

Saisonale Hochtemperatur- Energiespeicher

Datum: Februar 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	3
2. Systembeschreibung.....	5
2.1. Stromgewinnung.....	8
2.2. Konstruktion.....	9
2.3. Speichermedium.....	11
2.4. Dimensionierung.....	12
2.4.1. Temperaturniveaus.....	12
2.4.2. Wärmeverluste, Mindestgrösse.....	13
2.5. Wirkungsgrad.....	17
3. Kostenabschätzung.....	22
4. Vergleich Speichersysteme.....	25
5. Optionen.....	26
6. Gesamtschweizerische Strom-/Energieversorgung.....	28
7. Zusammenfassung.....	31
8. Abkürzungsverzeichnis.....	33

1. Vorwort

Die Nutzung der solaren Energie hat in den vergangenen Jahren sehr starke Aufmerksamkeit erlangt. Durch Photovoltaikanlagen kann solare Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt werden. Das Potenzial von Solarer Stromgewinnung auf Gebäudeflächen (Flächen die als «gut» eingestuft werden) liegt nach heutigem Stand in der Schweiz bei rund 70TWh pro Jahr. Ein Nachteil besteht leider darin, dass der grösste Teil der so gewonnen Energie im Sommer anfällt, wo die Nachfrage am geringsten ist und die Stromgewinnung durch Wasserkraft ebenfalls ihr Maximum erreicht. Eine wichtige und zentrale Frage ist: wie kann diese sehr grosse Menge Energie saisonal (über mehrere Monate) möglichst effizient und wirtschaftlich gespeichert und bei Bedarf zurück gewonnen werden? An solchen Energiespeichern wird intensiv geforscht und es existieren verschiedene Ideen. Die Speicherung mittels Wasserspeicherkraftwerke ist eine bewährte Technologie, welche jedoch in der Schweiz in der Ausbaumöglichkeit sehr begrenzt ist (am Rande erwähnt: die Wasserspeicherkraftwerke in der Schweiz können Stromüberschuss saisonal eigentlich nur begrenzt speichern, weil die Stauseen in der Regel so ausgelegt sind, dass sie während des Sommers bereits durch natürliche Wasserzuläufe gefüllt werden). Eine aus heutiger Sicht vielversprechende Lösung könnte P2G (Power-to-Gas) sein.

Im vorliegenden Dokument soll ein System betrachtet werden, das ebenfalls ein grosses Potential in sich birgt, riesige Mengen an elektrischer - und zugleich auch thermischer Energie - saisonal, mittel- und kurzfristig zu speichern. Es handelt sich dabei um das **Prinzip der Wärmeenergiespeicherung auf Hochtemperaturniveau**. Ein Prinzip das bekannt und zum Beispiel bei solarthermischen Anwendungen für den Tag-Nachtausgleich bereits seit vielen Jahren im Einsatz ist. Für die saisonale Strom-/Wärmespeicherung scheint es bis dato jedoch keine all zu grosse Bedeutung errungen zu haben. Dieses Dokument soll als Gedankenanstoss dienen, ob dies als saisonaler Energiespeicher nicht auch ein mögliches Schlüsselement für eine nachhaltige Energieversorgung mit erneuerbarer Energie sein könnte. Bei dem hier beschriebenen System handelt es sich um eine Art von «Carnot-Batterie» mit sensibler Wärmespeicherung in Gesteinsmaterial.

Ein ganz wesentlicher Aspekt bei dieser Betrachtung ist, dass die Speicherung elektrischer Energie nicht isoliert angeschaut wird. Vielmehr geht es darum, das Gesamtsystem der elektrischen UND thermischen Energieversorgung zu optimieren. Die Energiegewinnung und Verteilung spielen dabei eine ebenso wichtige Rolle wie die Speicherung. Es wird versucht das Gesamtsystem nach Kriterien wie Nachhaltigkeit (Umweltverträglichkeit, lokale Wertschöpfung, Betriebsdauer, ...), Wirtschaftlichkeit, Integrierbarkeit, Versorgungssicherheit, Unabhängigkeit (national und regional), Flexibilität (nachträgliche Erweiterungen), Kombinierbarkeit mit anderen Systemen, usw. zu optimieren.

Im Folgenden wird dieses System der Einfachheit halber mit SCB (Abkürzung für: Saisonale-Carnot-Batterie) bezeichnet.

An dieser Stelle sollen noch ein paar Gedankengänge erwähnt werden, welche bei der Entwicklung von SCB eine wesentlich Rolle spielten:

- Pragmatische Lösungsansätze:
Es soll versucht werden, anhand eines geschickten Systemdesigns mit vorhandener und bewährter Technologie einen ökologischen, langlebigen, wirtschaftlichen, sicheren, saisonalen Energiespeicher zu erstellen.

