

# Ein innovatives, elektrisch und thermisch gekoppeltes Energiespeichersystem

Franz Georg Piki<sup>(\*)</sup>, Wolfgang Richter, Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz,  
Stremayrgasse 10/II, 8010 Graz,  
+43 316 873-6268, franz.piki@tugraz.at, www.hydro.tugraz.at

**Kurzfassung:** Der voranschreitende Wandel des Energiesystems mit der vorzugsweisen Nutzung von Wind, Sonne und Wasser stellt große Herausforderungen für eine nachhaltige und versorgungssichere Energiezukunft dar. Das entscheidende Bindeglied zwischen fluktuierenden Erzeugungstechnologien und der anthropogenen Energienachfrage sind in allen Energiesektoren flexible Speichertechnologien, mit denen erst erneuerbare Energieressourcen effizient genutzt werden können. Der natürliche Energieträger Wasser eignet sich nicht nur in bewährten Pumpspeicherkraftwerken für die effiziente elektrische, sondern auch in großtechnischen Wasserspeichern für die effektive und langfristige thermische Energiespeicherung.

Eine technische und energiewirtschaftliche Machbarkeitsstudie befasst sich mit der Vereinigung dieser etablierten und zuverlässigen elektrischen und thermischen Energiespeichertechnologien durch die energetische Doppelnutzung des Wassers in einem Kraftwerkssystem. Mit diesem hydraulisch kombinierten Energiespeicher werden nicht nur Ressourcen durch Synergieeffekte bei minimalem Platzbedarf energiewirtschaftlich sehr effizient genutzt, sondern die hybride energetische Wassernutzung führt auch zu beachtlicher Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Rentabilität und Ertragskraft gegenüber der separaten Umsetzung von Pump- und Wärmespeichern. Nicht zuletzt könnte mit diesem entwickelten ökologischen 2-in-1 „Wasserakku“ unter Berücksichtigung der zunehmenden Elektromobilität ein Großteil unseres Energiebedarfs bedarfsgerecht bedient werden. Die forcierte unterirdische Errichtung erlaubt nicht nur die flexible Standortwahl in urbaner Nähe, sondern erleichtert Bewilligungsverfahren und die Umweltverträglichkeit. Denn neben emissionslosem Betrieb, wird weder in den Wasserhaushalt natürlicher Gewässer eingegriffen, noch werden bioproduktive Flächen versiegelt oder das Landschaftsbild beeinträchtigt. Schlussendlich soll damit auch die gesellschaftliche Akzeptanz und Bewusstsein für eine nachhaltige erneuerbare Energieversorgung verbessert werden.

Adaptierungen von baulichen und maschinellen Bestandteilen, ein durchdachtes Kraftwerkskonzept und verschiedene Erweiterungsmöglichkeiten erlauben die Realisierung eines wirtschaftlichen, energetisch sehr effizienten, ressourcenschonenden und vor allem langlebigen innovativen Kraftwerkkonzepts. Zusammen mit netzgebundener Energieinfrastruktur können zehntausende Haushalte, große Industriebetriebe und kommunale Anlagen bedarfsabhängig mit elektrischer und thermischer Energie versorgt werden. Der klimafreundliche Energiespeicher soll die großtechnische, erneuerbare Energieversorgung von urbanen Gebieten und Städten zukunftsweisend revolutionieren.

**Keywords:** Energiespeicher, Erneuerbare Energien, Pumpspeicher, Wärmespeicher, thermische Energie, Sektorkopplung, Energieversorgung

## 1 Einleitung

Der Umbruch von überwiegend fossilen Brennstoffen geprägter Energieversorgung hinzu erneuerbarer Energienutzung inmitten des noch immer steigenden Energiehungers der Menschheit ist mit Sicherheit die größte Herausforderung aller Energiesektoren im 21. Jahrhundert. Während mit dem konventionellen Kraftwerkspark der letzten Jahrzehnte die Energiebereitstellung einfach berechenbar und planbar gewesen ist, kommt es mit den Erneuerbaren zu einer zusehends örtlichen und zeitlichen Entkopplung von Verbrauchern und Produzenten.

Das veränderliche Umfeld dieser energetischen Evolution als Dekarbonisierung der Energiebereitstellung bietet aber die einmalige Möglichkeit unser Energiesystem von Grund auf zu verbessern und effizienter zu gestalten. Diese Chance durch den radikalen Wandel der Energiewirtschaft öffnet in weiterer Folge Tür und Tor für innovative Lösungen. Denn globale klimapolitische Zielsetzungen, wie sie im Pariser Klimaschutzabkommen definiert sind, die die Umweltfolgen des hausgemachten Klimawandels zumindest in einem verträglichen Rahmen begrenzen sollen, sind ohne zielgerichtete Maßnahmen und Lösungen am Energiesektor nicht realisierbar.

Für neue Entwicklungen am Energiemarkt gilt es aber nicht nur die ureigenen Herausforderungen der Ökologisierung und des Klimaschutzes bestmöglich zu bewältigen, sie sollen darüber hinaus wirtschaftlich und sozial verträglich errichtet und betrieben werden können und die heimische Wertschöpfung über ihren gesamten Lebenszyklus garantieren.

