

GEOTECHNISCHER WÄRME- UND STROMSPEICHER WORK IN PROGRESS

- STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNGSBEDARF -

Dominic HAEUSLEIN^(*), Matthias POPP, Ronald SCHMIDT-VOLLUS

Nuremberg Campus of Technology, Fürther Straße 246b 90429 Nürnberg,
+49 (0)911 5880 3171, dominic.haeuslein@th-nuernberg.de, [Link](#)
Technische Hochschule Nürnberg, Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg,
+49 (0)911 5880 5131, matthias.popp@th-nuernberg.de, [Link](#)
Nuremberg Campus of Technology, Fürther Straße 246b, 90429 Nürnberg,
+49 (0)911 5880 3160, ronald.schmidt-vollus@th-nuernberg.de, [Link](#)

Kurzfassung: Dieser *Work in Progress*-Artikel beschäftigt sich mit dem Lageenergiespeicher-konzept „*Stülpmembranspeicher*“, welches große thermische und hydromechanische Energiemengen in einem geotechnischen Bauwerk zeitlich unabhängig voneinander speichern und bewirtschaften kann. Der Stand der Wissenschaft und Technik wird dargelegt und im Kontext vergleichbarer Energiespeichersysteme erörtert. Der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsbedarf konzentriert sich auf Komponenten, Verfahren und Maschinenentwicklungen einer thermodynamischen sowie strömungsmechanischen Systemuntersuchung. Abschließend wird in der Aussicht ein idealer Ablauf der Weiterentwicklung dargestellt.

Keywords: Pumpspeicher, Wärmespeicher, Sektorenkopplung

1 Motivation, Thema, Objektbeschreibung

1.1 Einleitung

Im Rahmen der politischen und gesellschaftlichen Forderung zur Systemtransformation im Energiesektor, um die europäische Energieerzeugung zu dekarbonisieren, werden konventionelle Kraftwerke fortschreitend durch Techniken ersetzt, welche erneuerbare Energiequellen nutzen [1]. Durch den Zuwachs an installierter, von Wetterfluktuationen abhängiger Leistung wird die Notwendigkeit von Stromspeicherkapazitäten im Versorgungsnetz für eine stabile und sichere Stromversorgung noch relevanter als bisher. Hydromechanische geotechnische Lageenergiespeicher, Konzepte zur potentiellen Energiespeicherung, vereinen die Vorteile etablierter Pumpspeichertechnologie – sehr lange Lebensdauer, hoher Wirkungsgrad, niedrige Betriebskosten, geringe Selbstentladung [2] – mit einer deutlich erhöhten flächenspezifischen Energiedichte sowie topografischer Unabhängigkeit und eröffnen gleichzeitig eine Schnittstelle zum Wärmesektor.

Speziell der *Stülpmembranspeicher* (SMS) [3] kombiniert technische und ökonomische Vorteile der hydromechanischen Lageenergiespeicher und ist konzipiert, dass er elektrische und thermische Energie in einem geotechnischen Bauwerk speichert. Dieses Energiespeichersystem ermöglicht, bei entsprechender Auslegung, die zeitlich unabhängige Bewirtschaftung großer Energiespeicherkapazitäten und somit eine Heizwärmeversorgung sowie eine vor Dunkelflauten sichere Stromversorgung, aus ausschließlich erneuerbaren Energiequellen für mittelgroße Städte oder kommunale Quartiere.

1.2 Objektbeschreibung

Der Aufbau eines SMS, illustriert in Abbildung 1, befindet sich komplett oder zum größten Teil im Untergrund. Dadurch soll die Akzeptanz der Bürger zu dieser Form der Energiespeicherung sichergestellt und eine Unabhängigkeit von regionaler Topografie gewährleistet werden. In der Höhenlage eines aus dem Untergrund freigeschnittenen Massekolbens ①, welcher sich innerhalb eines Zylinders vertikal bewegen kann, wird potentielle Energie gespeichert. Die Stülpmembran ② ist die abdichtende Komponente der Druckzonen und ermöglicht eine wartungsarme, leckage- und reibungsfreie Betriebsführung. Das Wasservolumen, welches vom Grundwasser abgeschirmt ist, wird gleichzeitig als Hydraulikmedium und als Heißwasserwärmespeicher genutzt. Die Anbindung an das Stromnetz erfolgt über die Motor-Pumpen-Turbinen-Generator-Einheit ③, analog zu einem klassischen Pumpspeicherkraftwerk. Die Sektorenkopplung zur thermischen Nutzung erfolgt beispielsweise mit vertikalen Wärmeübertragern, welche in oder an der Innenoberfläche des Außenzylinders angebracht und an ein Zweileiter-Wärmenetz ④ angeschlossen werden. Oberhalb der Konstruktion ist eine schwimmende Dämmschicht ⑤ installiert, welche optional mit Solarthermie oder Photovoltaikanlagen bestückt werden kann.