- Um wertvolle Synergie nutzen zu können, sollen im Speicher Strom- UND Wärmeenergie gespeichert werden können.
Mit jeder kWh Wärmeenergie die im Winter nicht gepumpt werden muss, muss rund 1/3 kWh weniger elektrische Energie gespeichert werden.
Der Gedanke mag im ersten Moment abstossend wirken, edle, elektrische Energie in Wärme umzuwandeln. Jedoch lässt sich Wärme – in sehr grossen Mengen – wesentlich einfacher speichern als Strom. Und Wärme auf hohem Temperaturniveau ist nicht ganz unedel, da eine Strom Rückgewinnung mit akzeptablem Wirkungsgrad möglich ist.
- Dezentrale Energieversorgung: Das Energieversorgungssystem ist in der Schweiz und Europa heute noch ziemlich stabil. Jedoch haben diverse Ereignisse in der Vergangenheit gezeigt, dass wenn zum Beispiel durch eine Naturkatastrophe das Energieversorgungssystem an einer empfindlichen Stelle getroffen wird, es zu einem grossen Schaden kommen kann. Politische Faktoren spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Dezentrale Energieversorgungszellen (die miteinander vernetzt sind, aber Bezüger über das ganze Jahr zu versorgen vermögen) können hier wesentlich zur Versorgungssicherheit beitragen. Dezentrale Energieversorgung entlastet zudem das Verteilnetz.
Der Faktor der Dezentralität ist zudem sehr wichtig, damit Wärmeenergie genutzt werden kann. Das heisst die Wärmeenergie muss am dem Ort und zum entsprechenden Zeitpunkt zur Verfügung stehen wo sie gebraucht wird. Und dies zudem auf einem geeigneten Temperaturniveau.
Kurz gesagt: Energie soll wenn möglich lokal gewonnen, gespeichert und genutzt werden.
- Prozesswärme der Industrie ist ein nicht unwesentlicher Anteil des Energiebedarfs. Die Frage stellt sich: wie kann besonders im Winter diese Wärme (ein Grossteil dieser Wärmeenergie bedarf ein Temperaturniveau von $>80^{\circ}\text{C}$) bereit gestellt werden wenn fossile Brennstoffe wegfallen? Zum einen kann der Stromüberschuss im Sommer in andere Energieformen (z.B. Gas) umgewandelt, gespeichert und schliesslich im Winter für die Wärmebereitstellung genutzt werden. Wäre es aber nicht auch denkbar den Stromüberschuss im Sommer direkt in Wärmeenergie umzuwandeln, zu speichern und bei Bedarf im Winter zu nutzen?
Analoge Überlegungen können auch für Raumwärme und Warmwasser angestellt werden. Im weiteren soll SCB eine einfache Möglichkeit bieten, Abwärme aus industriellen Prozessen (in einem Temperaturbereich von 80°C ... 1000°C) möglichst effizient nutzen zu können.
- Integrierbarkeit:
SCB soll sich möglichst harmonisch in die Landschaft, aber auch in bestehende Infrastruktur einbinden lassen. Konkret könnte das mit folgenden Stichworten etwas umschrieben werden: unauffällig, leise, anspruchslos (bezüglich geologischer Bedingungen; Anpassung bestehender Infrastruktur), flexibel (z.B. im Bezug auf Temperaturniveau, Baugrösse), kombinierbar mit anderen Systemen (Verbrennungsanlagen, Geothermie, Solarthermie, ...).

2. Systembeschreibung

Bei dem hier beschriebenen System handelt es sich um eine Carnot-Batterie mit sensibler Wärmespeicherung auf hohem Temperaturniveau, welche ausgelegt ist für eine saisonale Strom- und Wärmespeicherung. Wobei die kurzfristige (ca. ein Tag) und mittelfristige (einige Tage bis einige Wochen) Strom- bzw. Wärmespeicherung darin auch eingeschlossen ist.

Das Grundprinzip der Carnot-Batterie besteht darin, überschüssigen Strom in Form von Wärme auf hohem Temperaturniveau zu speichern. Bei Bedarf wird die Wärmeenergie dem Speicher entnommen und mittels WKK daraus wieder Strom generiert. Die Abwärme der WKK soll wenn möglich für Raumwärme und Warmwasseraufbereitung genutzt werden.

Um die Wärmeenergie speichern zu können, kommt bei SCB als Träger feinkörniges Gesteinsmaterial zum Einsatz.

Ein wesentlicher Unterschied von SCB gegenüber anderen Carnot-Batterien ist die saisonale Energiespeicherung. Die sehr langen Speicherzyklen von saisonalen Speichern stellen eine wirtschaftliche wie auch technische Herausforderung dar. Zum einen muss eine sehr grosse Speicherkapazität vorhanden sein, aber zugleich sollte der Speicher sehr kostengünstig sein, weil der Energiedurchsatz gering ist.

Um die Kosten in akzeptablem Rahmen zu halten, wird bei SCB auf folgende Punkte fokussiert:

- Einsatz von sehr kostengünstigem Speichermaterial
- Möglichst lange Betriebsdauer
- Einfache Konstruktion
- Nutzung von Synergien (Wärmeenergie und elektrische Energie)
- Skaleneffekt (minimale Grösse)

Die technischen Herausforderungen bestehen im Wesentlichen darin:

- Die Selbstentladung (Wärmeverluste) gering zu halten.
Dies wird erreicht durch:
 - minimale Speichergrosse
 - gute Isolation
 - Schalentechnik
- Einen hohen Wirkungsgrad Strom-Strom, sowie einen hohen Gesamtwirkungsgrad zu erzielen.
Ein hoher Gesamtwirkungsgrad bedingt, dass die Abwärme der WKK in hohem Mass genutzt werden kann. Das wiederum bedeutet, dass die minimale Grösse der Anlagen noch klein genug ist, dass diese möglichst nahe an die Wärmenutzer gebaut werden können.
Der Strom-Strom Wirkungsgrad wird zum einen durch das hohe Temperaturniveau auf ein akzeptables Niveau gebracht. Zum andern aber auch durch die Art der WKK.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu gängigen Systemen ist die Art der WKK. Dieser Weg führt bei SCB über einen geschlossenen, reversiblen thermodynamischen Kreisprozess, der aus einer Kombination von isentroper und quasi isothermer Luftverdichtung beziehungsweise Entspannung besteht (anstelle von Luft kann auch ein anderes Gas benutzt werden).

