Huntorf

(Deutschland, seit 1978) und McIntosh (USA, seit 1991).

Eine attraktivere Möglichkeit ist, der Luft vor dem Speicherhohlraum Wärme zu entziehen, diese in einem Wärmespeicher zu speichern und sie dann vor der Turbine wieder der Luft zuzuführen. Man spricht dann von adiabatischer Druckluftspeicherung. Sie stösst keine Treibhausgase aus und erzielt bedeutend höhere Effizienzen von etwa 65 bis 75 Prozent.[1] Diese Werte sind den in der Praxis erzielten Effizienzen von Pumpspeichern ähnlich.[2]

Anmerkungen und Referenzen

1 Diese Effizienzen sind Nettowerte nach Abzug der Verluste im Motor, im Generator und in der Leistungselektronik.
2 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE), «Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger: Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf», Frankfurt, 2009.

1.3.4. Fokus der Synthese

Der Fokus dieser Synthese ist die adiabatische Druckluftspeicherung in der Schweiz. Druckluftspeicher decken einen Leistungs- und Kapazitätsbereich ab, der dem von Pumpspeichern ähnelt. Im Vergleich zu Pumpspeichern bieten Druckluftspeicher bei ähnlichen Effizienzen und Umweltbelastungen einige Vorteile:

- Es werden keine Bergtäler überflutet.
- Die Kapital- und Betriebskosten werden als geringer und weniger standortsabhängig eingeschätzt.
- Druckluftspeicher arbeiten mit Luft statt Wasser; Restwasserbestimmungen und Änderungen des Wasserkreislaufs durch den Klimawandel betreffen sie nicht.

Diese Synthese fasst die Resultate von drei Projekten[1] zusammen:

- Verbundprojekt «Stromspeicherung über adiabatische Luftkompression», Schweizerischer Nationalfonds, Nationales Forschungsprogramm «Energiewende» (NFP 70) (Januar 2015 bis Dezember 2018)
- Innosuisse, Schweizer Kompetenzzentrum für Energieforschung für Wärme- und Elektrizitätsspeicherung (SCCER HaE), Phase 2 (Januar 2017 bis Dezember 2020)
- Projekt Grid-to-Grid, Bundesamt für Energie (Oktober 2017 bis Juni 2019)

In den Projekten wurden zwei Anlagenkonfigurationen untersucht, in denen die Kompression und die Expansion jeweils in Nieder- und Hochdruckstufen unterteilt sind. Nach den Kompressoren befindet sich jeweils ein Speicherhohlraum mit einem thermischen Speicher.

Der maximale Druck im zweiten Speicherhohlraum beträgt bei beiden Konfigurationen rund 100 bar.

- In der ersten Konfiguration wird die Luft im Niederdruckkompressor auf 33 bar und 580 °C komprimiert. Im Hochdruckkompressor wird die Luft von 33 auf 100 bar verdichtet.
- In der zweiten Konfiguration wird die Luft im Niederdruckkompressor nur auf 10 bar und 320 °C komprimiert. Im Hochdruckkompressor wird die Luft dann von 10 auf 100 bar verdichtet.

Der Vorteil der zweiten Konfiguration: Die niedrigeren Temperaturen lassen die Verwendung von bestehenden industriellen Kompressoren und Turbinen zu.

Beide Anlagenkonfigurationen haben eine nominelle Entladeleistung von 100 MW und eine Kapazität von 500 MWh. Daraus folgt: Der zweite Speicherhohlraum muss ein Volumen von rund 177'000 m^3 aufweisen. Das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von rund 56 m.

Anmerkungen und Referenzen

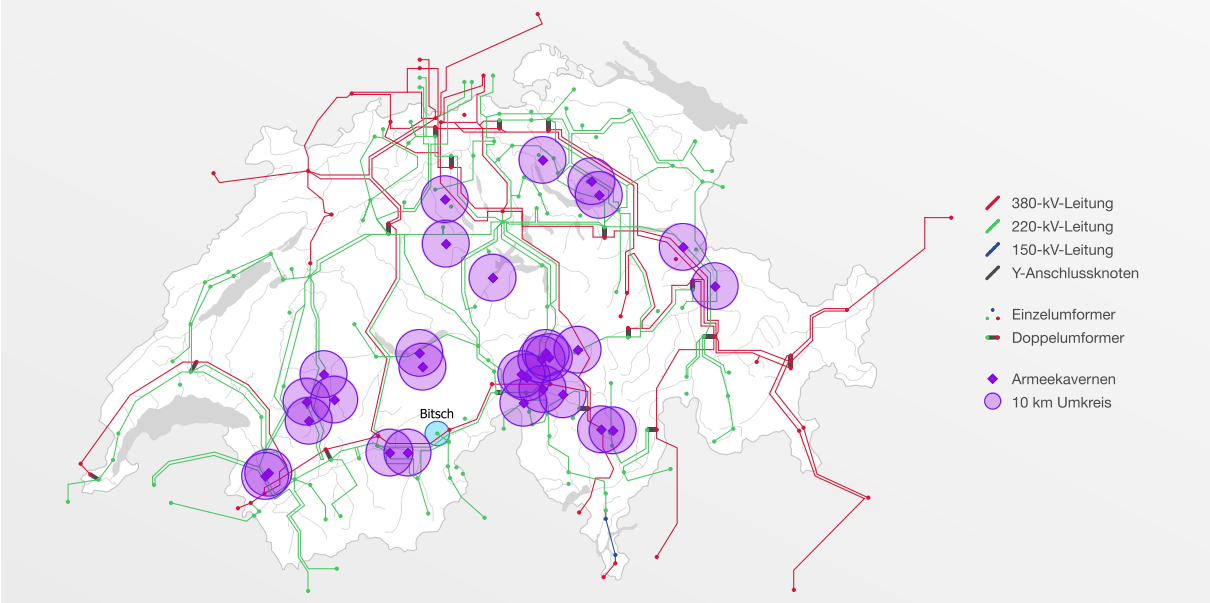
1 Diese Projekte sind eng mit einem vom Bundesamt für Energie unterstützten Pilot- und Demonstrationsprojekt verbunden, in dem bei Biasca eine Pilotanlage eines adiabatischen Druckluftspeichers (ohne Turbine) gebaut und getestet wurde – siehe G. Zanganeh, «Demonstration of the ability of caverns for compressed air storage with thermal energy recuperation», Schlussbericht, Bundesamt für Energie, November 2016.

1.4. Technische, bauliche und ökologische Herausforderungen

Wo könnten Druckluftspeicher gebaut werden? Welche Maschinen liessen sich einsetzen? Und wie schneidet der Druckluftspeicher in ökologischer Hinsicht gegenüber anderen Technologien ab?

Planung

1.4.1. Mögliche Standorte von Druckluftspeichern



Schweizer Stromnetz (Stand 2025) und Standorte von ausgewählten stillgelegten Armeekavernen. *Quelle: Swissgrid und Armasuisse*

Die Suche nach möglichen Standorten von Druckluftspeichern konzentrierte sich zuerst auf stillgelegte Armeekavernen. Deren Verwendung könnte die Kosten des Aushubs des Speicherhohlraums je nach Volumen der Kavernen reduzieren oder sogar eliminieren. Ein Vorteil wäre eine Lage in der Nähe eines Netzknotens – das würde die Kosten des Netzanschlusses des Druckluftspeichers reduzieren.