Kluge Investitionsentscheidungen in ausgereifte und zugleich effiziente Energietechnologien, die unsere Energieversorgung für die nächsten Jahrzehnte prägen werden und mit denen der Klimaerwärmung entgegenwirken werden muss, führen unweigerlich zu einer volkswirtschaftlich verantwortungsvollen Energiezukunft. Es muss also jetzt an bestmöglichen Energietechnologien geforscht werden, um Klima- und Umweltziele erreichbar zu machen. Die Lösungsfindung darf und soll nicht auf die kommenden Generationen abgewälzt werden, sondern es ist unsere Aufgabe, das dem Stand der Technik effizienteste, und aus ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Standpunkten beste Energiesystem aufzubauen.

Eine wesentliche Zukunftsstrategie der Energiewirtschaft ist die Sektorkopplung. Entgegen der überholten Auffassung, Energiesektoren als eigenständige Systeme zu betrachten, ist es für die effiziente künftige Energieversorgung entscheidend, die Energiewirtschaft mit Produzenten, Konsumenten, Energiespeichern und vernetzter Energieinfrastruktur in ihrer Gesamtheit als ineinandergreifendes, gekoppeltes System zu betrachten, um Synergien und Ressourcen bestmöglich und nachhaltig nutzen zu können.

Das in diesem Beitrag vorgestellte, innovative und klimafreundliche Energiespeichersystem als Verknüpfung von zwei etablierten Energiespeichertechnologien kann zusammen mit smarter, netzgebundener Energieversorgungsinfrastruktur einen Mosaikstein für eine effizientere, sichere und unabhängige erneuerbare Energiezukunft darstellen.

## 2 Energiespeicher als Schlüsseltechnologie

Wind, Sonne und Wasser als proklamierte Energieträger der Zukunft stellen die sichere Energieversorgung vor große Herausforderungen. Schließlich muss deren wind- und wetterabhängige, schwankende und schwer prognostizierbare Energieerzeugung für die entkoppelte Verbrauchernachfrage nutzbar gemacht werden. Entscheidendes Bindeglied zwischen fluktuierenden Erzeugungstechnologien und dem anthropogenen Energiebedarf sind flexible Speichertechnologien, die überschüssige Energie zwischenspeichern und den Konsumenten bedarfsabhängig bereitstellen. Erst mit Energiespeichern können erneuerbare Energieressourcen effizient genutzt und Verbraucherbedürfnisse befriedigt werden.

In Abbildung 1 sind elektrische und thermische Speichertechnologien nach ihrem jeweiligen Reifegrad und dem Kapitalbedarf bzw. dem technologischen Risiko dargestellt. Wie aus der Graphik hervorgeht, sind seit Jahrzehnten bewährte Pumpspeicherkraftwerke vor allen anderen elektrischen Speichertechnologien als ausgereifteste und wirtschaftlichste Stromspeicher unangefochten. So ist es nicht verwunderlich, dass aktuell 96 % aller großtechnischen elektrischen Energiespeicher mit einer weltweit installierten Leistung von 163 GW dieser Technologie zugeordnet werden können [1].

Hydraulisch basierte, sensible thermische Energiespeicher sind am Wärme- und Kältesektor mit verschiedenen Ausführungsvarianten wie Beckenspeichern oder unterirdischen Speichern in Felskavernen Stand der Technik. Mit der aufkeimenden solarthermischen Energienutzung gewinnen sie als großtechnische saisonale Wärmespeicher immer mehr Bedeutung, um die potentialreiche Sonnenenergie des Sommers effizient in die nachfragestarken Wintermonate zu transferieren.

Wasser eignet sich also nicht nur in bewährten Pumpspeicherkraftwerken für die effiziente elektrische, sondern auch in großtechnischen Wasserspeichern für die effektive und langfristige thermische Energiespeicherung. Die erzielbaren Wälzwirkungsgrade für Pumpspeicheranlagen liegen gewöhnlich zwischen 70 und 80 % [2], jene für die saisonale Wärmespeicherung in nicht wärmegeprägten Felskavernen mit Wassertemperaturen von bis zu 90 °C im Bereich von 75 % [3].