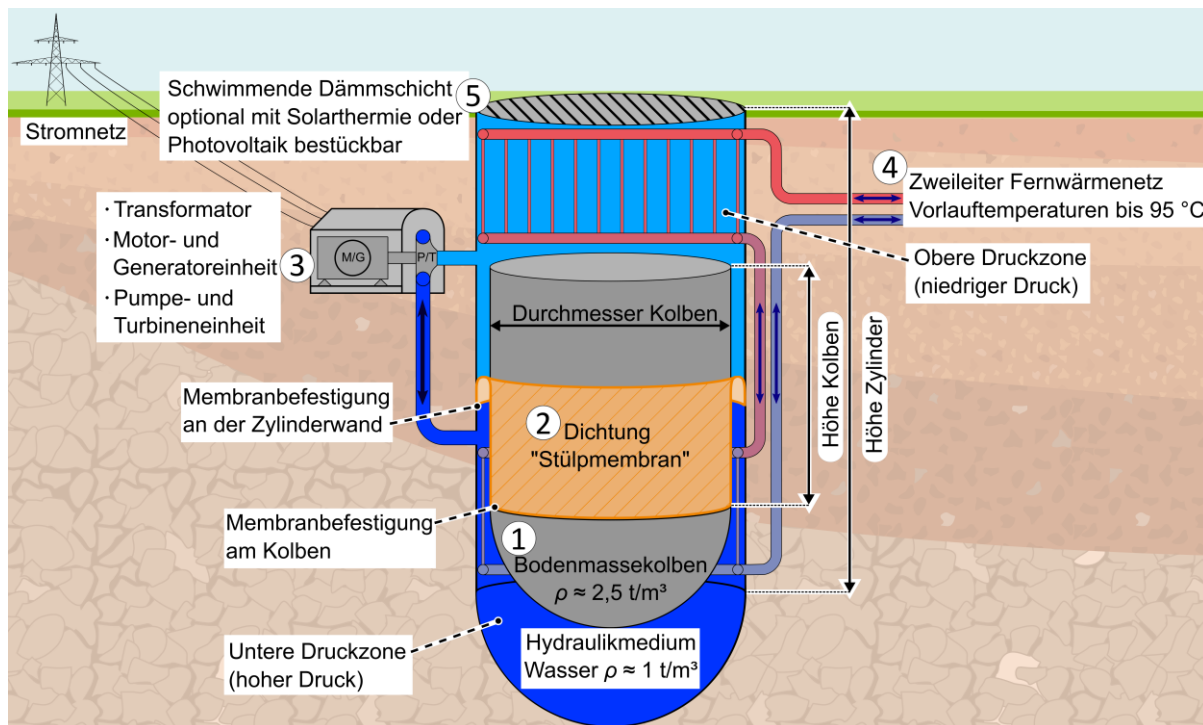


Abbildung 1: Aufbau des geotechnischen Energiespeichersystems - Stülpmembranspeicher

Die potentielle Energie, welche in der Höhenlage des Massekolbens speicherbar ist, verhält sich proportional mit dem Produkt aus dem Dichteunterschied zwischen Massekolben und Hydraulikmedium, dem Kolbenvolumen, der Erdbeschleunigung sowie dem Kolbenhub:

$$E_{pot} = \Delta\rho \cdot V_{Kolben} \cdot g \cdot h_{Hub}$$

$$V_{Kolben} = V_{Zylinder} + V_{Halbkugel} = \pi \left(\frac{d_{Kolben}^2}{4} \cdot h_{kolben} + \frac{d_{Kolben}^3}{12} \right)$$

Bei einer begrenzten Tiefe erreicht die Energiemenge ein Maximum bei $h_{hub} \approx h_{Kolben}$ und ist somit mit der Dimension der Zylindertiefe skalierbar. Wird die Ausdehnung des

Kolbendurchmessers mit konstantem Verhältnis zur Zylindertiefe skaliert, wächst die **potentielle Energie mit der vierten Potenz** der Baugröße eines solchen Systems.

Die **thermische Energie** im Hydraulikmedium hingegen ist an das Produkt aus Wasservolumen, spezifischer Wärmekapazität und Wassertemperaturdifferenz gekoppelt und wächst somit **kubisch** zur Systemgröße:

$$E_{th} = c p_{Wasser} \cdot V_{Wasser} \cdot \Delta\vartheta$$

$$V_{Wasser} = \pi \left(\frac{(d_{Kolben} + 2 \cdot Ringspalt)^2}{2} \cdot h_{kolben} + \frac{(d_{Kolben} + 2 \cdot Ringspalt)^3}{12} \right) - V_{Kolben}$$

Je nach Größenordnung eines solchen Systems entscheidet sich, ob die Speicherung von Strom [4], in Form von potentieller Energie, oder die Speicherung von thermischer Energie vorrangig ist. In Abbildung 2 wird der Zusammenhang einer linearen Skalierung¹ eines SMS und der resultierenden Lage- und Wärmekapazitäten bei einer Temperaturdifferenz im Wasser von 20 K dargestellt. Die Größenordnung eines Demonstrators befindet sich in der Mitte des grünen Bereiches. Die Prototypengröße eines SMS ist ab 300 m Zylindertiefe erreicht.

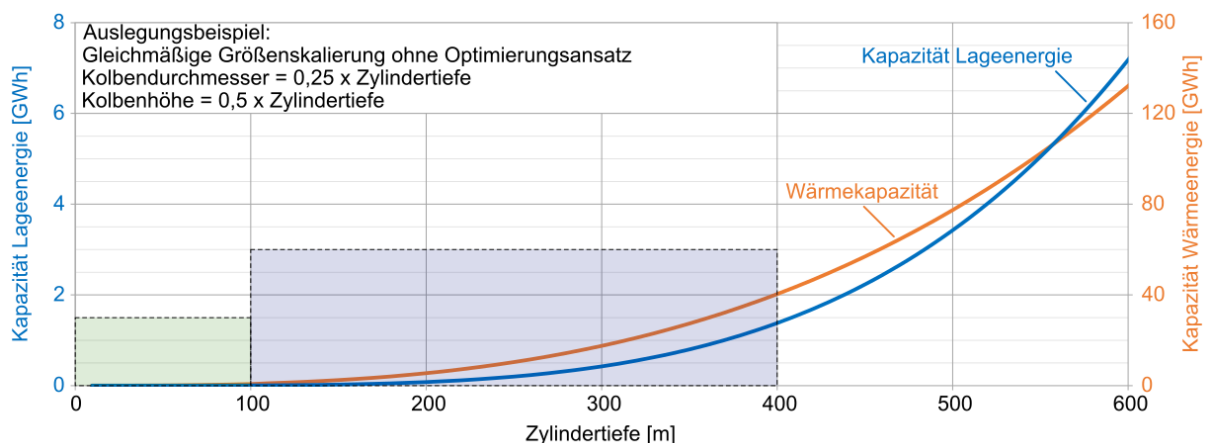


Abbildung 2: Potentielle und thermische Energiespeicherkapazitäten eines SMS bei gleichmäßiger Größenskalierung und einer Wassertemperaturdifferenz von 20 K

Die eingefärbten Bereiche aus Abbildung 2 werden in Abbildung 3 vergrößert dargestellt. Diese Detailausschnitte zeigen die jeweiligen Energiekapazitäten transformiert auf Tagesladungen² bzw. auf den erforderlichen Kapazitätsbedarf für eine entsprechende Einwohneranzahl eines Versorgungsgebietes. Dabei ist zu beachten, dass der Bedarf der Raumwärme stark vom Dämmstandard des versorgten Gebäudebestands und der jeweiligen Saison abhängt [5]. Aus der vereinfachten Annahme, dass der Dämmstandard von 1970 und 2020 zu gleichen Teilen vorhanden ist und die durchschnittliche Wohnfläche pro Person in Deutschland 47,7 m² [6] beträgt, wird ein Warmwasserbedarf von rund 950 KWh und ein Raumwärmebedarf von 4.890 KWh pro Person im Jahr benötigt. Die resultierende Summe ergibt eine überschlägige erforderliche Speicherkapazität, pro Einwohner, für eine regenerative Fern- oder Nahwärmeversorgungsstrategie.

¹ Doppelter Durchmesser ergibt vierfache Fläche, achtfaches Volumen und mit der Verdoppelung des Hubwegs 16-fache potentielle Energie.