Beim Laden des Speichers (v.a. im Sommer) wird mit überschüssigem Strom Luft isentrop verdichtet bis die Maximaltemperatur erreicht ist. Darauf wird die Luft abgekühlt (isobar oder isochor) indem die Wärmeenergie dem Speichermedium übertragen wird. Direkt anschliessend wird die ausgekühlte, komprimierte Luft auf einem Temperaturniveau zwischen rund 0°...100°C (je nach Gegebenheiten auch >100°C) isotherm entspannt, und dabei wieder Strom generiert. Bei diesem Entspannungsprozess muss Wärme zugeführt werden. Ideal ist es, wenn dieser Effekt zur Kühlung genutzt werden kann (Raumklimatisierung, industrielle Prozesskühlung, ...). Wenn dies nicht möglich ist, kann beispielsweise Wasser oder Luft aus der Umgebung als Wärmequelle dienen. Der Kreislauf ist damit geschlossen und kann wieder von vorne beginnen.

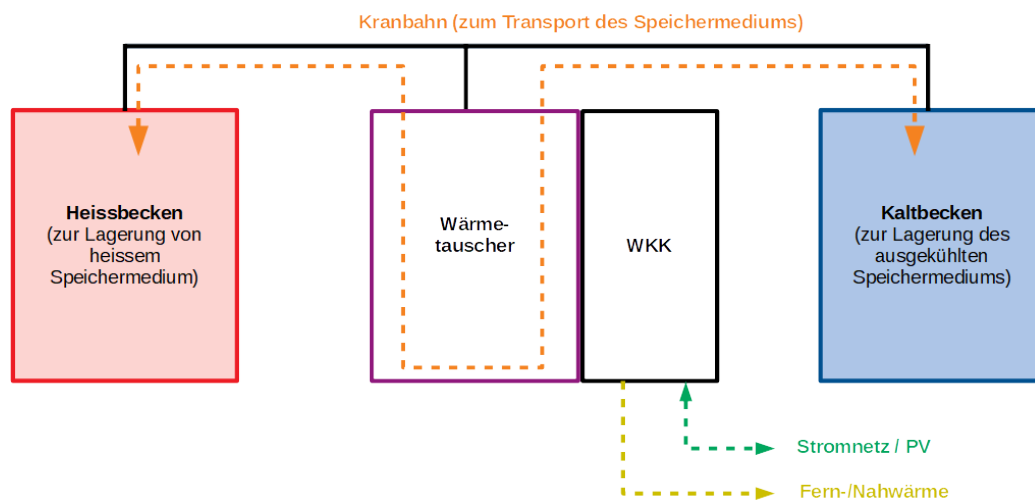
Beim Entladen des Speichers wird der Kreislauf in umgekehrter Richtung durchschritten. Zuerst wird die Luft quasi isotherm komprimiert. Auf einem Temperaturniveau von ungefähr 80°C. Die dabei abfallende Wärme wird genutzt und einem Heizkreislauf (Raumwärme und Warmwasser) übertragen. Anschliessend wird die Luft durch das Speichermedium auf die maximale Temperatur aufgewärmt (isobar oder isochor). Darauf isentrop entspannt und dabei Strom generiert.

In den Sommermonaten wird vorwiegend geladen. In den Wintermonaten vorwiegend entladen. Das heisse Speichermedium wird bis zum Entladen in einem gut isolierten Heissbecken gelagert. Das bis auf ungefähr die Umgebungstemperatur ausgekühlte Speichermedium wird analog im nicht isolierten Kaltbecken bis zum erneuten Laden deponiert.