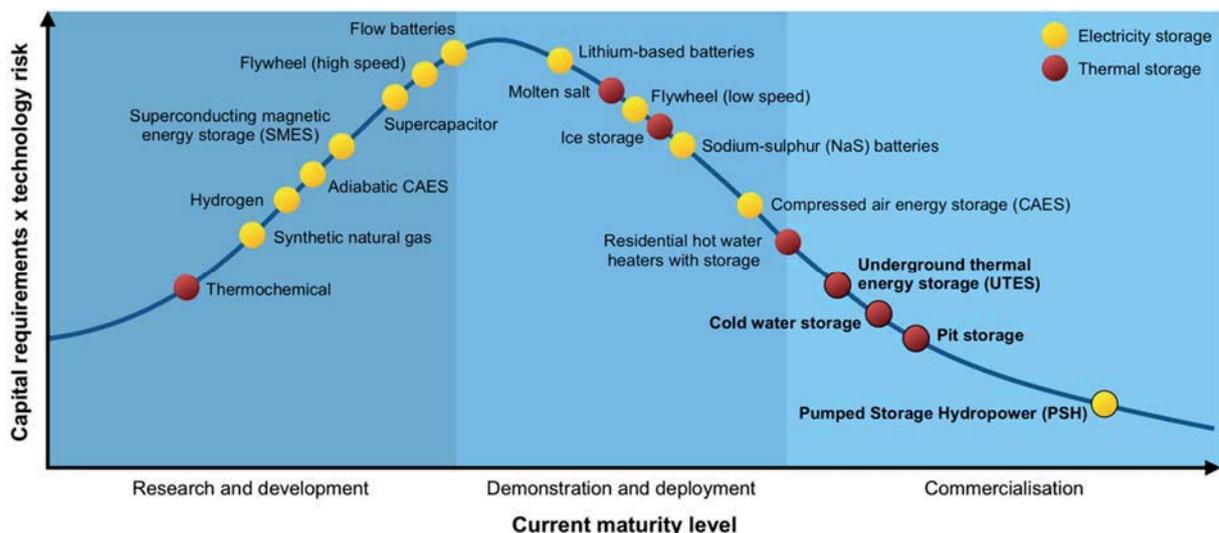


Abbildung 1: Elektrische und thermische Energiespeichertechnologien in Abhängigkeit von ihrem Reifegrad, dem Kapitalbedarf bzw. dem technologischen Risiko; Die für diesen Beitrag wesentlichen Speichertechnologien sind fett hervorgehoben; Quelle [4] – bearbeitet

### 3 Vereinigung elektrischer und thermischer Energiespeicherung

Vor dem Hintergrund dieser ausgereiften und in ihrem jeweiligen Energiesektor den aktuellen Stand der Technik repräsentierenden, großtechnischen Energiespeichertechnologien befasst sich eine technische und energiewirtschaftliche Machbarkeitsstudie mit der hydraulischen Vereinigung elektrischer und thermischer Energiespeicherung in einem Kraftwerkssystem [5].

Koppelndes Medium dieses Konzepts ist der Energieträger Wasser, der für die elektrische und thermische Energiespeicherung zugleich Anwendung findet. Die Realisierung dieses innovativen Energiespeicherkonzepts erfolgt mit geschlossenem Wasserkreislauf ausgeführten Pumpspeicherkraftwerken. Durch den thermischen Energieeintrag wird das Betriebswasser dieses Heißwasser-Pumpspeicherkraftwerks auf bis zu 90 °C [5] erwärmt, wobei die Pumpspeicherkraftwerksanlage mit Adaptierungen der baulichen und maschinellen Komponenten unabhängig von den gerade vorherrschenden Wassertemperaturen betrieben werden kann [5].

Durch die gleichzeitige energetische Nutzung des Wassers für die Strom- und Wärmespeicherung kann das energetische Potential des natürlichen Energieträgers bestmöglich genutzt werden. Denn mit der zur Pumpspeicherung gleichzeitig möglichen Wärmespeicherung erhöht sich aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität des Wassers von etwa 4.200 J/kg·K [6] die nutzbare spezifische volumetrische Energiedichte bei gleichbleibenden Speicherkapazitäten bzw. Ressourcenbedarf gegenüber konventionellen Pumpspeicherkraftwerken deutlich.

Zur beispielgebenden Quantifizierung der spezifisch speicherbaren elektrischen und thermischen Energie je Kubikmeter Wasser [kWh/m<sup>3</sup>] beeindruckt folgende Gegenüberstellung. Während 1 m<sup>3</sup> Wasser für die Speicherung von 1 kWh elektrischer Energie um beachtliche 367 m gehoben werden muss, können mit demselben Wasservolumen zwischen 0 und 100 °C rund 117 kWh thermische Energie gespeichert werden. Bei einem Speicherinhalt von 1.000.000 m<sup>3</sup> und einer Fallhöhe von 600 m müsste der Speicherinhalt 71 Mal zur elektrischen Energiespeicherung umgewälzt werden, um dem thermischen Energieinhalt im oben genannten Temperaturbereich zu entsprechen.

Mit der energetischen Doppelnutzung des Wassers im gleichen Kraftwerkssystem steigert sich demnach die jährliche Speicherarbeit gegenüber konventionellen Pumpspeicherkraftwerken oder saisonalen Wärmespeichern deutlich. Führt man das genannte Beispiel des Pumpspeicherkraftwerks mit einem Speicherinhalt von 1.000.000 m<sup>3</sup> und einer Fall- bzw. Förderhöhe von 600 m weiter, und referenziert sich auf die jährlich umgesetzte bzw. speicherbare spezifische Wärmeenergie von 129 kWh/m<sup>3</sup> des Projekts „Big Solar Graz“ [7], so können unter Annahme einer ständigen, vollständigen Umwälzung des Speicherinhalts alle zwei Tage jährlich rund 298.000 MWh elektrische und etwa 129.000 MWh thermische Energie eingespeichert bzw. bedarfsgerecht bereitgestellt werden. Gegenüber dem reinen Pumpspeicherbetrieb bedeutet dies ein Plus von 43 % an zusätzlicher Speicherarbeit durch die hinzukommende Wärmespeicherung.

Mit diesem hydraulisch kombinierten Energiespeicher werden also nicht nur Ressourcen durch Synergieeffekte bei minimalem Platzbedarf energiewirtschaftlich sehr effizient genutzt, sondern die hybride energetische Wassernutzung und die dadurch erzielbare Erhöhung der spezifisch speicherbaren Energie führen auch zu beachtlicher Steigerung der Ertragskraft,

Wirtschaftlichkeit und Rentabilität gegenüber der separaten Umsetzung von Pump- und Wärmespeichern nachdem sowohl Erlöse aus dem Pumpspeicherkraftwerksbetrieb als auch durch die Wärmeenergiebereitstellung lukriert werden [5]. Bei vergleichsweise geringem zusätzlichem Energieaufwand für die Errichtung und den Betrieb gegenüber der alleinigen Errichtung von konventionellen Pumpspeicherkraftwerken wird der energetische Erntefaktor um ein Vielfaches vergrößert und in weiterer Folge die energetische Amortisationszeit deutlich reduziert.