² Eine Tagesladung entspricht der im Langzeitdurchschnitt in einem Versorgungsgebiet pro Tag verbrauchten Energie des betrachteten Sektors wie Strom oder Wärme.

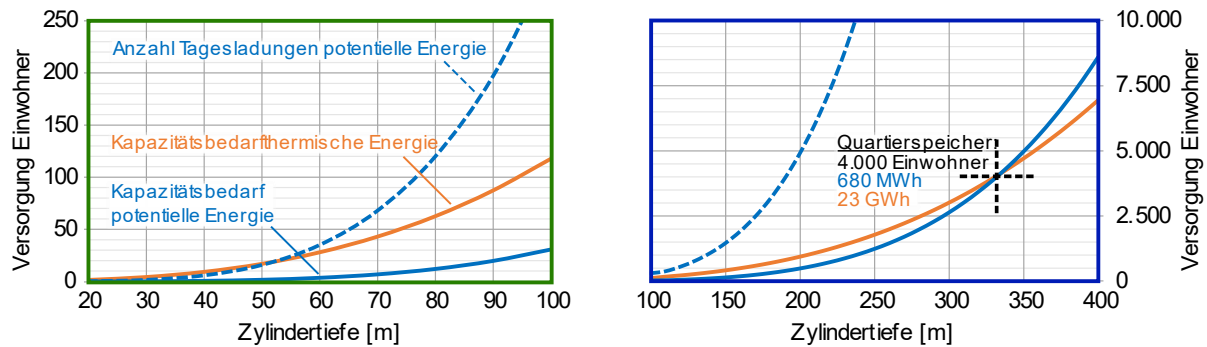


Abbildung 3: Potentielle und thermische Energiespeicherkapazitäten eines SMS bei gleichmäßiger Größenausdehnung transformiert auf erforderlichen Kapazitätsbedarf bzw. Tagesladungen pro Einwohner

Der Schnittpunkt bei 340 m zeigt eine Speichergröße, bei welcher ausreichend thermische und potentielle Kapazität für eine regenerative Energieversorgung eines beispielhaft angenommenen Quartiers mit rund 4.000 Einwohnern bereitgestellt wird. Dieser Schnittpunkt kann mittels einer Veränderung der Geometrieverhältnisse und der Temperaturdifferenz angepasst werden. Dabei ist festzuhalten, dass ein SMS mit mittleren Dimensionen (Zylindertiefe < 340 m) ein Quartierspeicher für Wärme mit zusätzlicher Stromspeicherfunktion sein kann. Im Vergleich dazu hätte eine große Version des SMS (Zylindertiefe > 340 m) die potentielle Kapazität für einen kommunalen Stromspeicher und einen Zusatznutzen als Quartierspeicher für Wärme. Unter Beachtung von Wirkungsgraden und Verlusten beim Energietransport sowie des aktuellen und zukünftigen Bedarfs solcher Speicher wird großen Systemen daher die Rolle eines städtischen oder regionalen Stromspeichers zugeschrieben. Kleine und mittlere Systeme fungieren als kommunale Wärmespeicher mit zusätzlicher Stromspeicherfunktion. Ein aktuelles Promotionsvorhaben wird u. a. entsprechende Dimensionierung zwischen Systemdurchmesser und -tiefe konkretisieren und optimale Verhältnisse bei realer Ein- und Ausspeicherdynamik von thermischer Energie ermitteln.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Energiespeicherbedarf für eine erneuerbare Versorgung

Die Rahmenbedingungen der Forschungs- und Projektarbeiten³ der *TH Nürnberg* rund um die Gestaltung eines sicheren, ökonomischen sowie regenerativen Energieversorgungssystems [7] decken sich mit dem politischen Ziel der Bundesrepublik Deutschland, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu sein [8]. Zur Überbrückung der zu erwartenden Dunkelflauten einer dekarbonisierten, wetterabhängigen Stromversorgung gewinnt das untersuchte Szenario an Relevanz, welches mit Pumpspeicherwirkungsgraden von 80 % Energiespeicherkapazitäten von rund fünf bis zwölf Tagesladungen – abhängig von der Größe des Versorgungsgebietes⁴ – empfiehlt [9]. Die daraus resultierenden Auf- und Entladedauern in Verbindung mit wettbewerbsfähigen und reell umsetzbaren Speichergrößen eines SMS ergeben die

³ Geordneter Zugriff auf die veröffentlichten Projekte: <https://www.th-nuernberg.de/de/person/popp-matthias/>

⁴ Mindestens fünf Tagesladungen für ein leistungsstark vernetztes, europäisches, regeneratives Stromnetz. Mindestens zwölf Tagesladungen für eine regionale/zellulare, regenerative Stromversorgung in Mitteleuropa. Bspw. DE, 705 W Durchschnittsleistung, 80 Mio. Einwohner bei zwölf Tagen, entspricht rund 20 TWh Kapazität

potentielle Energie-Schnittmenge im Ragone-Diagramm, siehe Abbildung 4. Analog dazu entsteht die sensible Wärme-Schnittmenge für eine saisonale Wärmespeicherstrategie.

Das grüne und rote Band zeigt die jeweilige Zeitspanne, welche ein Energiespeicher bei ausgebauten regenerativen Energiequellen überbrücken muss, um eine stabile Versorgung während der am längsten zu erwartenden Energiedefizitphasen des Wetters zu garantieren. Die SMS-Datenwolken setzen sich aus den Kapazitätsgrößen der Abbildung 2 und einem Verhältnis zwischen Kapazität und Umwandlungsleistung zusammen, welches die gespeicherten Energien bei Nennlast bzw. bei durchschnittlicher Bedarfsleistung über die benötigte Zeitspanne zur Verfügung stellt. Mit entsprechender Auslegung schließt der SMS eine Lücke der aktuellen Speichertechnologien im Versorgungsbereich zwischen einem Dorf und einer kleinen bis mittelgroßen Stadt.