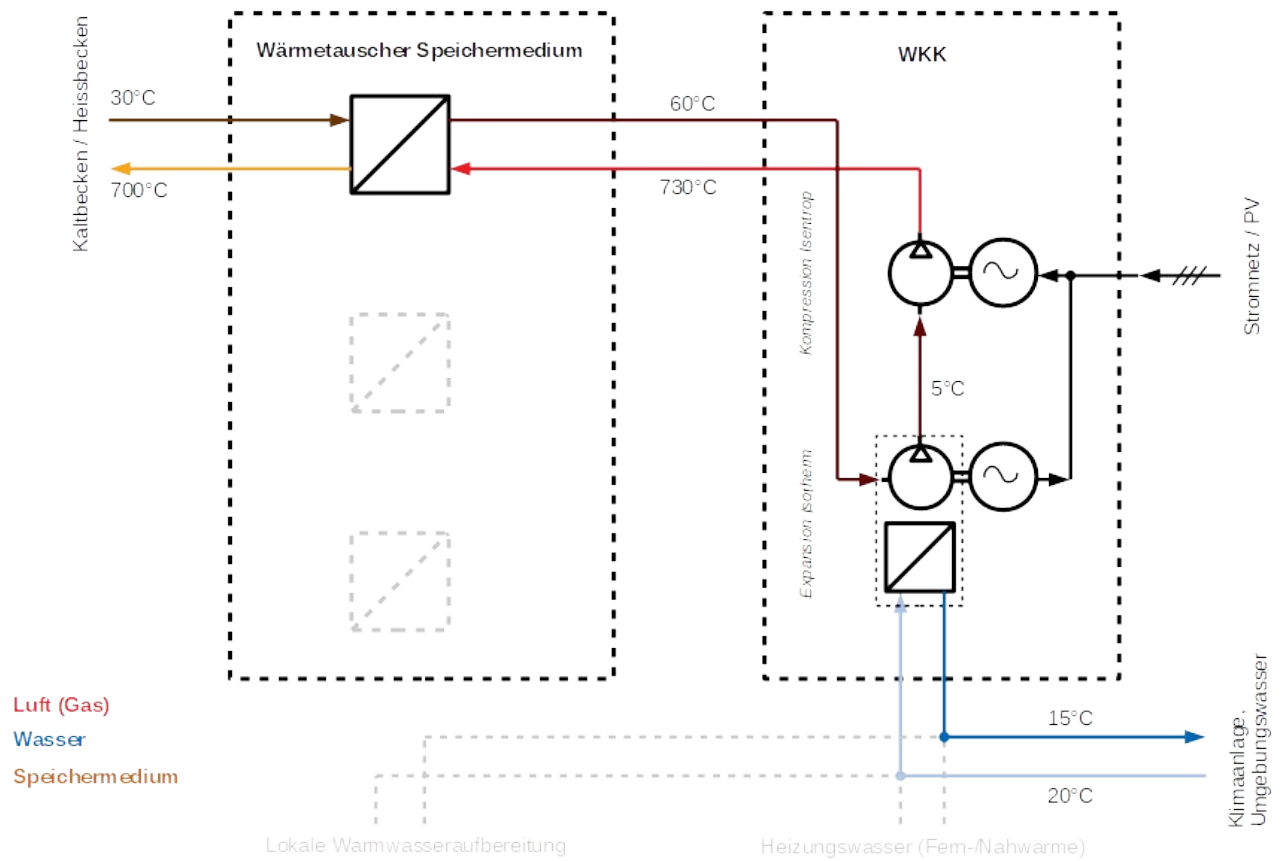
Stück für Stück wird das Speichermedium mittels eines Krans von den Speicherbecken zum Wärmetauscher transportiert, wo das Gestein entweder gekühlt oder aufgewärmt wird.

In den folgenden Prinzipschaltbildern wird die Funktionsweise visualisiert:

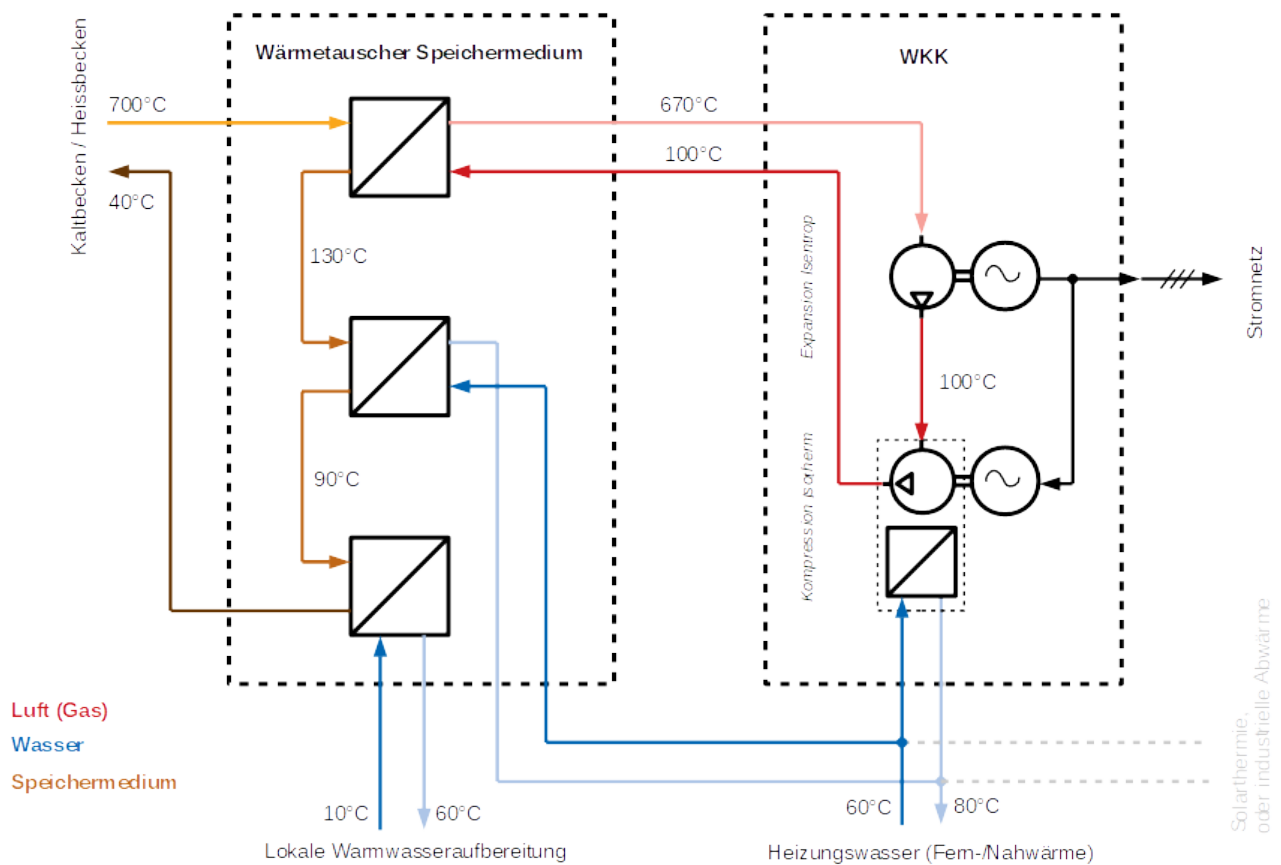
Prinzipschaltbild Gesamtsystem:



Prinzipschema Laden:



Prinzipschema Entladen:



Ein wichtiges Element zur Steigerung der Effizienz ist, dass beim Laden des Speichers Wärmeenergie auf tiefem Niveau entzogen und in den Kreislauf eingekoppelt wird. Die gespeicherte Wärmeenergie setzt sich so dann zusammen aus elektrischer Energie vom Stromüberschuss, und Wärmeenergie aus der Umwelt oder anderen Wärmequellen. Je höher die Temperatur der Wärmequelle ist, desto geringer ist der Anteil von Strom in der gespeicherten Energie.

Die Tatsache, dass durch Wärmeentzug quasi nebenbei auch ein grosser «Kältegenerator» zur Verfügung steht - und dies vor allem in den heissen Sommermonaten – ist ein zusätzlicher interessanter Aspekt. Zum einen kann so der Klimakompressor eingespart werden. Zum andern wird der Strombedarf im Sommer gesenkt.

In den folgenden Unterkapitel wird auf einzelne Themen detaillierter eingegangen.

2.1. Stromgewinnung

Bei der Entwicklung von SCB wird bei der Stromgewinnung vorwiegend auf Photovoltaikanlagen fokussiert.

Hier sollen ein paar Gedanken erwähnt werden, weshalb gerade PV im Vordergrund steht:

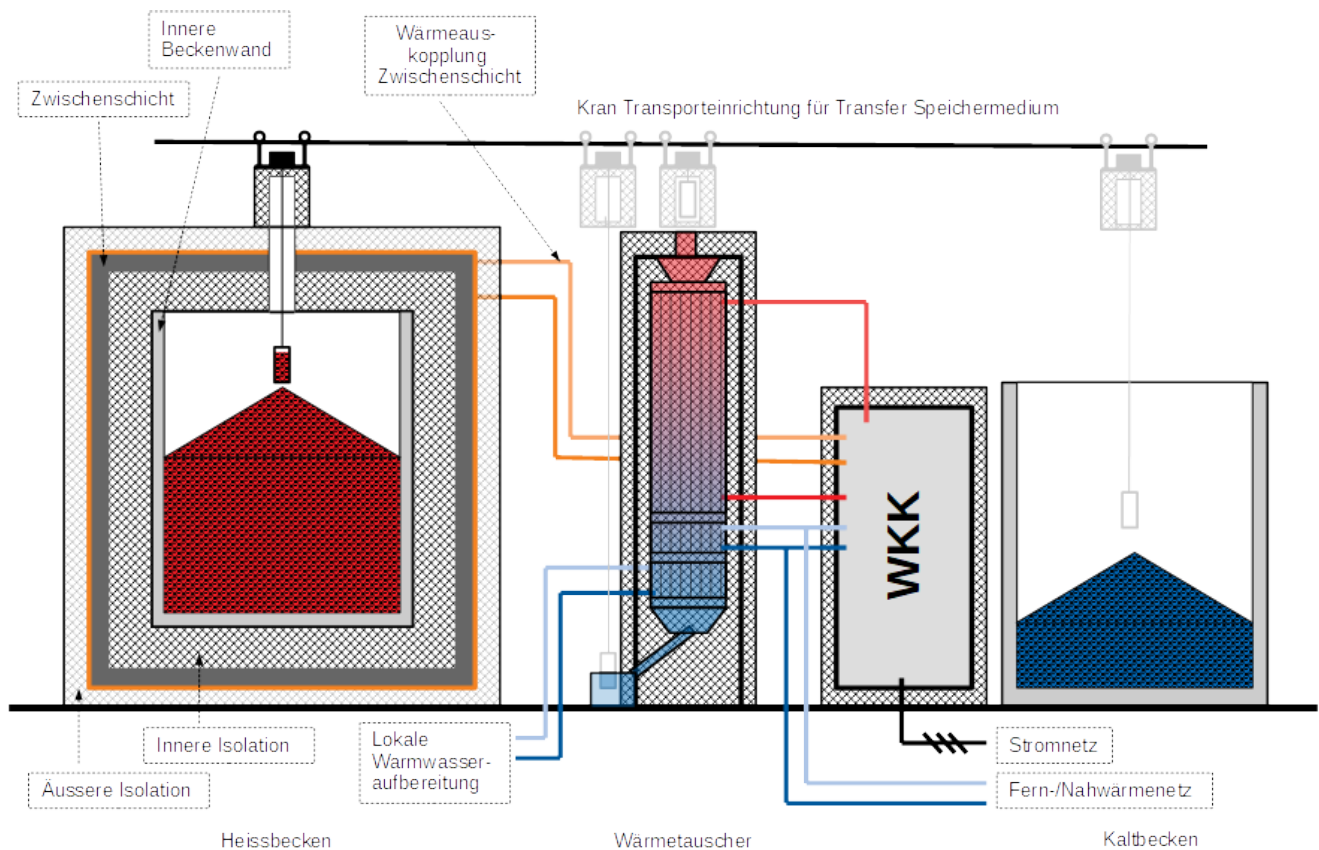
- Sehr grosses Potential verfügbar. Dezentral und praktisch überall auf der Welt (wobei sonnenreiche Gegenden natürlich bevorzugt sind).
- Einfache und direkte Art der Stromgewinnung. Mit PV kann (im Gegensatz zu CSP) auch diffuses Licht genutzt werden.
- Kostengünstig
- Hohe Akzeptanz in der Bevölkerung
- Solarenergie ist, im Gegensatz zu beispielsweise Wind, täglich verfügbar (natürlich mit grossen Schwankungen in der Ertragsmenge). Somit kann ein nicht unwesentlicher Anteil des täglichen Strombedarfs direkt, gemeint ist ohne Zwischenspeicherung, gedeckt werden, was am effizientesten ist.
- Die PV-Panels können nebst der Stromgewinnung weitere Funktionen übernehmen. Zum Beispiel: Überdachung, Sicht- und Windschutz.
- Gute Integrierbarkeit: Solarpanels lassen sich relativ schnell und einfach montieren. Sie können mittlerweile durch verschiedene Farbgebung auch optisch dem Landschaftsbild angepasst werden. Bei senkrechte Montage an Fassaden, Feldern, usw. benötigen sie wenig Fläche.