## 4 Modifiziertes Pumpspeicherkraftwerk

Die zentrale Innovation dieses Konzepts ist ein an die hohen und saisonal schwankenden Wassertemperaturen angepasstes Pumpspeicherkraftwerk, das auch den Forderungen einer effizienten thermischen Energiespeicherung nachkommt. Für die anberaumte, und mit diesem System gekoppelte Fernwärmeenergieversorgung von urbanen Gebieten und Städten ist die vollkommen unterirdische und somit topographieunabhängige Errichtung dieser hybriden Kraftwerksanlage zweckmäßig. Nicht zuletzt bieten Heißwasser-Speicherkavernen beste Voraussetzungen für die saisonale thermische Energiespeicherung, wie schon vor Jahrzehnten in Schweden ausgeführte großtechnische Heißwasserspeicher in nicht wärmegeprägten Felskavernen beweisen [3].

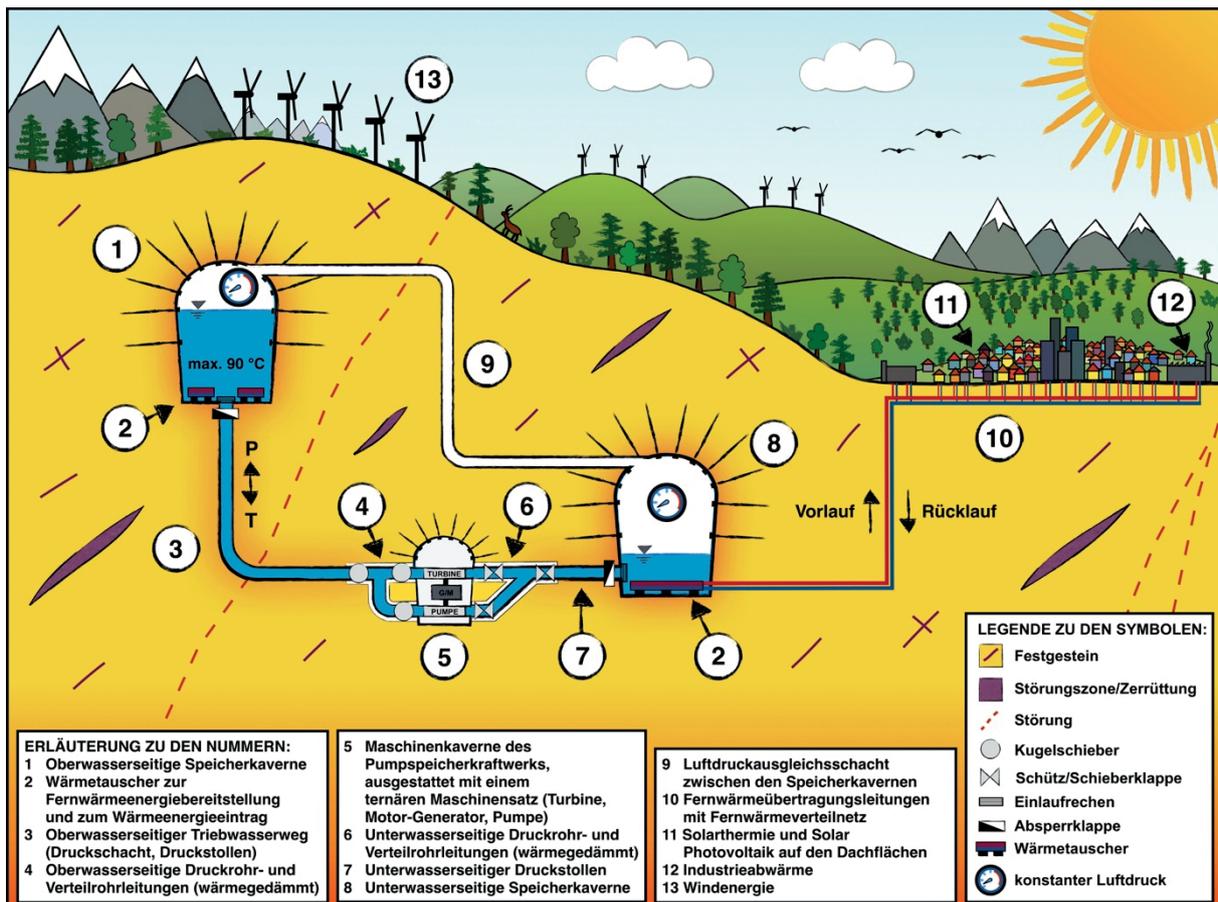


Abbildung 2: Kraftwerkskonzept für die gekoppelte elektrische und thermische Energiespeicherung als modifiziertes, vollkommen unterirdisches Heißwasser-Pumpspeicherkraftwerk, das über Wärmetauscher mit den Fernwärmeübertragungsleitungen verbunden ist

Mit der untertägigen Errichtung ist man aber nicht nur unabhängig von natürlichen Höhenunterschieden, sondern die dadurch erzielbare flexible Standortwahl ermöglicht die geologischen und geotechnischen Gegebenheiten vorab zu erkunden, sodass bei günstigen Gebirgsverhältnissen die Baukosten entscheidend gesenkt werden können. Des Weiteren wird weder das Landschaftsbild beeinträchtigt, noch werden wertvolle und ohnehin umkämpfte oberirdische Flächenressourcen beansprucht.