Eine genauere Betrachtung der stillgelegten Kavernen zeigte jedoch, dass sie viel kleiner sind als das benötigte Volumen von 177’000 m^3. Die meisten sind so klein, dass die Einsparung von Baukosten vernachlässigbar bleibt.

Weitere Untersuchungen zeigten auch, dass die Wiederverwendung der stillgelegten Armeekavernen zudem mit mehreren Nachteilen verknüpft ist:

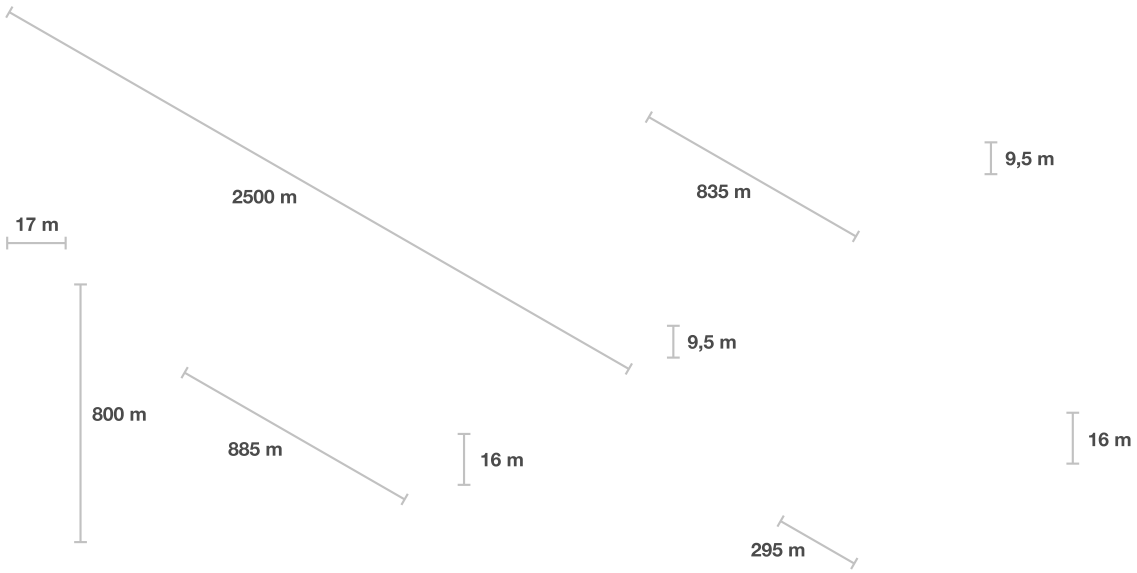
- Die Kavernen liegen zu nah an der Oberfläche; deren Überlagerung ist geringer als die 1000 m, die nötig sind, um dem maximalen Druck von rund 100 bar standhalten zu können. Ohne genügende Überlagerung sind kostspielige verstärkende Auskleidungen der Kavernen nötig.
- Die Kavernen verfügen normalerweise über mehrere Ein- und Ausgänge, die mögliche Pfade für Druckverluste darstellen.
- Die Kavernen sind normalerweise stark verästelt, was zu grossen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnissen führt. Dies begünstigt Wärmeverluste von der Luft zum Gestein.

- Der Querschnitt der meisten Kavernen ist hufeisenförmig, was zu Spannungskonzentrationen und Rissen und somit zu Druckverlusten führen kann.
- Nur wenige Kavernen befinden sich in Gebieten mit Gestein von hoher Qualität wie zum Beispiel dem Aaremassiv. Sie müssten deshalb wahrscheinlich mit einer Auskleidung abgedichtet werden.

Aus diesen Gründen wird die Wiederverwendung stillgelegter Armeekavernen nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurde entschieden, Speicherhohlräume komplett neu auszuheben. Was das bezüglich Anlagekosten bedeutet, wird innerhalb des Projekts des Schweizerischen Kompetenzzentrums für Energieforschung (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) und eines neuen Projekts des Bundesamts für Energie genauer untersucht.

Planung

1.4.2. Konstruktion von Speicherhohlräumen



Fünf Möglichkeiten, um mit Tunnel und Schächten das Speichervolumen von 177'000 m^3 zu realisieren. Der Übersichtlichkeit wegen ist das Verhältnis von Durchmesser und Länge nicht massstabsgetreu. *Quelle: Philipp Roos / Andreas Haselbacher*

Das Speichervolumen von 177'000 m^3 lässt sich auf unterschiedliche Weise erreichen. Zum Beispiel mit

- einem Tunnel mit einem Durchmesser von 9,5 m und einer Länge von 2,5 km – dies entspricht in etwa dem neuen SBB-Tunnel durch den Bözberg;
- drei parallelen Tunneln mit einem Durchmesser von 9,5 m und Längen von 835 m;
- einem Tunnel mit einem Durchmesser von rund 16 m, wie für Kavernen durchaus üblich, und einer Länge von 885 m;
- drei parallelen Tunneln mit einem Durchmesser von 16 m und Längen von 295 m.

Neben der horizontalen Ausrichtung ist auch die vertikale Anordnung in Form von Schächten möglich. Das Speichervolumen würde gut vier Schächte vom Typ Sedrun erfordern.

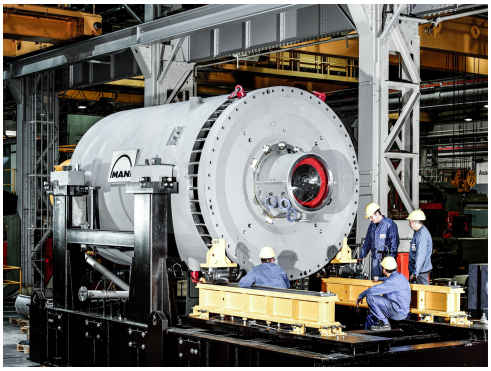
Der Bau eines Tunnels mit einer Länge von 900 m und einem Durchmesser von 9,5 m stellt bautechnisch keine grosse Herausforderung dar. Es ist davon auszugehen, dass die Hohlräume in überwiegend ungestörten Hartgesteinsformationen erbaut werden. Da noch keine ausgiebigen Versuche mit Druckluftspeichern in solchen Formationen durchgeführt wurden, gibt es nur wenige Erfahrungen mit deren Reaktion auf zyklische Druckbelastungen.

Tunnelrohbau im Ceneri-Basistunnel. Der Aushub des Speicherhohlraums eines möglichen

Druckluftspeichers in der Schweiz würde von den umfangreichen Erfahrungen von Schweizer Firmen im Bau von Kavernen, Tunneln und Schächten profitieren.

Quelle: Amberg Engineering AG

1.4.3. Turbomaschinen für Druckluftspeicher



Der Radialverdichter hat eine Länge von etwa 4 und einen Durchmesser von etwa 3 Metern. *Quelle: MAN Energy Solutions AG*

Ein Druckluftspeicher benötigt einen oder mehrere durch Elektromotoren angetriebene Kompressoren für den Lade- sowie eine oder mehrere an Generatoren gekoppelte Turbinen für den Entladevorgang. Entscheidend für die Auslegung der Turbomaschinen sind die gewünschte Leistung während der Lade- und Entladevorgänge, die maximalen und minimalen Drücke in der Kaverne und die Temperaturniveaus der thermischen Speicher. Die Turbomaschinen wiederum beeinflussen die Effizienz und die Investitionskosten des Druckluftspeichers massgeblich.