Selbstverständlich sind andere Arten der Stromgewinnung denkbar. Windkraftanlagen zum Beispiel könnten stets zu 100% ausgelastet werden und müssten nicht wegen Stromüberschuss abgeschaltet werden, da sämtlicher Überschuss an Elektrizität in dem grossen Wärmespeicher gespeichert werden kann.

Was auch von Interesse sein könnte ist eine Kombination mit Geothermie oder Solarthermie (besonders für sonnenreiche Regionen. Sowohl Solarthermie mit einem Temperaturniveau um die 100°C (z.B. Vakuumröhrenkollektoren) oder auch CSP mit Temperaturniveau von bis zu 500°C).

2.2. Konstruktion

Die Konstruktion des Speichers ist für eine lange Betriebsdauer auszulegen, aber auch möglichst einfach und kostengünstig zu gestalten. Die folgende Skizze soll eine Idee vermitteln, wie SCB in etwa aussehen könnte:



Die Form des Heissbeckens ist zylinder- oder würfelförmig. Um möglichst eine geringe Oberfläche im Verhältnis zum Volumen zu haben wäre eine Kugel die ideale Form. Ein Zylinder oder Würfel sind von der Konstruktion her jedoch wesentlich einfacher, auch wenn das Verhältnis Oberfläche/Volumen etwas schlechter ist als bei einer Kugel.

Rundum ist das Heissbecken mit zwei dicken Schichten Isolation versehen, sogenannte Isolierschalen. Zwischen den beiden Schalen befindet sich eine solide Wand aus Beton, welche dem Becken die mechanische Stabilität gibt. Die Temperatur in dieser sogenannten Zwischenschicht wird auf einem Niveau von ca. 50° ... 150°C gehalten. Um dies zu erreichen, muss in der Zwischenschicht Wärme entzogen werden. Dieses Prinzip, welches hier als «Schalentechnik» bezeichnet wird, dient dazu, die Wärmeverluste und Isolierstärke des Heissbeckens zu optimieren. Die Wärme, welche in der Zwischenschicht entnommen wird (mittels Wasser- oder Ölkreislauf), wird dem Heizkreislauf oder der WKK zugeführt und genutzt. In Kapitel 2.4.2 wird dies genauer erläutert. An der Wand der Zwischenschicht werden die Isolierschalen festgemacht. Die innere Beckenwand muss temperaturbeständig sein, da sie in direktem Kontakt mit dem heissem Speichermaterial steht. Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel Schamottstein, oder etwas kostengünstigere Backsteine. Punktuell wird diese Beckenwand auf die Wand der Zwischenschicht abgestützt, um die mechanische Stabilität zu erreichen.

Das Isoliermaterial muss hitzebeständig sein. Anbieten tut sich dazu Steinwolle, welche bis 1000°C temperaturbeständig ist und zudem auch kostengünstig. Andere Isoliermaterialien (evt. auch eine Luftisolation) sind denkbar, wurden aber nicht näher in Betracht gezogen.

Das Fundament muss zum einen tragfähig sein, zum andern aber auch gut isolieren. Ein gleich guter Isolierwert wie bei den Seiten- und Deckflächen wird nicht angestrebt, weil dazu der Aufwand zu gross wäre. Der etwas schlechtere Isolierwert des Fundaments wird jedoch durch eine verbesserte Isolation der anderen Flächen kompensiert. Eine Möglichkeit zur Gestaltung des Fundaments wäre z.B. Ziegelstein, dessen senkrechte Hohlräume mit Isolation ausgefüllt werden.