Gegenüber der gewohnten Errichtung von Speichern durch den Bau von Sperrbauwerken haben Felskavernen außerdem wirtschaftliche bzw. betriebliche Vorteile. Durch das geschlossene System spielen bei unterirdischen Speichern die Verdunstungsverluste keine Rolle, noch verlanden sie. Grundsätzlich wird der einmal geschaffene Hohlraum über Generationen nutzbar sein. Von wesentlicher Bedeutung ist auch, dass der künstliche Wasserkörper nicht in den Haushalt natürlicher Gewässer eingreift, wodurch nicht zuletzt die Umweltverträglichkeit und so die Bewilligungsfähigkeit gegenüber bisher ausgeführten Wasserkraftanlagen verbessert werden kann [5].

#### **4.1 Kraftwerkskonzept**

Das konzipierte Kraftwerkssystem gliedert sich im Wesentlichen in die beiden Speicherbecken, das Triebwassersystem, die Maschinenkaverne und die verbundene Wärmübertragungsinfrastruktur mit den Fernwärmeübertragungs- und Fernwärmeverteilungen [5].

Die vornehmlich aus Solarthermie, Industrieabwärme oder Power-to-Heat gewonnene thermische Energie wird dem Wasserkörper des Pumpspeicherkraftwerks über Wärmetauscher, die in den Speichern installiert sind, zugeführt. Zusätzlich sollen Absorptionswärmepumpen installiert werden, um Spitzenlasten abdecken zu können, und bei geringeren Wassertemperaturen die gewünschten Vorlauftemperaturen erreichen zu können. Erstrebenswert wäre es gerade für die solarthermische Nutzung in Städten die oft ungenutzt bleibenden Dachflächen mit Solarpanelen auszustatten, damit einerseits nicht nur bioproduktive Flächen für die Wärmeenergiegewinnung zusätzlich verbaut werden müssen sondern andererseits zusammen mit vernetzter Fernwärmeinfrastruktur Prosumer insbesondere in den Sommermonaten Energie in den zentralen Pump-Wärmespeicher einspeichern und thermische Energie in den Wintermonaten wieder beziehen. Eine derartige Synergie zwischen Prosumern, einem zentralen Wärmespeicher und vernetzter Energieinfrastruktur ist nicht nur kosteneffizienter als viele kleine Anlagen, sondern weniger anfällig gegenüber äußeren Einflüssen und Ausfällen.

Dass beide Speicherkavernen gleich groß sein müssen, ist nicht zwingend erforderlich. Vielmehr können die obere und untere Felskaverne an die jeweiligen Versorgungsanforderungen flexibel angepasst werden. Wird beispielsweise mehr Wärmespeichervermögen benötigt als die Dimensionierung der Speichervolumina für den Pumpspeicherkraftwerksbetrieb verlangen, kann beispielsweise das Speichervolumen der oberwasserseitigen Kaverne für die Wärmespeicherung angepasst werden, und dementsprechend ein größeres Volumen vorhalten als die für den Pumpspeicherkraftwerksbetrieb dimensionierte unterwasserseitige Felskaverne.

Wesentliche Forderungen zur wirtschaftlichen und umweltverträglichen Ausführung von Heißwasserpumpspeicherkraftwerken sind, dass thermische Energieverluste und Wasseraustritte aus dem System weitgehend unterbunden werden. Denn mit jeder Einbuße des hydraulischen Energieträgers aus dem Kraftwerkssystem ist nicht nur ein potentieller, sondern ein umso höherer thermischer Energieverlust verbunden. Bereiche des Triebwassersystems, die mit ihrem maximalen dynamischen Innendruck über dem Bergwasserspiegel, und somit außerhalb der Walchschen Grenze [8] liegen, sind daher abhängig von den Gebirgsverhältnissen und hydrogeologischen Randbedingungen zumindest technisch dicht auszukleiden.

Zur Vermeidung des Luftaustauschs mit der Atmosphäre verfügen auch die Lufträume der Speicherkavernen über einen geschlossenen Kreislauf, der mit einem Luftdruckausgleichsschacht zwischen den Reservoirs realisiert wird [5]. Mit dieser Anordnung ist der Luftdruck unabhängig von den Stauspiegeln in den Speichern immer gleich groß, wodurch nicht nur gleichbleibende Rahmenbedingungen für den Kraftwerksbetrieb geschaffen werden, sondern auch thermischen Energieverlusten entgegengewirkt wird.

Bei der Dimensionierung der Speicherkavernen bzw. Ausbruchsvolumina ist die Volumenänderung des Wassers zwischen Befüll- und höchster Betriebstemperatur zu berücksichtigen. Beispielhaft beträgt die relative Volumenänderung des Wassers zwischen 10 und 90 °C rund 3,6 % [6].

Aufgrund der ständigen Wasserumwälzung des Kraftwerkbetriebs herrschen in den Speichern gleichmäßige Wassertemperaturen. Weil sich während längerer betriebsnotwendiger Stillstände des Pumpspeicherkraftwerks scharf abgegrenzte Schichten unterschiedlicher Temperatur und Dichte in den Speichern ausbilden würden, ist eine Luftperlanlage für die Wasserumwälzung vorzusehen [5]. Damit sollen gleichmäßige Wassertemperaturen für die Wiederaufnahme des ungestörten Kraftwerkbetriebs ermöglicht werden.