Um die Investitionskosten niedrig zu halten, sollten bereits verfügbare Turbomaschinen eingesetzt werden. Diese sind allerdings nicht auf die sehr hohen Temperaturen ausgelegt, die bei hohen Drücken entstehen. Bei der Verdichtung von Umgebungsluft auf 100 bar entsteht z. B. eine Temperatur von rund 950 °C. Deshalb ist es nötig, die Kompression in zwei Stufen durchzuführen und dazwischen die Luft mit einem thermischen Speicher zu kühlen.

Um für die Turbomaschinen und alle anderen Komponenten wie Rohre und Ventile möglichst tiefe Temperaturen zu erreichen, braucht es für die beiden Verdichtungsstufen ähnliche Druckverhältnisse. Tiefe Temperaturen ermöglichen kürzere Anfahrzeiten des Druckluftspeichers, was für dessen Betrieb und Profitabilität vorteilhaft ist. Die Verdichtung wird mit einem Axial- und einem Radialverdichter durchgeführt, während zwei Axialturbinen für die Expansion sorgen.

Für den Betrieb und die Profitabilität des Druckluftspeichers sind die Turbomaschinen aus mehreren Gründen wichtig. Zum einen entscheiden deren Effizienzen im optimalen Auslegungspunkt über die Effizienz des Druckluftspeichers. Zum anderen muss auch ihr Teillastverhalten bei reduzierter Leistung sowie ihr transientes Verhalten während des Hoch- und Herunterfahrens der Maschinen zwischen den Lade- und Entladevorgängen berücksichtigt werden. Deshalb beeinflussen z. B. die Zeit und die Energie, die zum Hochfahren der Turbomaschinen benötigt werden, in welchen Märkten der Druckluftspeicher eingesetzt werden kann.

1.4.4. Thermische Speicher für Druckluftspeicher

Blick in den sensiblen thermischen Speicher in der Pilotanlage bei Biasca. Der Speicher ist mit Kieselsteinen von einem Durchmesser von rund 2 cm gefüllt. *Quelle: Andreas Haselbacher*

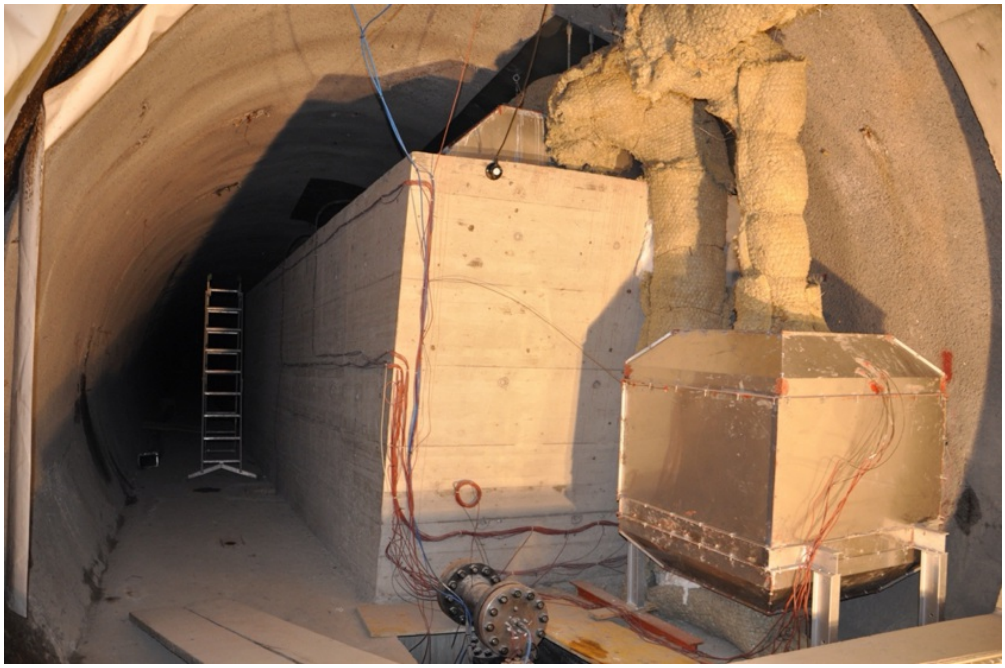
Der thermische Speicher ist die Schlüsselkomponente eines adiabatischen Druckluftspeichers: Er steigert die Effizienz des Druckluftspeichers von 40 bis 50 auf 65 bis 75 Prozent. Die höhere Effizienz wirkt sich vorteilhaft auf die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit des Druckluftspeichers aus.

Thermische Speicher sollten für den Einsatz in einem Druckluftspeicher eine Reihe von Anforderungen erfüllen:

- hohe Effizienz, also geringe Wärmeverluste;
- hohe volumetrische Energiedichte, damit das Volumen des Speichers möglichst gering ist;
- möglichst konstante Ausströmtemperatur beim Entladen, damit die Turbinen effizient arbeiten können;
- möglichst geringe Kosten.

Im Hinblick auf diese Anforderungen wurden in den Projekten zwei Typen von thermischen Speichern untersucht. Der erste Typ, ein sogenannter sensibler Speicher[1], verwendet als Speichermaterial Kieselsteine mit einem Durchmesser von etwa 2 cm aus Flussablagerungen in der Nähe von Zürich.[2] Der zweite Typ, ein sogenannter sensibel-latenter Speicher[3], nutzt zusätzlich eine in Stahlrohren gefüllte Metalllegierung als Speichermaterial und ergänzt den sensiblen Speicher. Durch das Schmelzen und Erstarren der Metalllegierung kann Energie als latente Wärme bei konstanter Temperatur gespeichert und abgegeben werden.

Sensibel-latenter thermischer Speicher in der Pilotanlage bei Biasca. Links ist der mit Kieselsteinen gefüllte sensible Speicher, rechts der latente Speicher zu sehen. Der sensible Speicher ist 3,1 m hoch, 9,9 m lang und 4 m breit. Der latente Speicher ist etwa 1,5 m hoch, lang und breit.