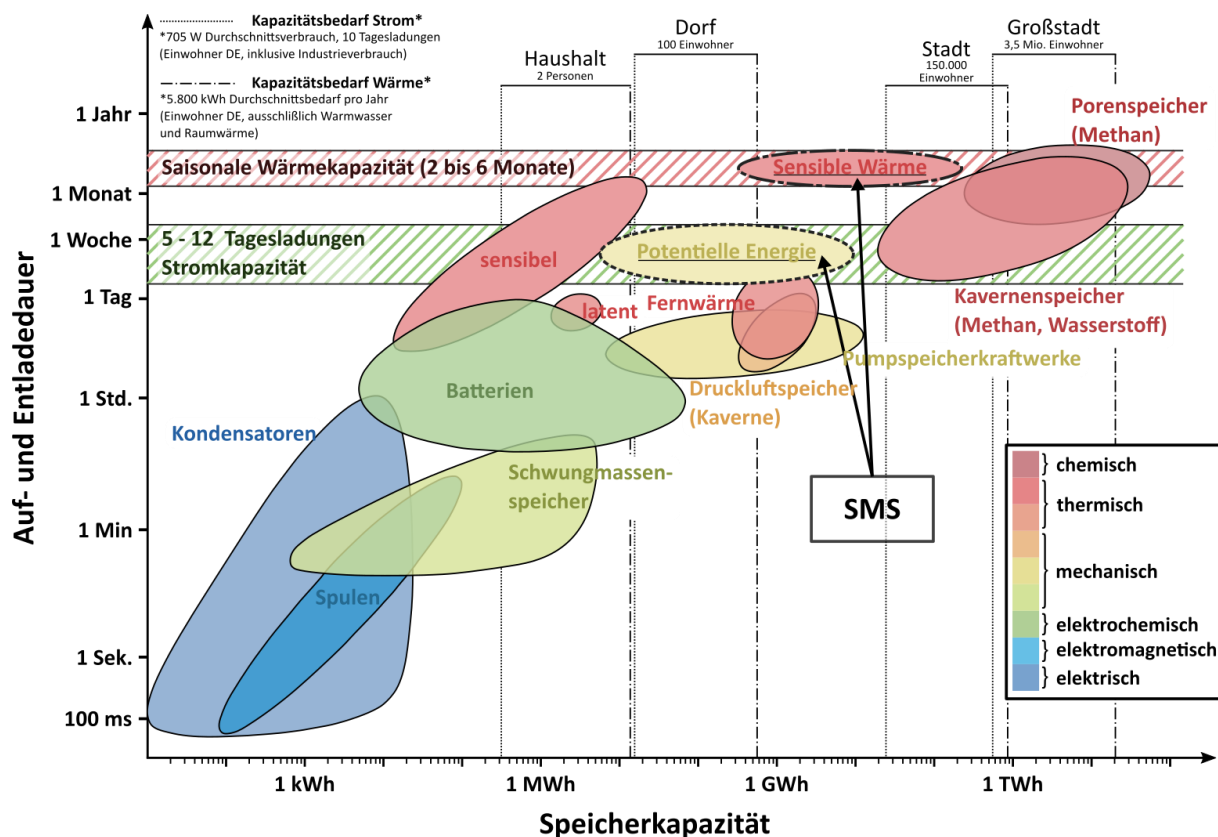


Abbildung 4: Energiespeicherdimensionen eines Stülpmembranspeichers im Vergleich der in Deutschland existierenden Speicheranlagen, abgeleitet aus Ragone-Diagramm, Stand 2016 [2], und eigenen Arbeiten

2.2 Heißwasserwärmespeicher

Unterirdische thermische Energiespeicher in Verbindung mit solarthermischen Anlagen sind seit etwa 25 Jahren ein Bestandteil der deutschlandweiten Forschung, um fossile Energieträger für die Wärmebereitstellung einzusparen [10]. Bisherige Technologiekonzepte zur großtechnischen saisonalen Wärmespeicherung lassen sich in die Methoden *Tank Thermal Energy Storage Method*, *Pit Thermal Energy Storage Method*, *Borehole Thermal Energy Storage Method*, *Reinforced Concrete Energy Piles* und *Aquifer Thermal Energy Storage Method* einordnen [11]. Numerische Berechnungen sowie experimentelle Auswertungen ergeben, dass der Wärmeverlust und die damit verbundene Effizienz eines unterirdischen, saisonalen Heißwasserwärmespeichers an die Betriebszeit gekoppelt ist,

während die Qualität der Wärmedämmung, sofern keine Grundwasserströme vorhanden sind, nur einen geringen Einfluss aufweist [12–14]. Die Wärmeverluste eines Langzeitspeichers erhitzen den umgebenden Untergrund und senken damit den örtlichen Temperaturgradienten. Mit steigender Betriebszeit bildet sich dadurch eine natürliche Dämmschicht aus. Je nach Speicherladezustand befindet sich Wasser mit unterschiedlichen Temperaturen im Speicher, welches sich ausgehend vom natürlichen Viskositäts- und Dichteunterschied in Höhenschichten anordnet. Die resultierenden örtlichen Wärmesprünge begünstigen den Energietransport und beeinflussen, speziell im System mit Solarthermieanlagen, den Wirkungsgrad der gesamten Wärmeversorgung.

Die Stabilität der Temperaturschichtung innerhalb eines Wärmespeichers wird mit der dimensionslosen *Schichtladungskennzahl* N angegeben. Diese wird aus der produzierten Entropie des zu untersuchenden Systems im Verhältnis zur Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Referenzsystems ermittelt [15–18]. Ein sensibler Wärmespeicher mit hoher Schichtladungskennzahl ermöglicht entsprechend einen geringen Exergieverlust bei der Aus- und Einkopplung der thermischen Energie. Die Stabilität der Schichtung ist besonders relevant für den wirtschaftlichen Betrieb von großen bzw. Langzeitspeichern [19]. Mehrere konstruktive Maßnahmen, wie bspw. Prallplatten, Steigrohre und externe Wärmetauscher, werden genutzt, um Verwirbelungen sowie Durchmischungen zu minimieren, um dadurch den Gesamtwirkungsgrad der thermischen Energiespeicher zu optimieren [17, 20, 21].

In Abbildung 5 wird das Prinzip der Schichtladungskennzahl N bei einem thermischen Ladezustand anhand von drei unterschiedlichen Durchmischungsstufen eines Heißwasserwärmespeichers mit der schematischen Geometrie eines SMS dargestellt.