Mit zunehmender Temperatur erhöht sich der Dampfdruck des Wassers. Fällt der Druck in der Rohrleitung unter den Dampfdruck des strömenden Fluids ab, kommt es zu Kavitationserscheinungen bzw. bei zu hohem Unterdruck auch zum Abreißen der Strömung [2]. Um Kavitation oder gar Strömungsabbrüche bei Heißwasserkraftanlagen zu vermeiden, ist es notwendig, die Rohr- bzw. Maschinenachse um den Betrag der Dampfdruckzunahme für die projektierte Höchsttemperatur des Triebwassers unter Berücksichtigung des höhenabhängigen Atmosphärendrucks gegenüber der derzeitigen Auslegung tiefer zu legen. Bei der obersten Betriebstemperatur von 90 °C beträgt die Zunahme der Einbautiefe etwas mehr als 7 m gegenüber Wassertemperaturen um 10 °C [5]. Dies gilt insbesondere für die Saugrohre nach den Turbinen und die Pumpenzulaufleitungen.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit des Wassers ist die gesamte hydraulische Auslegung im Hinblick auf die Reduktion des thermischen Energieaustrags so zu optimieren, dass die wasserbenetzten Oberflächen der Bauteile des Kraftwerkssystems im Vergleich zum Volumen minimiert werden. Diese Forderung gilt insbesondere für den kurzen Triebwasserweg wie auch für kompakt ausgeführte Speicherkavernen mit gleichzeitig hydraulisch optimierter Auslegung [5].

Des Weiteren kann emittierte Wärmestrahlung des heißen Wasserkörpers mit reflektierenden Beschichtungen oder Folien, die an oder in den Auskleidungen angebracht sind, deutlich begrenzt werden [5].

## 4.2 Erweiterung um eine tiefengeothermische Energiegewinnung

Bei der tiefliegenden Errichtung von Untertagebauwerken und bei diesem Konzept notwendigen Ausführung von tiefliegenden Speicherkavernen macht sich die geothermische Tiefenstufung bemerkbar [9]. Mit höheren Gebirgstemperaturen, die im Durchschnitt um 1 °C je 30 m Tiefe zunehmen [9], verringern sich zum einen die Wärmeenergieverluste aufgrund der reduzierten Temperaturdifferenz zwischen dem Speicherwasser und dem umliegenden Gebirge, zum anderen bietet dieser Umstand eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Erweiterung der Projektidee.