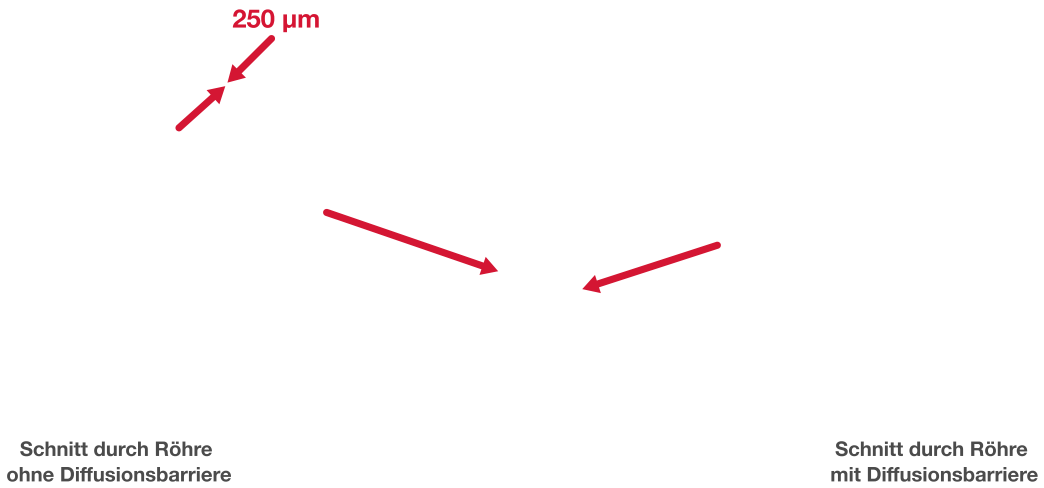


Quelle: Viola Becattini

Anmerkungen und Referenzen

1 L. Geissbühler, V. Becattini, G. Zanganeh, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Haselbacher, A. Steinfeld, «Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage», Journal of Energy Storage 17:129–139, 2018.
2 V. Becattini, T. Motmans, A. Zappone, C. Madonna, A. Haselbacher, A. Steinfeld, «Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage», Applied Energy 203:373–389, 2017.
3 V. Becattini, L. Geissbühler, G. Zanganeh, A. Haselbacher, A. Steinfeld, «Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 2: Tests with combined sensible/latent thermal-energy storage», Journal of Energy Storage 17:140–152, 2018.

1.4.5. Phasenwechselmaterialien für thermische Speicher



Das Bild in der Mitte zeigt den teilweise mit den Stahlrohren gefüllten latenten thermischen Speicher. Bei voller Füllung befinden sich 296 mit einer Aluminium-Kupfer-Silizium-Legierung gefüllte Stahlrohre im Speicher. Links ist ein Schnitt durch eine Röhre ohne Diffusionsbarriere zu sehen. Nach rund 100 Stunden bei hohen Temperaturen hat sich eine 250 µm dicke intermetallische Zwischenschicht gebildet. Rechts ist ein Schnitt durch eine Röhre mit Diffusionsbarriere zu sehen; trotz hoher Temperaturen hat sich keine intermetallische Zwischenschicht gebildet. *Quelle: Sophia Haussener (links und rechts), Viola Becattini (Mitte)*

Ein latenter thermischer Speicher nutzt ein eingekapseltes Phasenwechselmaterial als Speichermaterial. Das Phasenwechselmaterial nimmt beim Laden durch den Schmelzvorgang Wärme auf und gibt diese beim Entladen durch den Erstarrungsvorgang wieder ab. Eine Eigenheit des Phasenwechsels ist, dass die Temperatur der Schmelztemperatur des Materials entspricht, bis das gesamte Material geschmolzen oder erstarrt ist. Das erlaubt eine Stabilisierung der Ausströmtemperatur nahe der Schmelztemperatur des Phasenwechselmaterials.

Besteht der thermische Speicher sowohl aus einem sensiblen wie auch einem latenten Teil, wird beim Laden die Wärme zuerst im latenten und dann im sensiblen Teil gespeichert. Beim Entladen wird zuerst Wärme im sensiblen und dann im latenten Teil abgegeben.

Für die Versuche mit der Pilotanlage bei Biasca musste das Phasenwechselmaterial eine Schmelztemperatur von etwa 500 bis 550 °C aufweisen. Metallische Materialien sind besonders interessant, da sie eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und daher ein schnelleres Laden und Entladen des Speichers ermöglichen. Für die Versuche wurde eine Legierung aus Aluminium, Kupfer und Silizium mit einer Schmelztemperatur von 525 °C ausgewählt.

Da das Phasenwechselmaterial schmilzt, muss es in einer Kapselung gelagert werden, z. B. in einem Stahlrohr. Der latente Speicher kann dann mit mehreren Stahlrohren gefüllt werden. Bei hohen Temperaturen sind die Verkapselung und das Phasenwechselmaterial speziell reaktiv, was zur Bildung einer intermetallischen Schicht zwischen der Verkapselung und dem Phasenwechselmaterial führt. Durch das langsame Anwachsen dieser Schicht verkleinert sich die Speicherkapazität. Zusätzlich wird die Verkapselung angegriffen, was die mechanische Stabilität der Verkapselung und des latenten Speichers gefährden kann.

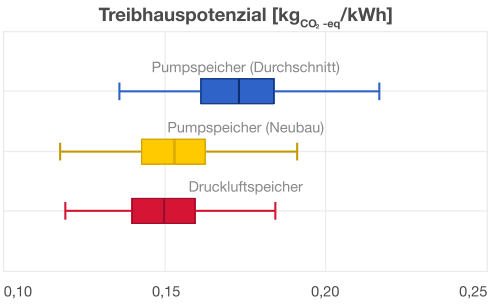
Die Bildung der intermetallischen Zwischenschicht kann mittels einer dünnen keramischen Schutzschicht verhindert werden – der sogenannten Diffusionsbarriere.[1] Dadurch verlängert sich die Lebensdauer der Stahlrohre und des thermischen Speichers.

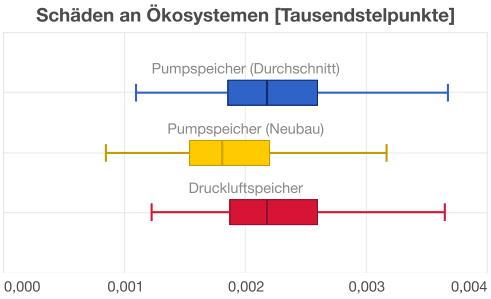
Anmerkungen und Referenzen

1 S. R. Binder and S. Haussener, «Design guidelines for Al-12 %Si latent heat storage encapsulations to optimize performance and mitigate degradation», Applied Surface Science, 143684, 2019.

Nachhaltigkeit

1.4.6. Umweltverträglichkeit von Druckluftspeichern





Treibhausgaspotenzial und Schäden an Ökosystemen von gespeichertem und wieder eingespeistem Strom (Schweizer Versorgungsmix) für Druckluftspeicher und Pumpspeicher (Neubau bzw. Durchschnitt Schweiz). Schäden an Ökosystemen werden anhand der Beeinträchtigung der Artenvielfalt durch Landverbrauch und anhand der Emission von Schadstoffen abgeschätzt. Die dargestellten Bandbreiten repräsentieren Unsicherheiten sowie potenzielle standortspezifische Unterschiede und zeigen den Median, das untere Quartil und das obere Quartil.

Eine vollständige Ökobilanz zeigt, dass Druckluftspeicher und Pumpspeicher hinsichtlich Ökologie ähnlich abschneiden. Ein genauerer Vergleich hängt von Annahmen und Vergleichskriterien ab, weshalb keine eindeutigen Aussagen gemacht werden können. Ein Beispiel: Während die untersuchten Druckluftspeicherkonfigurationen eine niedrigere Materialintensität als Pumpspeicher haben, weisen sie eine höhere Metallintensität auf. Ein klarer Vorteil von Druckluftspeichern ist, dass sie im Gegensatz zu Pumpspeichern so gut wie keine direkte Landnutzung aufweisen.