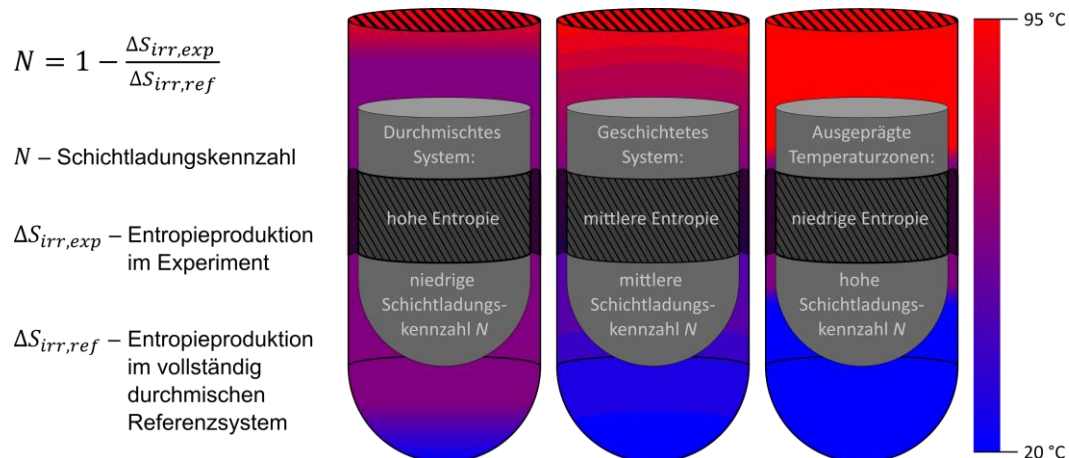


Abbildung 5: Szenarien der Wärmeschichtung innerhalb eines SMS

Das Szenario „Ausgeprägte Temperaturzonen“ zeigt den anzustrebenden Systemzustand für eine optimale Bewirtschaftung eines Heißwasserwärmespeichers.

2.3 Lageenergiespeicher

Der Grundgedanke, Energie in Form eines hydraulisch angehobenen Massekolbens zu speichern, wird mit verschiedenen Technologiekonzepten verfolgt. Diese lassen sich als *Well Method* (WM) oder *Deep Shaft Method* (DSM) kategorisieren [22] und unterscheiden sich zudem im Dichtsyste. In Abbildung 6 wird ein Überblick über die Onshore Lage-

energiespeicherkonzepte zur großtechnischen Energiespeicherung in Größenrelation mit bekannten sowie vergleichbaren Systemen illustriert dargestellt.

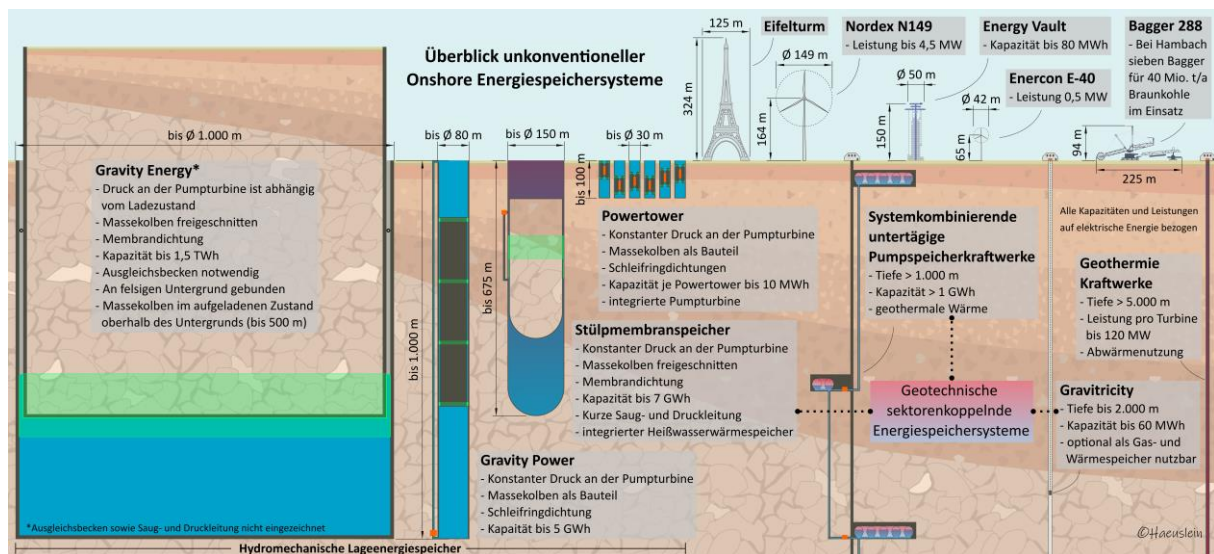


Abbildung 6: Größenrelation Onshore Konzepte zu großtechnischen Energiespeichersystemen im Überblick

Aktuell existieren zwei real erprobte Modellversuchsanlagen eines hydraulischen Lageenergiespeichers, die sogenannten *Powertower 1* und *Powertower 2*. Diese Energiespeichertechnologie wird an der Universität in Innsbruck erforscht [23]. Das Konzept ist einer DSM mit Schleifringdichtung zuzuordnen und wurde bisher ausschließlich als Stromspeicher kategorisiert. Ein Cluster mehrerer solcher Anlagen soll ein System für größere Stromkapazitäten bei hoher Flexibilität darstellen.

Neben diesen umgesetzten Forschungsprojekten gibt es weitere theoretische Konzepte hydraulischer Lageenergiespeicher. Ein Konzept ist der *Hydraulic Rock Storage*, welcher unter dem Namen *Gravity-Storage* (GS) bekannt wurde. Der GS ist dem Technologiekonzept der *Well Method* zuzuordnen. Anfangs wurde der Speicher mit Schleifringdichtung konzipiert, welche im weiteren Verlauf durch eine Membrandichtung ersetzt wurde. Der *Hydraulic Rock Storage* ist an felsige Bodenzusammensetzungen gebunden, da sich der Massekolben im aufgeladenen Speicherzustand oberhalb der Oberfläche, also außerhalb des stabilisierenden hydrostatischen Druckbereichs befindet [24]. Dadurch steigt der Aufwand durch ein zusätzlich benötigtes Wasserreservoir sowie die Komplexitäten des Bauprozesses. Außerdem reduziert der sichtbare Massekolben die zu erwartende Akzeptanz dieser Technologie enorm. Das WM-System erreicht allerdings bei großen Versionen im Vergleich zum DSM-Konzept eine höhere Energiedichte mit Bezug auf die damit ausschließlich verfolgte Stromspeicherung.

Ein Konzept für Lageenergiespeicher der DSM, mit dem Namen *Gravity Power Modules*, wird vom US-Unternehmen *Gravity Power LLC* verfolgt [25, 26]. Bei diesem DSM-Speicher soll der Massekolben aus einem Material mit hoher Dichte angefertigt werden. Das deutsche Unternehmen *Gravity Energy AG* möchte eine GPM-Demonstrationsanlage in Weilheim errichten [27]. Nach Aussagen von *Gravity Energy AG* wird das schleifende Dichtsystem in Laborumgebung auf Basis einer Gleitringdichtung erprobt. Bisher wurde einzig die *Power-to-Power*-Funktion thematisiert.