Anders als das Heissbecken muss das Kaltbecken nicht isoliert werden. Es genügt hier ein ganz einfaches Becken aus Beton, worin das Speichermedium nach dem Auskühlen bis zum erneuten Aufwärmen deponiert werden kann.

Zwischen den beiden Becken befinden sich Wärmetauscher und WKK-Anlage.

Beim Laden des Speichers muss das Speichermedium vom Kaltbecken zum Wärmetauscher gebracht werden, was mit Hilfe einer Kran-Transporteinrichtung geschieht. Nach erfolgter Erwärmung wird es von dort weiter in das Heissbecken transportiert. Der Entladevorgang erfolgt in umgekehrter Reihenfolge. Der Transport des Speichermediums zwischen Wärmetauscher, Heiss- und Kaltbecken geschieht vollautomatisch. Das Heissbecken ist oben mit einer (oder mehreren) verschliessbaren Öffnung versehen, welche nur kurz geöffnet wird, wenn dem Becken Speichermedium entnommen oder zugeführt wird. Zum Einbringen des Mediums in die Becken und den Wärmetauscher kann jenes einfach eingeschüttet werden. Das Entnehmen erfolgt mit einer vollautomatischen Kranschaufel.

Als Wärmetauscher ist ein Gegenstrom-Plattenwärmetauscher vorgesehen, an welchem das Speichermedium durch die Gravitationskraft von oben nach unten langsam durchfliesst und dabei Wärmeenergie aufnimmt (Ladevorgang) bzw. abgibt (Entladevorgang). Für das Laden und Entladen kann derselbe Wärmetauscher verwendet werden. Andere Arten der Wärmeübertragung, wie z.B. Wirbelschichtwärmetauscher, sind auch denkbar. Gegenstrom Wärmetauscher deshalb, damit die Temperaturdifferenzen bei der Wärmeübertragung möglichst gering gehalten werden können.

Der Wärmetauscher ist, wie aus dem Prinzipschaltbild ersichtlich, in drei Hauptbereiche unterteilt: der grösste Bereich dient dem Wärmeaustausch mit der WKK-Anlage. In den zwei anderen Bereichen wird beim Entladen die Restwärmeenergie des Speichermediums an den Heizkreislauf für Fern-/Nahwärme übertragen und zur Warmwasseraufbereitung für Gebäude in nächster Nähe des Speichers genutzt. Somit kann die Resttemperatur des Speichermediums auf ein relativ tiefes Niveau von rund 40°C gebracht werden.

Der Wärmetauscher ist so gestaltet, dass Wärmeenergie von Verbrennungsanlagen, Abwärme aus industriellen Prozessen, Wärmeenergie aus der Zwischenschicht des Heissbeckens, Verlustwärme der WKK, usw. eingekoppelt werden können. Es aber auch möglich ist, Wärme für industrielle Prozesse auszukoppeln. Im Bezug auf das Temperaturniveau deckt die gesamte Anlage ein sehr breites Spektrum von rund 20° bis 700°C ab.

Die WKK besteht im Wesentlichen aus einem Kompressor, welcher, je nach Modus, die Luft isentropisch verdichtet oder entspannt. Und aus einem zweiten Kompressor, welcher die Luft zeitgleich näherungsweise isotherm entspannt bzw. verdichtet (mehrstufiger Prozess mit Zwischenerwärmung bzw. Zwischenkühlung). Die Luft zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf zwischen den beiden Kompressoren. Der geschlossene Kreislauf hat den Vorteil, dass die Luft nicht gefiltert oder entwässert werden muss, was den Aufbau und die Wartung vereinfacht. Als Kompressortypen kommen am ehesten Kolbenkompressoren oder Scrollkompressoren in Frage. Eventuell wären auch Fluidkolbenkompressoren oder Turbokompressoren eine Option. Oder eine Kombination von verschiedenen Typen.

Vom Aufbauprinzip her kann die WKK auch als Wärmepumpe dienen. Was z.B. für die Gewinnung von industrieller Prozesswärme mit Temperaturen von >80°C von Interesse sein kann.

Bezüglich der Sicherheit stellt die Anlage, trotz des hohen Temperaturniveaus, für Mensch und Umwelt keine Gefährdung dar. Die eingesetzten Materialien sind grösstenteils nicht brennbar. Sollte trotz guter Vorsorge in einer grösseren Katastrophe die Speicherbecken zerbrechen oder Wasser eindringen, geht die Anlage zwar defekt, aber es besteht keine Gefahr, dass schädliche oder giftige Materialien in die Umwelt gelangen könnten.

Der Speicher kann auf den Erdboden gestellt werden, oder aber auch teilweise bis ganz in der Erde vergraben sein.

2.3. Speichermedium

Anstelle von Flüssigsalz, wie es bei Hochtemperatur-Wärmespeichern oft verwendet wird, kommt als Speichermedium ein Feststoff, das heisst Sand/gebrochenes Gestein zum Einsatz.

Gestein als Speichermaterial hat ein paar wichtige und vorteilhafte Eigenschaften:

- erfüllt die Anforderungen an das hohe Temperaturniveau
- ist sehr preiswert und in überaus grosser Menge verfügbar (grossteils auch lokal). Dies ein wichtiger Grund, um die Kosten möglichst gering halten zu können.
- Kann - ohne Kapazitätsverlust – praktisch beliebig lange genutzt und beliebig oft geladen und entladen werden
- ist umweltfreundlich, muss nicht recycelt werden.