Die Umweltauswirkungen von Druckluftspeichern werden vor allem durch Energieverluste bestimmt. Bei Effizienzen von 65 bis 75 Prozent gehen 25 bis 35 Prozent der eingespeisten elektrischen Energie verloren, und diese Verluste wirken sich auf die Umwelt aus. So hat z. B. der Schweizer Stromverbrauchsmix ein Treibhauspotenzial von rund 100 g CO_2/kWh.[1] Wird dieser mittels eines Druckluftspeichers mit einer Effizienz von 75 Prozent gespeichert, liegt der zurückgespeiste Strom bei rund 135 g CO_2/kWh. Das erhöhte Treibhauspotenzial stammt zu lediglich 2 g aus der Speicheranlage – die restlichen 33 g entstammen der verlorenen Energie. Daher kann es ökologisch sinnvoll sein, fortschrittliche Materialien wie

Phasenwechselmaterialien einzusetzen, wenn sie die Effizienz des Druckluftspeichers erhöhen – auch wenn die Materialien selbst die Umwelt stärker belasten. Den grössten Nutzen weisen Druckluftspeicher auf, wenn sie zur Speicherung von überschüssigem Strom z. B. aus Wind- und Solaranlagen eingesetzt werden und damit aus fossilen Energieträgern produzierten Strom ersetzen.

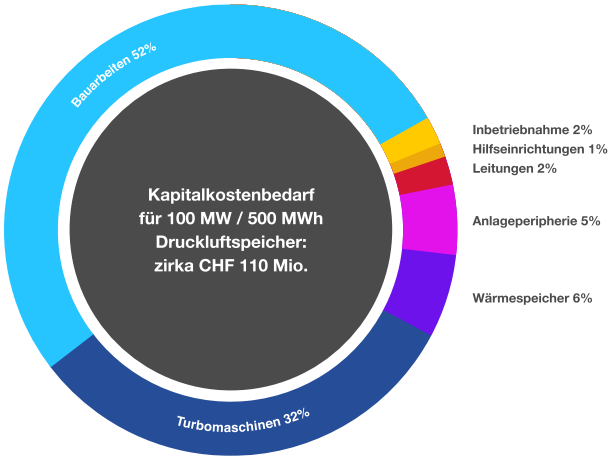
Den Grossteil der Umweltauswirkungen eines Druckluftspeichers verursachen Metalle. Diese stecken hauptsächlich in der Infrastruktur, z. B. in den Turbomaschinen, Generatoren und Umspannwerken.[2] Die Auswirkungen der Metalle könnten durch Recycling reduziert werden. Der Aushub des Speicherhohlraums und der Abtransport des Ausbruchsmaterials sind dagegen vernachlässigbar.

Anmerkungen und Referenzen

1 G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, «The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology», The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9):1218–1230, 2016.
2 Folgende Lebensdauern wurden angenommen: Speicherhohlraum 60 Jahre, Wärmespeicher 40 Jahre, Turbomaschinen 25 Jahre.

Kosten / Nutzen

1.4.7. Kapital- und Betriebskosten von Druckluftspeichern



Relative Anteile diverser Komponenten an den Kapitalkosten eines Druckluftspeichers mit 100 MW Leistung und 500 MWh Kapazität. Kosten für elektrische Komponenten wie Motoren und Generatoren sind unter «Anlagenperipherie» einberechnet.

Die Kapital- und Betriebskosten von Druckluftspeichern ähneln denen von Pumpspeichern; beide Speicherarten bestehen aus ähnlichen Hauptkomponenten wie Turbomaschinen, Hohlräumen und Hochspannungselektronik. Da Druckluftspeicher jedoch keine Staudämme benötigen, sind die Kosten weniger ortsspezifisch und liegen schätzungsweise um etwa 20 bis 30 Prozent tiefer als bei Pumpspeichern. Für einen Druckluftspeicher mit einer Leistung von 100 MW und einer Kapazität von 500 MWh ist von einem Kapitalkostenbedarf von zirka CHF 110 Mio. auszugehen, das entspricht 200 bis 300 CHF/kWh an installierter Kapazität. Die jährlichen Betriebskosten betragen zirka 2,5 Prozent der Kapitalkosten.

Die Bauarbeiten machen über die Hälfte der Kapitalkosten aus. Sie umfassen unter anderem den Bau des Zugangstunnels, der Speicherhohlräume, des Abschlusspfropfens und der Abdichtungsvorrichtung. Die Turbomaschinen sind für 32 Prozent der Kapitalkosten verantwortlich und die Wärmespeicher, das Herzstück eines adiabatischen Druckluftspeichers, für 6 Prozent.

Die Kapitalkosten von Druckluftspeichern betragen in etwa die Hälfte der Kapitalkosten von Batteriespeichern, wobei die Kosten für Batterien weiter sinken werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauer von Druckluftspeichern – ähnlich wie bei Pumpspeichern – mindestens 60 Jahre beträgt, jene für Batterien lediglich 10 bis 15 Jahre. Somit sind Druckluftspeicher über den Lebenszyklus erheblich günstiger als Batteriespeicher.

1.5. Wirtschaftliche Herausforderungen

Rund um die Finanzierung von Druckluftspeichern sind noch Fragen offen. Man schätzt zwar, dass die Kapitalkosten pro kWh unter jenen von Pumpspeichern liegen, aber ob ein Druckluftspeicher rentieren kann, ist noch nicht klar.

Markt

1.5.1. Welcher Einsatz ist sinnvoll?

Um die Wirtschaftlichkeit eines Druckluftspeichers zu beurteilen, muss analysiert werden, wie verschiedene Speicherkonfigurationen in bestehenden Märkten eingesetzt werden können. Bisher wurden zwei Anwendungen untersucht:

- Strompreisarbitrage
- Sekundärregelleistung

Künftig wird untersucht, wie sich Prognoseunsicherheiten und Annahmen sowie weitere Anwendungen und deren Kombinationen auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.