Ein geotechnisches Lageenergiespeicherkonzept auf rein mechanischer Basis verfolgt das britische Unternehmen *Gravitricity Ltd*. Dieses Konzept priorisiert die hohe Dynamik

mechanischer Energiespeicher. Hierbei sollen je nach Energiebedarf Massen bis zu 12.000 t mittels Stahlseilantrieb innerhalb eines bis zu 1.500 m tiefen Schachtes bewegt werden. Die mechanische Ausführung benötigt keine Dichtelemente, somit ist der Instandhaltungsaufwand gering. Die Schächte sollen zusätzlich als Gas und Wärmespeicher genutzt werden. Die Anwendung dieser Technik innerhalb vorhandener Minenschächte lässt eine hohe Akzeptanz erwarten. Allerdings sind die Größen der bewegten Massen und die damit verbundene speicherbare Kapazität begrenzt. Im Jahr 2021 wurde ein 15 m hoher Demonstrator, als Hochbau, mit zwei Gewichten von jeweils 25 t und einem Leistungsanschluss von 250 kW umgesetzt. Ein Anschlussprojekt einer 4–8 MW-Demonstrationsanlage soll folgen [28, 29].

Das geotechnische Speicherkonzept der *Technischen Universität Graz* verfolgt die Kombination von Pumpspeichertechnik und thermischer Energiespeicherung im Untergrund, allerdings nicht in der Form eines hydraulischen Lageenergiespeichers, sondern eines unterirdischen Kavernenspeichers [30–32]. Je nach Höhenunterschied der unterirdischen Stollen lassen sich sehr hohe Kapazitätsdichten erzeugen.

Speziell die geotechnischen sektorenkoppelnden Energiespeichersysteme ermöglichen durch Speicherung von mindestens zwei Energieformen große Kapazitäten auf kleinstem Flächenverbrauch und sind wertvolle Querschnittstechnologien für innovative und effiziente Umwandlungsketten innerhalb einer Power-to-X-Versorgungsstruktur. Trotz vielfältiger Vorteile scheiterte bisher die Realisierung solcher Speichersysteme auf Grund von bürokratischen oder gesellschaftlichen Hürden sowie am finanziellen Risiko solcher Anlagen. Mit dem Vorhaben GeoMem beabsichtigt die *Technische Hochschule Nürnberg*, in Kooperation mit Industriepartnern die anwendungsorientierte Grundlagenforschung des SMS-Konzeptes abzuschließen, um nach Projektende ein weiteres, idealerweise EU-gefördertes Projekt zu initialisieren, in dem ein geotechnischer Demonstrator errichtet werden soll.

3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Um die Vorbereitungen für ein aussagekräftiges Demonstrator-Projekt eines geotechnischen Wärme- und Stromspeichers abzuschließen, sind folgende Meilensteine zu erarbeiten:

- 1) Genereller Machbarkeitsnachweis und Validieren des Systemverhaltens der Technologiekombination eines Membran-Lageenergiespeichers mit einem Heißwasserwärmespeicher durch eine Multiphysiksimulation und einen anwendungsorientierten Versuchsstand in Laborumgebung.
- 2) Industrielle Entwicklung einer hochskalierbaren, kostengünstigen und langlebigen Membrandichtung für reell herrschende Druck-, Temperatur- und Einbauanforderungen eines SMS der Pilotgröße, inklusive Montage- und Befestigungskonzept.
- 3) Ausarbeitung eines geotechnischen Bauverfahrens, inklusive einer innovativen Tiefbaumaschine und Materialkombination für eine standardisierte, kostengünstige und sichere Baustrategie, welche für einen hohen Automatisierungsgrad geeignet ist.

3.1 Forschungsbedarf: Systemverhalten

Für eine belastbare Kalkulation der Wärmebereitstellung innerhalb der angestrebten Geometrien- und Größenverhältnisse existieren keine aussagekräftigen Berechnungs- und Auslegungsmodelle in der Fachliteratur (bspw. VDI-Wärmeatlas: Wärmeübertragung bei freier Konvektion an einem durchströmten vertikalen Zylinder, ab Rayleigh-Zahl $> 12^{12}$). Des

Weiteren unterscheiden sich der Speicheraufbau sowie die Betriebsführung von Untersuchungsgegenständen verwandter wissenschaftlicher Arbeiten zu stark, um daraus hinreichend genau die Indikatoren für eine effiziente thermische Energiespeicherung zu ermitteln. Ziel ist es, Kennzahlen und Auslegungsempfehlungen mit einer Multiphysikmodellierung sowie Experimenten an einem Versuchsstand zu ermitteln und zu validieren.

3.1.1 Geplante Methodik

Die über einen mehrjährigen Zeitraum gesammelten Daten und Ergebnisse der Vorarbeiten, zu großen Teilen in Form von Zeitschrittanalysen, bilden die Ausgangslage für reell erwartete Speicherenergie Zu- und Abflüsse eines dekarbonisierten, wetterabhängigen Energiesystems. Die Rahmenbedingungen der einzelnen Energieumwandlungstechnologien, bspw. Anlagenkennlinien, -verhalten und -verluste, orientieren sich am aktuellen Stand der Technik und im Rahmen pessimistischer sowie optimistischer Entwicklungsaussicht. In Verbindung mit den notwendigen Formen und Geometrien des Untersuchungsobjektes wird eine Multiphysik-Simulation aufgebaut, welche auf makroskopischer Größenordnung Fluid- und Wärmeströme in Abhängigkeit der stündlich variierenden Energietransporte im Energiespeicher räumlich abbilden wird. Die über die Systemgrenze abfließenden Verluste werden unterschieden in die Wärme, welche durch freie Konvektion und Strahlung an der Oberfläche abgeführt wird, sowie die Energiemenge, welche die Umgebung aufheizt und weiterhin mit dem Speichersystem in direkter Wechselwirkung steht. Eine Variationsmöglichkeit bei der Modellierung besteht in der Art und der Form der Wärmeübertrager. Zum aktuellen Zeitpunkt wird eine Konstruktion aus radial angeordneten vertikalen Rohren an der Zylinderaußenfläche favorisiert, welche im angestrebten Temperatur- und Größenbereich eine turbulente freie Konvektion, außerhalb des Gültigkeitsbereichs der *Rayleigh-Zahl*, zur Folge hat. Der Fokus wird beim Fluid- und Wärmeaustausch, ausgehend von der Kolbenbewegung, zwischen der oberen sowie unteren Druckzone im Lageenergiespeicher liegen. Diese Bewegungen sind direkt an die zeitlichen Angebots- und Nachfragesituationen des Strommarktes gebunden und weitestgehend unabhängig von der thermischen Bewirtschaftung. In Abbildung 7 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird der Einfluss der Kolbenbewegung auf die örtliche Temperaturverteilung im Wasser, in Hinblick auf die Verdrängung einer schmalen Mischzone, dargestellt. Je nach Konstellation des thermischen (im Beispiel konstant bei 50 %) und des potentiellen Speicherladezustandes werden Konsequenzen oder Synergien für die Wärmeentnahme und -abgabe erwartet.