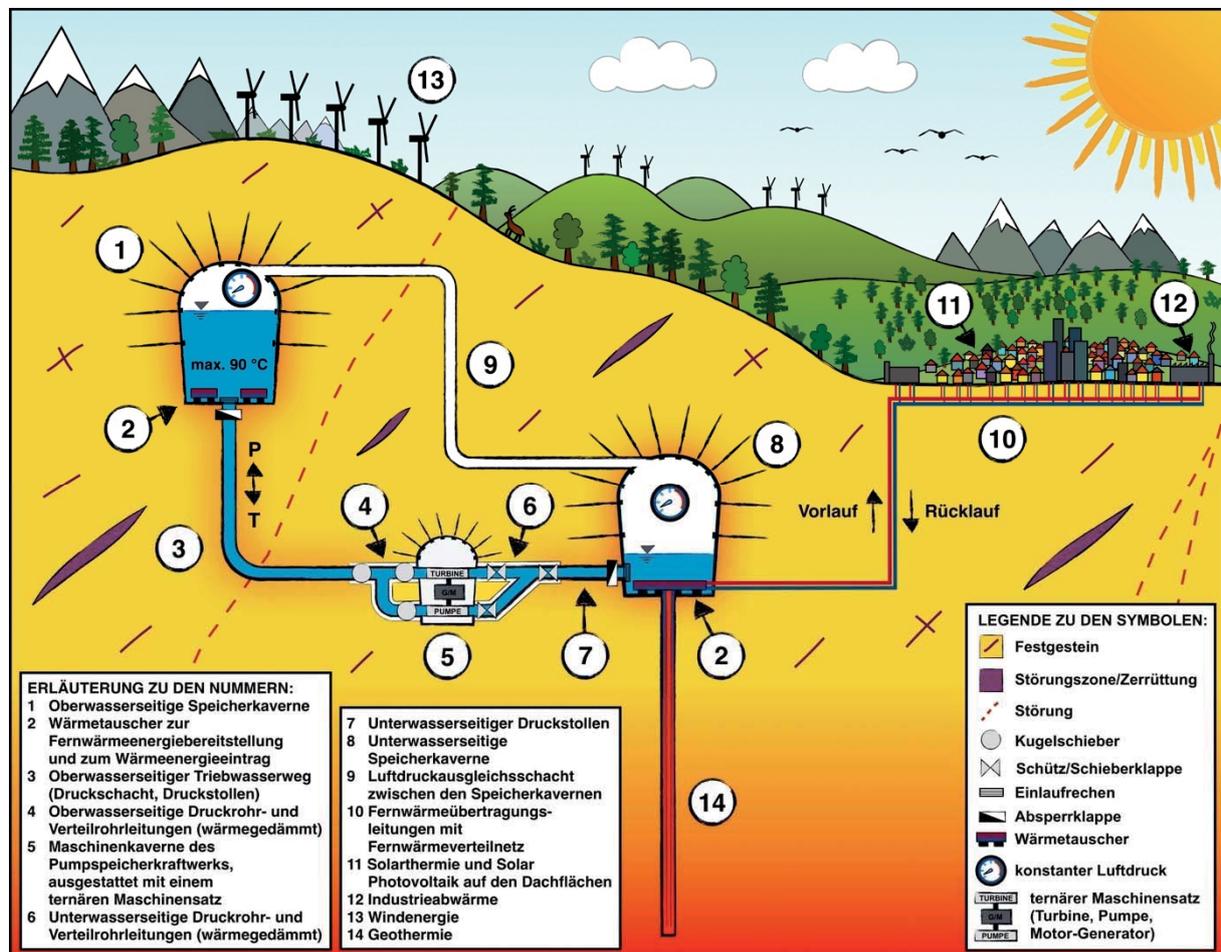


Abbildung 3: Erweiterungsoption des ursprünglichen Konzepts um eine tiefengeothermische Energiegewinnungsanlage

Das ursprüngliche Konzept kann demnach mit einer tiefengeothermischen Energienutzung kombiniert werden, um nicht zuletzt eine wind- und wetterunabhängige thermische Energiequelle zur Verfügung stellen zu können. Die dazu erforderlichen Bohrungen können äußerst wirtschaftlich von den tiefliegenden Speicherkavernen abgeteuft werden, nachdem

nicht nur der entsprechend große Felsholraum für die Installation einer Bohranlage, sondern auch entsprechende Infrastruktur vom Bau der Kavernen bereits vorhanden ist. Der Umstand, dass die Bohrungen gegenüber von der Erdoberfläche abgeteufte Bohrungen um die bereits vorliegende Tiefenlage der Speicherkaverne bei gleichbleibender Endteufe verkürzt werden können, spiegelt sich in den verringerten Herstellungskosten wider. Das Erweiterungskonzept ist in Abbildung 3 dargestellt.

### 4.3 Adaptierung für die Fernkältebereitstellung

Während in Nord- und Mitteleuropa – stellvertretend für alle klimatisch ähnlichen Gebiete auf unserer Erde – der Wärmebedarf gegenüber dem Kältebedarf für die Raumklimaregulierung dominiert, ändert sich dieses Verhältnis in subtropischen und tropischen Klimazonen. Um nun in diesen Gebieten prioritär Fernkälte für die Raumkühlung zur Verfügung stellen zu können, wird das ursprünglich beschriebene System an diese Forderung adaptiert.