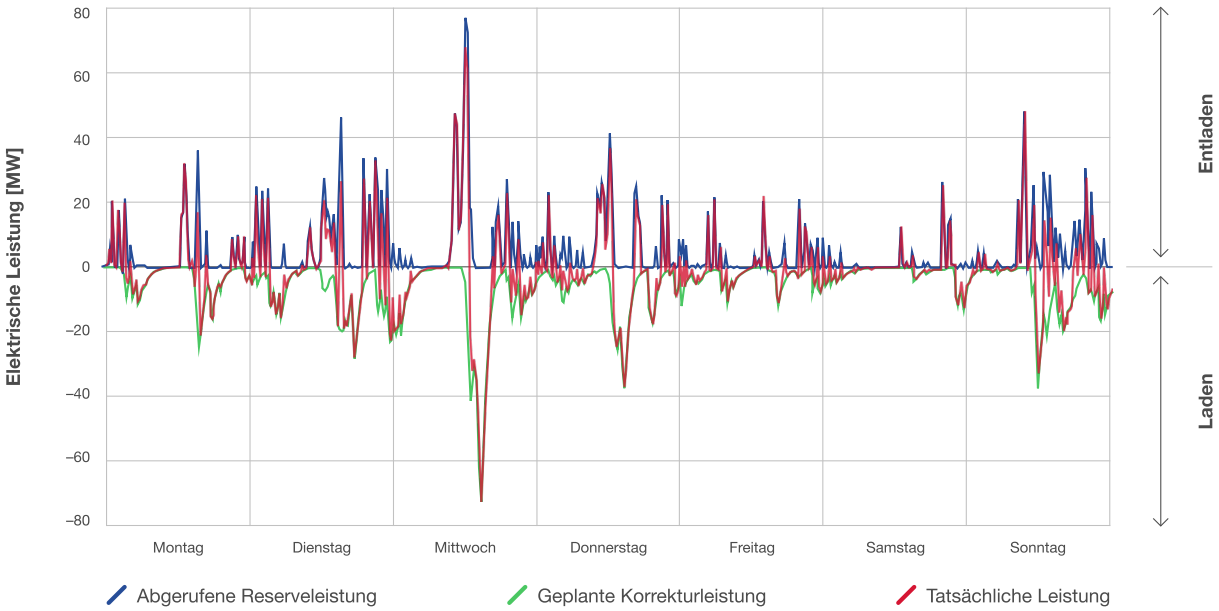
Markt # Preis # Kosten / Nutzen

1.5.2. Einsatzmodell «Strompreisarbitrage»

Die Strompreisarbitrage basiert darauf, dass Strom gespeichert wird, wenn der Strompreis niedrig ist – und wieder ins Netz eingespeist, wenn der Preis – meistens einige Stunden später – hoch ist. Um die Wirtschaftlichkeit von Arbitrage zu untersuchen, wurde das Stromnetz der Schweiz und das der angrenzenden Länder im Jahr 2025 mit und ohne Druckluftspeicher simuliert. Anschliessend wurden die Kosten zur Deckung des Strombedarfs verglichen. Zehn Anlagenstandorte wurden untersucht, um zu bestimmen, welcher Standort zu den geringsten Deckungskosten führt. Die Resultate zeigen, dass Druckluftspeicher die Deckungskosten verringern können und ein Speicher bei Bitsch im Wallis die geringsten Kosten aufweist. Sie zeigen aber auch, dass Arbitrage für Druckluftspeicher wegen der geringen Preisunterschiede und der Verluste von etwa 30 Prozent aktuell nicht rentabel ist.

Markt # Preis # Kosten / Nutzen

1.5.3. Einsatzmodell «Sekundärregelleistung»



Einsatz eines Druckluftspeichers für Sekundärregelleistung. Die abgerufene Reserveleistung (blau) entspricht einem Signal von Swissgrid. Zum Ausgleich des Ladestands wird verzögert Korrekturleistung (grün) auf dem Intraday-Markt beschafft. Die tatsächliche Anlagenleistung (rot) wird entweder durch die Turbine oder den Kompressor erbracht.

Der Sekundärregelmarkt dient dem Ausgleich von Prognosefehlern und Ausfällen von Lasten oder Erzeugungseinheiten. Es wurden verschiedene Anlagenkonfigurationen für das Jahr 2018 simuliert. Die Simulationen basieren auf der Annahme, dass die Anlagen Teillast erbringen und den mittleren Preis für Reserveleistung erzielen können. Die Abbildung zeigt die Leistungsverläufe für eine Anlage mit 100 MW Leistung während einer Beispielwoche im Januar. Die effektive Anlagenleistung wird entweder durch die Turbine (positive Leistung) oder den Kompressor (negative Leistung) erbracht. Zum Ausgleich des Ladestands wird auf dem Intraday-Markt verzögert Korrekturleistung beschafft. Für viele Anlagenkonfigurationen kann ein interner Zinsfuss von 10 bis 15 Prozent erzielt werden. Aufgrund der Annahmen ergeben diese Ergebnisse einen optimistischen Ausblick für diese Anwendung.

Markt # Kosten / Nutzen # Investition # Energieversorger

1.5.4. Beurteilung von Druckluftspeichern aus Sicht eines Energieunternehmens

Durch die hohe Effizienz, die lange Lebensdauer und die Umweltverträglichkeit bieten Druckluftspeicher eine attraktive Option, dem Stromnetz und den Strommärkten Flexibilität zu verleihen. Flexibilität war zwar schon immer wichtig, wird aber künftig wegen des Ausbaus von Wind- und Sonnenenergie weiter an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus wird die Übertragungskapazität einiger Teile des Netzes mit dem Ausbau von Wind- und Sonnenenergie nicht Schritt halten können. Die strategische Platzierung von Druckluftspeichern könnte dazu beitragen, teure und zeitaufwendige Erweiterungen des Übertragungsnetzes zu verzögern oder gar zu vermeiden.

Nach aktuellen Markteinschätzungen und dem erwarteten Ausbau erneuerbarer Energiequellen könnte der Betrieb von grossen Energiespeichern wie Druckluftspeichern ab 2030 attraktiv sein. Um sicherzustellen, dass grosse Speicher dann einsatzbereit sind, braucht es Investitionen und Unterstützung durch die Industrie. Zudem müssen Hindernisse überwunden und noch offene Fragen beantwortet werden:

1. Die rechtlichen Rahmenbedingungen müssen klar definiert werden, um zur Entwicklung und Implementierung von Energiespeichern anzuregen. Zurzeit fehlen die finanziellen Anreize – oder sie sind für die Energiespeicher im Vergleich zu den Anreizen für die Installation neuer erneuerbarer Energiequellen unzureichend.
2. Obwohl weitgehend Einigkeit darüber besteht, dass Energiespeicher benötigt werden, ist noch sehr ungewiss, wie gross die Speicherkapazität sein muss und wie diese optimal verteilt werden soll. Ohne mehr Gewissheit über den künftigen Bedarf wird es

besonders herausfordernd, Investoren für die Unterstützung einer Pilot- oder Demonstrationsanlage zu finden.

Angesichts der aktuellen Kostenschätzungen und der erwarteten Strompreisentwicklung ist es schwierig, einen verlässlichen Anwendungsfall für den profitablen Betrieb von Druckluftspeichern zu formulieren. Simulationen haben zwar gezeigt, dass dank hohen Zusatzerlösen aus Sekundärdienstleistungen und Intraday-Handel Profitabilität erreicht werden kann, aber Prognosen sind immer noch äusserst schwierig und unsicher.

Regulierung # Markt # Finanzierung

1.5.5. Handlungsbedarf: wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen klären

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Die Pilotanlage bei Biasca hat gezeigt, dass Druckluftspeicher technisch machbar sind und dass sich eine Effizienz von 65 bis 75 Prozent erreichen lässt.
- Die geschätzten Kapitalkosten pro kWh liegen bei Druckluftspeichern unter jenen von Pumpspeichern.
- Ein Druckluftspeicher mit einer Leistung von 100 MW und einer Kapazität von 500 MWh wäre bei idealem Teillastverhalten im Sekundärregelmarkt bereits 2018 profitabel gewesen.
- Die Umweltverträglichkeit von Druckluftspeichern lässt sich mit jener von Pumpspeichern vergleichen.

Druckluftspeicher sind technisch machbar, effizient und umweltverträglich, zudem könnten sie auch wirtschaftlich sein. Weitere Untersuchungen sind Ende 2020 abgeschlossen. Bestätigen sich die bisherigen Erkenntnisse, sollte eine vollständige Anlage gebaut und im Netzbetrieb getestet werden.