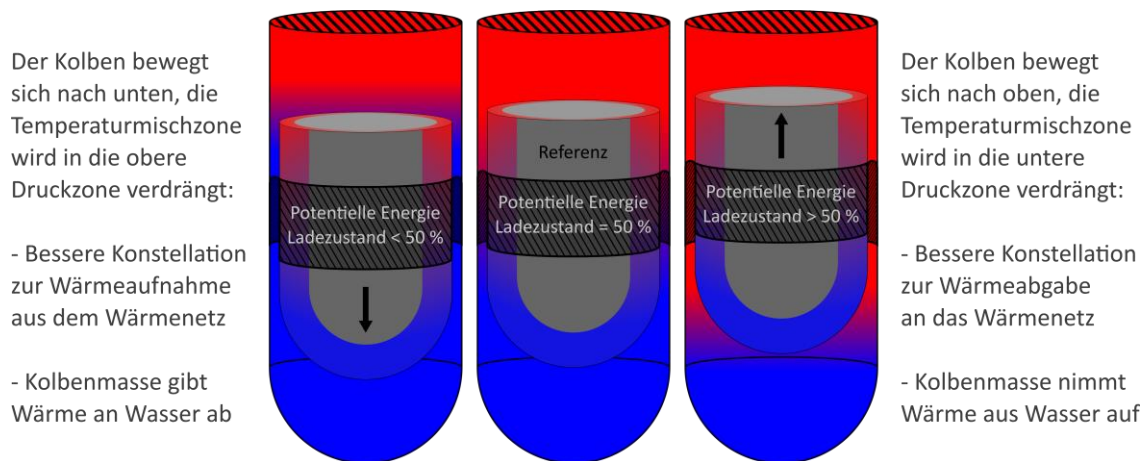


Abbildung 7: Verdrängung der Temperaturmischzone bei konstantem thermischen Ladezustand durch die Kolbenbewegung im Lageenergiespeicher

3.2 Entwicklungsbedarf: Stülpmembrandichtung

Eine Konzeptidee ist, die Stülpmembran-Dichtung aus industriell hergestellten Förderbandsegmenten aufzubauen. Der weltweit stärkste derzeit befindliche Fördergurt weist bei Verwendung von hochfesten Stahlseilen eine Zugfestigkeit von 10 kN/mm Gurtbreite auf [33]. Durch spezielle Verbindungsverfahren und mobile Vulkanisationspressen können die Fördergurte vor Ort verbunden werden und dadurch eine Gesamtlänge von mehreren Kilometern erreichen [34]. Für die Anwendung als Dichtung ist es notwendig, dass die industriell hergestellten Bandsegmente entlang der Länge anstatt der Breite verbunden werden. Aktuelle Techniken sind auf Längen < 5 m beschränkt [35]. Der Forschungsbedarf liegt auf der Entwicklung eines von der Länge unabhängigen Verbindungsprozesses, angepasst an der Bauumgebung eines SMS. Ebenfalls wird die Befestigung der Membran an Zylinder- und Kolbenwand eine Neuentwicklung sein. Für die physikalischen und chemischen Anforderungen einer Membrandichtung sind neue Konfigurationen bekannter Komponenten eines Gurtförderbandes vorgesehen.

3.3 Entwicklungsbedarf: Bauverfahren und Maschine

Die Konzeptidee, das geotechnische Energiespeichersystem aus radial angeordneten Schlitzwänden mit halbkugelförmiger Gründung aufzubauen, garantiert einen material-, energie- und zeitsparenden Bauvorgang bei gleichzeitig hoher Personen-, Umwelt- und Anlagensicherheit. Mit aktuellen Tiefbauverfahren und Maschinen sind vertikale Schlitzwände bis Tiefen von rund 200 m herstellbar [36]. Dieses Tiefbauverfahren realisierte bereits kreisförmige Baugruben, gemäß den Anforderungen eines SMS, in der Größenordnung eines Demonstrators [37]. Der Entwicklungsschwerpunkt liegt auf einem Tiefbauverfahren für Tiefen > 400 m sowie auf Maschinenkonzepten, welche in einem Arbeitszyklus flexibel zwischen der vertikalen und horizontalen Achse eine Schlitzwand erzeugen können. Ebenfalls soll die bislang minimal herstellbare Schlitzwanddicke gegenüber dem aktuellen Stand der Technik halbiert werden. Die Anforderungen orientieren sich an Bau und geotechnischen Herausforderungen eines SMS mit dem Ziel, in Erweiterung des Standes der Technik eine standardisierbare, in hohem Grad automatisierte Baustrategie, mit reduziertem Material- und Energieaufwand, zu entwickeln.

4 Aussicht

Im Best-Case-Szenario wird das aktuelle Forschungsvorhaben *GeoMem* mit nationalen Mitteln gefördert, mit welchem die Komponenten-, Verfahrens-, und Maschinenentwicklungen sowie die Grundlagenforschung bis 2025 abgeschlossen werden. Bei erfolgreicher Studie wird ein nachfolgendes Projekt im europäischen Raum angestrebt, mit welchem die Technologiereife *TRL 6* innerhalb der aktuellen Dekade erreicht werden soll. Der angestrebte geotechnische Demonstrator wird noch nicht konkurrenzfähig gegenüber aktueller Stromspeichertechnologien sein; dennoch wird dieser ausreichend Wärmekapazität für die zeitliche Entkopplung eines Kraft-Wärme-Systems bereitstellen und wäre somit ein Wärmespeicher mit zusätzlicher Stromspeicherfunktion. Nach aktuellen Kalkulationen wird ein SMS der *TRL 7* bei geplanter Maschinenentwicklung große Kapazitäten für das elektrische Netz wettbewerbsfähig anbieten und gleichzeitig ausreichend Wärme für eine Warmwasser- und Raumwärme-Versorgung einer Kommune oder eines Stadtquartiers speichern können. Entsprechend ist *TRL 7* das Ziel des gesamten Forschungsvorhabens, um ab 2030 bis zum Jahr 2050 einen großflächigen Ausbau von ökonomisch und ökologisch vertretbaren Energiespeicherkapazitäten zu realisieren.