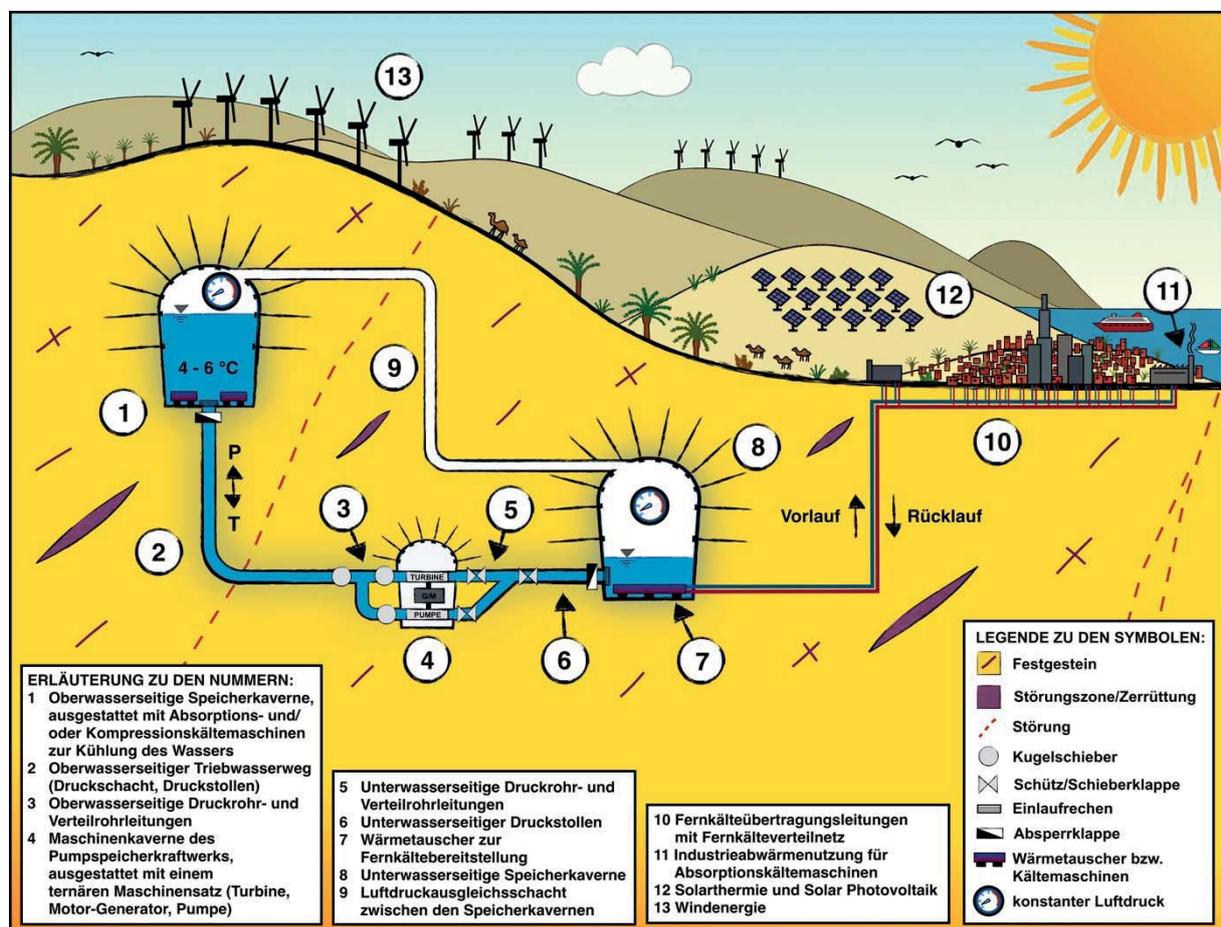


Abbildung 4: Adaptierung des elektrisch und thermisch gekoppelten Energiespeicherkonzepts für die Fernkältebereitstellung in heißen Klimazonen

Die entsprechende Weiterentwicklung als Kombination von Pump- und Kältespeichern ist in Abbildung 4 dargestellt. Für diese visionäre Weiterentwicklung ist vorgesehen, dass zusammen mit solarthermischer Wärmeenergie, die in diesen Regionen ohnehin reichlich

vorhanden ist, Absorptionskältemaschinen für die Kühlung des Betriebswassers verwendet werden. Die vorzugsweise ebenso in Felskavernen gespeicherte Kälteenergie wird nun über Kältetauscher und Fernkälteübertragungsleitungen den Kunden zur Gebäudekühlung bereitgestellt. Auch hier kann mit der unterirdischen Errichtung nicht nur Kälteenergie effizient und langfristig gespeichert, sondern auch der Verdunstung und in weiterer Folge Energieverlusten entgegengewirkt werden. Die thermischen Energieverluste sind bei dieser Systemausführung gegenüber der Wärmespeicherung im Allgemeinen geringer, nachdem der Temperaturunterschied zwischen dem Betriebswasser und dem Gebirge ein deutlich niedrigerer ist. Die erzielbaren Wirkungsgrade für die Kälteenergiespeicherung liegen daher über jenen der Wärmespeicherung.

Aber auch das ursprüngliche Konzept, als Kombination von Pump- und Wärmespeichern, kann mit der zunehmend an Bedeutung gewinnenden Fernkälteversorgung erweitert werden, ohne dafür zusätzliche Fernkälteübertragungs- und Fernkälteverteilungen errichten zu müssen. Dabei werden an den Fernwärmeübergabestationen Absorptionskältemaschinen installiert, die nun mit der zur Verfügung gestellten Wärmeenergie Kälteenergie für die Raumkühlung erzeugen. Das Herzstück, das Heißwasser-Pumpspeicherkraftwerk, wird so zur bündelnden elektrischen und thermischen Energiespeicher- und Energiebereitstellungszentrale.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Ambitionierte Klimazielsetzungen und die damit verbundene Umstellung der Energiewirtschaft auf die Nutzung erneuerbarer Energieressourcen verlangen nach entsprechenden Entwicklungen und neuen Lösungen. Besondere Bedeutung im zukünftigen Energiesystem kommt dabei Energiespeichertechnologien als Bindeglied zwischen zeitlich entkoppelter Energieerzeugung und Energienachfrage zu.

Die Vereinigung umweltfreundlicher elektrischer und thermischer Energiespeicherung in dafür modifizierten Pumpspeicherkraftwerken ist eine technisch machbare und energiewirtschaftlich sehr effiziente Neuinvention mit der energetischen Doppelnutzung des Energieträgers Wasser. Zusammen mit netzgebundener Energieinfrastruktur sollen mit diesem ökonomischen Energiespeicherkonzept urbane Gebiete und Städte emissionsfrei und bedarfsabhängig mit Strom, Wärme- und Kälteenergie versorgt werden.

Aktuelle und zukünftige Forschungsaufgaben befassen sich mit einer gesamtheitlichen, über den gesamten Lebenszyklus reichenden, energetischen und wirtschaftlichen Betrachtung dieses visionären Energiespeichers.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, DOE Global Energy Storage Database, Online unter URL: [http://www.energystorageexchange.org/projects/data\\_visualization](http://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization), Abrufdatum am 29-01-2018
- [2] Giesecke J., Heimerl S., Mosonyi E. (2014): Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb. Berlin, Heidelberg: Springer, 6. Auflage
- [3] Brunström C., Hillström C. G. (1987): The Lyckebo project, Solar district heating with seasonal storage in a rock cavern – Evaluation and operational experience, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden
- [4] Decourt B. and Debarre R. (2013): Electricity storage, Factbook, Schlumberger Business Consulting Energy Institute, Paris, France and Paksoy H. (2013): Thermal Energy Storage Today, presented at the IEA Energy Storage Technology Roadmap Stakeholder Engagement Workshop, Paris, France, 14 February
- [5] Piki F. G. (2017): Kombination der Pumpspeichertechnologie mit thermischer Energiespeicherung. Masterarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz
- [6] Aigner D., Bollrich G. (2015): Handbuch der Hydraulik – für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Berlin, Beuth Verlag
- [7] Energie Steiermark Wärme GmbH (2017): Projektfolder Big Solar Graz
- [8] Walch O. (1960): Die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten. Berlin: Springer-Verlag
- [9] Müller L., Fecker E., Götz H. P. (1979): Trotz 3000 Jahren Erfahrung RISIKO TUNNELBAU, Bild der Wissenschaft, 3-1979, Seiten 73 – 83