Selbst für kleine Anlagen gibt es allerdings nur wenige Finanzierungsinstrumente. Das Bundesamt für Energie zum Beispiel finanziert bei Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten in der Regel 40 Prozent der Kosten bis CHF 5 Mio. Somit müssen Industrie und Investoren selbst bei kleinen Anlagen erhebliche Beträge einsetzen. Das

Investitionsrisiko wird wegen der ungewissen Entwicklung des Strommarkts sowie der ungeklärten wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen als beträchtlich eingestuft. Das vielleicht wichtigste rechtliche Hindernis ist, dass zurzeit nur Pumpspeicher von Netzentgelten befreit und diese damit wirtschaftlich bevorteilt sind.[1] Bei grossen Anlagen ist das Investitionsrisiko wegen der langen Lebensdauer und der damit verbundenen Ungewissheiten über die künftigen Märkte noch grösser.

Durch die ungeklärten Rahmenbedingungen wird die weitere Entwicklung einer sinnvollen Speichertechnologie gehemmt. Dies kann dazu führen, dass sie nicht marktreif ist, wenn sie wegen des Ausbaus der erneuerbaren Energiequellen nützlich sein könnte. Daher müssen die wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt werden.

Anmerkungen und Referenzen

1 Die Bevorteilung der Pumpspeicher ist im Stromversorgungsgesetz verankert (SR 734.7, Artikel 4, Absatz 1b). Zurzeit ist im Parlament eine Interpellation (18.4055 vom 28. September 2018) hängig, die eine technologieneutrale Behandlung von Stromspeichern fordert. Rechtliche Rahmenbedingungen für Energiespeicher und mögliche Anpassungen werden in S. Walther, «Regulierung von Energiespeichern in der Schweiz», Dike Verlag AG: Zürich / St. Gallen, 2019, näher untersucht.

Regulierung # Finanzierung

1.5.6. Handlungsbedarf: Verfahren zum Bau von Speicherhohlräumen klären

Bezüglich des Baus einer Druckluftspeicheranlage in der Schweiz müssen zwei grundlegende Fragen geklärt werden.

Erstens: Die rechtliche Lage bezüglich eines Baus im Untergrund scheint unklar zu sein. Es gibt zurzeit kein entsprechendes Gesetz auf Bundesebene, weshalb die Kantone über die Nutzung des Grunds unter öffentlichem und nicht kulturfähigem Land entscheiden.[1] Die rechtlichen Situationen sind auf kantonaler Ebene unterschiedlich. Wegen der steigenden Nutzung des Untergrunds, z. B. durch die Geothermie oder die Speicherung von Erdgas und CO_2, gibt es jedoch Bestrebungen zur Klärung der rechtlichen Situation.[2] [3] Trotz der Unklarheiten ist zu erwarten, dass der Bau von Druckluftspeichern zum Teil von den Erfahrungen beim Bau unterirdischer Strukturen wie Maschinenzentralen von Pumpspeichern profitieren wird.

Zweitens: Es ist nicht klar, welche Gesetze und Verordnungen bezüglich der unterirdischen Speicherung von Luft bei hohen Drücken zur Anwendung kommen könnten. Weil Luft an sich nicht entzündlich ist, scheint das Bundesgesetz 746.1, das die Speicherung von flüssigen und gasförmigen Brenn- und Treibstoffen regelt, nicht relevant zu sein.[4] [5]

Da keine klar definierten gesetzlichen Auflagen existieren, ist zu erwarten, dass vor dem Bau des ersten grossen Druckluftspeichers in der Schweiz eine umfangreiche Risikoanalyse durchgeführt werden muss. Bisher scheinen nur Risikoanalysen für diabatische Druckluftspeicher mit Speicherhohlräumen in Salzablagerungen oder leeren Gaslagerstätten durchgeführt worden zu sein.

Ein offensichtliches Risiko ist das rasche, explosionsartige Entweichen der komprimierten Luft. Bei den bestehenden Anlagen in Huntorf und McIntosh gibt es keine Anzeichen dafür, dass in den Salzkavernen je ein solches Ereignis bevorstand. Bei Druckluftspeichern mit Speicherhohlräumen im Gestein könnte solchen Ereignissen vorgebeugt werden, indem die Verformung des Speicherhohlraums überwacht und der Druck bei ungewöhnlichem Verhalten umgehend reduziert wird. Solche Messungen wurden bereits in der Pilotanlage im Tessin durchgeführt.[6]

Anmerkungen und Referenzen

1 G. Ruiz, «Niemandsland unter der Schweiz», Horizonte Nr. 118, Schweizerischer Nationalfonds, September 2018.
2 A. Abegg und L. Dörig, «Rechtsgutachten: Untergrund im Recht», Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, School of Management and Law, Winterthur, Oktober 2018.
3 «Geologische Daten zum Untergrund», Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats Vogler 16.4108 vom 16. Dezember 2016, Dezember 2018.
4 P. L. Hendrickson, «Legal and Regulatory Issues Affecting Compressed Air Energy Storage», Bericht PNL 3862, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, USA, Juli 1981.
5 M. C. Grubelich, S. J. Bauer und P. W. Cooper, «Potential Hazards in Compressed Air Energy Storage in Depleted Natural Gas Reservoirs», Bericht SAND2011-5930, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, September 2011.
6 G. Zanganeh, «Demonstration of the ability of caverns for compressed air storage with thermal energy recuperation», Schlussbericht, Bundesamt für Energie, November 2016.

1.6. Empfehlungen

Bezüglich adiabatischer Druckluftspeicherung liegen die Fakten auf dem Tisch: Die Technologie ist umweltverträglich, effizient und sicher. Um ihr zum Durchbruch zu verhelfen, braucht es aber weitere Massnahmen, vor allem seitens der Politik, der Energieversorger und der Verbände.

Politik (Bund, Kanton, Gemeinde)

1.6.1. Energiespeicherstrategie erstellen!

Die Politik muss klare wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen schaffen – und eine «Energiespeicherstrategie 2050» ausarbeiten.

Es ist mittlerweile unbestritten, dass es Energiespeicher braucht, um grosse Mengen von fluktuierendem erneuerbarem Strom in unser Energiesystem zu integrieren.[1] [2] Welche und wie viele Energiespeicher notwendig sind, ist eine offene Frage. Eine Antwort zu finden, ist schwierig, weil sie von vielen Faktoren abhängt, die nur teilweise von der Schweiz beeinflusst werden können und die allesamt mit grossen Ungewissheiten behaftet sind.

Dennoch – oder gerade deswegen – ist es unerlässlich, Massnahmen zu ergreifen, um die Umsetzung der Energiestrategie 2050 voranzutreiben. Dafür braucht es eine «Energiespeicherstrategie 2050» mit folgenden Schwerpunkten:

1. Energiespeicher sollen ganzheitlich und neutral bewertet werden. Neben der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit sollen auch die Treibhausgasemissionen während des Lebenszyklus eines Speichers einbezogen werden.
2. Die verschiedenen Typen von Energiespeichern, die beim Entladen wieder Strom erzeugen, sollen gesetzlich gleichberechtigt behandelt werden. Zurzeit werden Pumpspeicher bevorzugt, indem sie als einzige Stromspeicher vom Netzentgelt befreit sind.
3. Das Erproben von als sinnvoll bewerteten grossen Energiespeichern soll gezielt gefördert werden. Dazu müssen neue Finanzierungsmöglichkeiten geprüft werden; das Erproben von Speichern soll durch neue Förderinstrumente wie die deutschen Reallabore[3] gefördert werden.