Referenzen

- [1] European Commission, "The European Green Deal", Brussels, 2019.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [2] M. Sterner und I. Stadler, "Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration", Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [3] M. Popp, "Energiespeicher: Offenlegungsschrift", Patent DE102 013 111 543A1, 2014.
- [4] M. Popp, "Kostenoptimierter Mix aus Energiespeicher, Wind und Solarkraftanlagen: Offenlegungsschrift", Patent DE102 009 007 892A1, 2010.
- [5] T. Nussbauer, S. Thalmann, A. Jenni, and J. Ködel, "Planungshandbuch Fernwärme (V1.2)", Bundesamt für Energie (BFE), 2018.
http://www.verenum.ch/Dokumente/PLH-FW_V1.2.pdf
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [6] Umweltbundesamt, "Wohnfläche – Zahl der Wohnungen gestiegen", 2021
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#zahl-der-wohnungen-gestiegen>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [7] M. Popp, Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, "Klimapakt Deutschland", 2021.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimapakt_deutschland_bf.pdf
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [9] M. Popp, "Regionale Selbstversorgung kontra Gleichstromtrassen: Vortrag des Monats Dezember, Neue Materialien Bayreuth", Bayreuth, 2017.
http://www.poppware.de/Veranstaltungen/Matthias_Popp_Regionale_Selbstversorgung_kontra_Gleichstromtrassen.pdf
(Aufgerufen: 21.01.2022)

- [10] T. Schmidt, M. Benner, W. Heidmann, and H. Müller-Steinhagen, "Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern", in Fachseminar Oberflächennahe Geothermie, OTTI Energie Kolleg, Ed. Eigenverlag, 2003.
- [11] P. Oclon, Renewable energy utilization using underground energy systems. [S.l.]: Springer Nature, 2021, vol. 84.
- [12] H. Kim, D. Park, E.-S. Park, and H.-M. Kim, "Numerical modeling and optimization of an insulation system for underground thermal energy storage", Applied Thermal Engineering, vol. 91, pp. 687–693, 2015.
- [13] F. Ochs, A. Dahash, A. Tosatto, and M. Bianchi Janetti, "Techno-economic planning and construction of cost-effective large-scale hot water thermal energy storage for renewable district heating systems", Renewable Energy, vol. 150, pp. 1165–1177, 2020.
- [14] Z. Xie, Y. Xiang, D. Wang, O. Kusyy, W. Kong, S. Furbo, and J. Fan, "Numerical investigations of long-term thermal performance of a large water pit heat storage", Solar Energy, vol. 224, pp. 808–822, 2021.
- [15] J. van Berkel, "Mixing in thermally stratified energy stores", Solar Energy, vol. 58, no. 4-6, pp. 203–211, 1996.
- [16] J. van Berkel, C. C. Rindt, and A. A. van Steenhoven, "Modelling of two-layer stratified stores", Solar Energy, vol. 67, no. 1-3, pp. 65–78, 1999.
- [17] Y. M. Han, R. Z. Wang, and Y. J. Dai, "Thermal stratification within the water tank", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 5, pp. 1014–1026, 2009.
- [18] Michel Y. Haller, Robert Haberl, Patrick Persdorf, Andreas Reber, "Storex: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern", Rapperswil, 2015.
<https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=61162&Load=true>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [19] R. Stieglitz and V. Heinzl, "Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen", Berlin and Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [20] S. e.-D. Fertahi, A. Jamil, and A. Benbassou, "Review on solar thermal stratified storage tanks (stsst): Insight on stratification studies and efficiency indicators", Solar Energy, vol. 176, pp. 126–145, 2018.
- [21] M. A. Gómez, J. Collazo, J. Porteiro, and J. L. Míguez, "Numerical study of an external device for the improvement of the thermal stratification in hot water storage tanks", Applied Thermal Engineering, vol. 144, pp. 996–1009, 2018.
- [22] A. J. Sangstar, "Massive energy storage systems enable secure electricity supply from renewables", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, no. 4, pp. 659–667, 2016.
- [23] V. Neisch and M. Aufleger, "Hydraulischer Großenergiespeicher Powertower", Innsbruck, 2013.
<https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/4.as-ne-2020-publizierbarer-endbericht-Powertower-au2.pdf>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [24] E. Heindl, "Gravity-storage", 2020.
<https://heindl-energy.com>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [25] J. Fiske, "System and method for storing energy: Patentschrift", Patent WO 2009/100 211, 2010.
- [26] J. Fiske, "Gravity Power Modules", 2017.
<http://www.gravitypower.net>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [27] Gravity Energy AG, "Forschungs- und Demonstrationsanlage in Weilheim", 2020.
<http://gravityenergyag.com>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [28] Gravitricity Ltd, "Gravitricity – Fast, long-life energy storage", 2020.
<https://www.gravitricity.com>
(Aufgerufen: 21.01.2022)

- [29] FuelCellsWorks, "Gravitricity Adds Hydrogen to Energy Storage Mix", 2021
<https://fuelcellsworks.com/news/gravitricity-adds-hydrogen-to-energy-storage-mix/>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [30] F. G. Pikel, W. Richter, and G. Zenz, "Pumped storage technology combined with thermal energy storage - power station and pressure tunnel concept", *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 10, no. 5, pp. 611–619, 2017.
- [31] F. G. Pikel, W. Richter, and G. Zenz, "Großtechnische, wirtschaftliche und effiziente untertägige Energiespeicher", *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 12, no. 3, pp. 251–269, 2019.
- [32] F. G. Pikel, W. Richter, and G. Zenz, "Systemkombinierende untertägige Pumpspeicherkraftwerke für eine integrative und effiziente Energietransformation", *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, vol. 44, no. 1, pp. 39–46, 2020.
- [33] Continental AG, "ContiTech Presents Highly Accurate Measurement Technology and the Strongest Steel Cord Conveyor Belt in the World", 2017.
<https://www.continental.com/en/press/press-releases/hannovermesse-70594>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [34] Continental AG, "Continental Strategically Sharpens Conveying Solutions Portfolio and Unifies Branding Globally", 2021
<https://www.continental.com/en/press/press-releases/new-strategic-conveying-solutions-portfolio-245886>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [35] Continental AG, "Continental Vacuum Filter Belts", 2021.
<https://www.continental-industry.com/en/solutions/conveyor-belt-systems/processing-special-belts/filtering-draining/products/product-range/vacuum-filter-belts>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [36] BAUER Maschinen GmbH, "Weltrekord: Bauer-Frästechnologie erreicht 228 m", 2019.
<https://www.bauer.de/bma/bauer-news/Weltrekord-Bauer-Fraesentechnologie-erreicht-228-m-00002/>
(Aufgerufen: 21.01.2022)
- [37] BAUER Maschinen GmbH, "Woodsmith Mine", 2020.
<https://www.bauer.de/bst/references/bauer-projectreference/Woodsmith-Mine-00001/>
(Aufgerufen: 21.01.2022)