Anmerkungen und Referenzen

1 G. Andersson, K. Boulouchos und L. Bretschger, «Energiezukunft Schweiz», ETH Zürich, 2011 (S. 25 ff.).
2 «Zukunft Stromversorgung Schweiz», Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2012 (S. 103).
3 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/reallabore-testraeume-fuer-innovation-und-regulierung.html

Verbände und NGOs

1.6.2. Verbände müssen aktiver werden!

Verbände müssen aktiver und koordiniert vorgehen, um Politik, Wirtschaft und Bevölkerung über Energiespeicher zu informieren. Zudem sollten sie von der Politik klare wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen für Energiespeicher fordern.

Verbände wie AEE Suisse, energie-cluster.ch, EnergieSchweiz, swisscleantech und Swissolar können in der Umsetzung der Energiestrategie 2050 eine wichtige Rolle spielen, weil sie an den Schnittstellen von Bevölkerung, Wirtschaft und Politik tätig sind.

Im Bereich der Energiespeicherung sind die Aktivitäten der meisten Verbände allerdings eher bescheiden. Auf den Websites werden Technologien wie Wärmespeicher, saisonale Wärmespeicherung, Power-to-Gas und Druckluftspeicher entweder nur sehr oberflächlich, einseitig oder gar nicht beschrieben.

Um besser über verschiedene Speichertechnologien zu informieren, wäre ein aktiveres und koordiniertes Vorgehen sinnvoll. Die Schweiz könnte dabei vom Bundesverband Energiespeicher[1] in Deutschland lernen, der «Firmen und Institutionen, die sich mit Herstellung, Planung, Verkauf, Betrieb und Entwicklung von Energiespeicherlösungen beschäftigen», vereint. Er bietet auf seiner Website eine Übersicht über die verschiedenen Speichertechnologien sowie zu einer Grosszahl der Technologien auch Faktenblätter und Anwendungsbeispiele an. Eine dem Bundesverband für Energiespeicher ähnliche Rolle hat in der Schweiz nur das Forum für Energiespeicher der AEE Suisse.

Anmerkungen und Referenzen

1 https://www.bves.de

Energieversorger # Politik (Bund, Kanton, Gemeinde)

1.6.3. Energieversorger stärker einbinden!

Energieversorger sollen von der Politik klare wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen verlangen – und die Forschung und Entwicklung neuer Speichertechnologien unterstützen.

Energieversorger können zwei wichtige Beiträge zur Verbreitung von Energiespeichern leisten. Zum einen sollten sie der Politik klarmachen, dass langfristige Investitionen nur dann getätigt werden, wenn die wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Energiespeicherung geklärt sind.

Zum anderen sollen Energieversorger die Forschung und Entwicklung neuer Speichertechnologien unterstützen. Als heutige Betreiber von Energiespeichern besitzen Energieversorger wertvolle Erfahrungen mit der Planung, dem Bau und dem Betrieb von Speichern, die bislang kaum mit der Forschungs- und Entwicklungsgemeinschaft geteilt werden. Durch die gezielte Einbindung von Energieversorgern in die Betreuung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten lässt sich sicherstellen, dass sich die untersuchten Speichertechnologien umsetzen und rentabel betreiben lassen.

Verbände und NGOs # Energieversorger # Politik (Bund, Kanton, Gemeinde)

1.6.4. Die Bevölkerung besser informieren!

Die Bevölkerung muss besser über Energiespeicher informiert werden. Die Informationskampagne soll die gesellschaftliche Akzeptanz von Energiespeichern erhöhen.

Zum Einsatz von Druckluftspeichern – oder anderen Speichern – kann die Bevölkerung keinen direkten Beitrag leisten. Sie kann allerdings indirekt dazu beitragen, indem sie Initiativen oder Referenden unterstützt, die zur Förderung der Speicherung allgemein oder zum Bau von spezifischen Speicheranlagen führen. Dazu ist es nötig, dass die Bevölkerung besser über Energiespeicherung informiert wird. Zurzeit scheint sie unter «Speicherung» hauptsächlich «Stromspeicherung» zu verstehen und zu meinen, dass es nur um Pumpspeicher und Batterien geht.[1]

Bessere Information wird wahrscheinlich auch die Akzeptanz von Energiespeichern erhöhen. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist eine immer noch unterschätzte Komponente bei der Umsetzung der Energiestrategie 2050. Besonders bei Windkraftanlagen[2 3], Photovoltaikanlagen[4], Höchstspannungsleitungen[5] und Smart Meters[6] kann sie eine entscheidende Rolle spielen. Auch bei saisonalen Wärmespeichern könnte es wegen der intensiven Beanspruchung des Untergrundes Akzeptanzprobleme geben.[7]

Druckluftspeicher könnten in der Schweiz aus zwei Gründen eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz geniessen. Erstens: Sie würden in relativ abgelegenen Gebieten komplett unterirdisch gebaut. Zweitens: Durch die hohe Beteiligung von Schweizer Firmen stellen Druckluftspeicher eine einheimische Lösung für die Energiespeicherung dar.

Anmerkungen und Referenzen

1 Wie schlecht die Bevölkerung über Energiefragen im Allgemeinen und die Energiestrategie 2050 im Speziellen informiert ist, zeigen die Resultate einer Umfrage des Elektrizitätswerks Zürich (https://www.ewz.ch/de/ueber-ewz/newsroom/medienmittteilungen/energiestrategie2050.html). Die Umfrage belegt zum Beispiel, dass nur 17 % der Bevölkerung die Ziele der Energiestrategie 2050 kennen.
2 R. Wüstenhagen, M. Wolsink und M. J. Bürer, «Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept», Energy Policy 35:2683–2691, 2007.
3 A. Fumagalli, «Trotz grösstem Potenzial der Schweiz: Neuerlicher Rückschlag für Waadtländer Windkraft», Neue Zürcher Zeitung, 18. Oktober 2019, https://www.nzz.ch/schweiz/trotz-groesstem-potenzial-neuer-rueckschlag-fuer-waadts-windkraft-ld.1515944.
4 A. H. Michel, M. Buchecker und N. Backhaus, «Renewable energy, authenticity, and tourism: social acceptance of photovoltaic installations in a Swiss Alpine region», Mountain Research and Development 35:161–170, 2015.
5 I. Stadelmann-Steffen, «Bad news is bad news: Information effects and citizens' socio-political acceptance of new technologies of electricity transmission», Land Use Policy 81:531–545, 2019.
6 D. J. Hess, «Smart meters and public acceptance: comparative analysis and governance implications», Health, Risks & Society 16:243–258, 2014.
7 «Lösungsansätze für die Schweiz im Konfliktfeld erneuerbare Energien und Raumnutzung», Akademien der Wissenschaften Schweiz, Zürich, 2012.