Nicht jede, aber eine Vielzahl von Gesteinsarten sind dazu geeignet. In grossen Mengen vorkommende Gesteinsarten mit vorteilhaften Eigenschaften sind beispielsweise Basalt, Granit, Gneis. Verschiedene Gesteinsarten können auch gemischt werden. Die nötige Menge des Speichermediums ergibt sich im Wesentlichen durch die zu speichernde Energiemenge, die spezifische Wärmekapazität des Gesteins und die Temperaturdifferenz zwischen heissem und ausgekühltem Speichermedium.

Um eine möglichst gute Wärmeübertragung zu erreichen, und auch aus Gründen der Handhabbarkeit (Transport, Durchfluss durch Wärmetauscher), muss das Gestein auf eine kleine Körnung gebrochen werden.

Verschiedene Kennwerte ausgewählter Gesteinsarten:

Gesteinsart	spez. Gewicht [kg/m ³]	max. Temperatur [°C] *	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]	spez. volumetrische Speicherkapazität [kWh/m ³ K] **
Gneis	2500	1000	1000	0.49
Granit	2750	650 ... 950	850	0.46
Basalt	2700	1000	1000	0.53
Sandstein	2400	ca. 850	700	0.33
Ziegelstein	1700	> 1000	850	0.28
Klinker	2000	> 1000	900	0.35
Grauwacke	2600	ca. 850	950	0.48

* Die max. Temperatur ist bedingt durch die Schmelzwärme des Gesteins.

** Die spezifische volumetrische Speicherkapazität ergibt sich aus dem spezifischen Gewicht und der spezifischen Wärmekapazität. Weil das Schüttgut weniger kompakt ist als festes Gestein, wird eine Reduktion von 30% einkalkuliert.

2.4. Dimensionierung

Die Grösse der Anlage kann den Gegebenheiten flexibel angepasst werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wird es wahrscheinlich sinnvoll sein gewisse Komponenten, wie z.B. WKK und Wärmetauscher, auf gewisse Grössen zu standardisieren und je nach Bedarf parallel zu schalten.

Ein grosser Vorteil ist, dass die Speicherkapazität (bestimmt durch das Volumen und die Charakteristiken des Speichermediums) und das Leistungsvermögen (bestimmt durch den Wärmetauscher und die WKK) unabhängig voneinander ausgelegt werden können.

Eine Hauptaufgabe von SCB besteht darin, den Energieausgleich zwischen Sommer und Winter zu schaffen. Bei erneuerbaren Energiequellen und im Bedarf von Strom und Wärme gibt es aber auch Schwankungen der Energiemengen über die Jahre hinweg. Um diese Schwankungen zu einem gewissen Mass ausgleichen zu können, soll die Speicherkapazität überdimensioniert werden. Konstruktionsbedingt und aufgrund der Wahl des Speichermediums ist diese Überdimensionierung ohne viel Mehraufwand und Mehrkosten realisierbar.

Die technischen Herausforderungen bestehen im Wesentlichen darin:

- Die Selbstentladung (Wärmeverluste) gering zu halten.
- Einen hohen Wirkungsgrad Strom-Strom, sowie einen hohen Gesamtwirkungsgrad zu erzielen. Ein hoher Gesamtwirkungsgrad bedingt, dass die Abwärme der WKK in hohem Mass genutzt werden kann. Das wiederum bedeutet, dass die minimale Grösse der Anlagen klein genug ist, dass diese möglichst nahe an die Wärmenutzer gebaut werden können. Der Strom-Strom Wirkungsgrad wird zum einen durch das hohe Temperaturniveau auf ein akzeptables Niveau gebracht. Zum andern aber auch durch die Art der WKK.

Hohe Maximaltemperaturen haben nicht nur den Vorteil dass der Wirkungsgrad der WKK bei der Stromrückgewinnung auf ein akzeptables Niveau gebracht werden kann. Je grösser der Temperaturhub ist, desto grösser ist auch die volumetrische Speicherkapazität. Was bedeutet, dass die Menge des Speichermediums reduziert und der Speicher kleiner gestaltet werden kann. Bei höherer Temperatur muss jedoch mehr isoliert werden. Und all zu hoch sollte die Maximaltemperatur nicht gewählt werden, damit der Gasdruck in den Leitungen der WKK und des Wärmetauschers nicht zu hoch wird, und damit auch nicht teure, temperaturbeständige Materialien eingesetzt werden müssen (dies gilt besonders für die WKK und den Wärmetauscher). Die Schmelztemperatur des Speichermediums und die Temperaturbeständigkeit der Isolation sind ebenfalls limitierende Faktoren der Maximaltemperatur. Jedoch werden diese in der Regel nicht entscheidend sein.

2.4.1. Temperaturniveaus

Maximaltemperatur:

Die Maximaltemperatur des Speichermediums wird mit 700°C angenommen. Die maximalen Temperaturen in WKK und Wärmetauscher sind wegen dem nötigen Temperaturunterschied zur Wärmeübertragung etwas höher. Rund 730°C.

Das Druckniveau in WKK und Wärmetauscher kann bei diesen Temperaturen bis ca. 100bar ansteigen.

Temperaturhub:

Die minimale Temperatur des Speichermediums wird mit ca. 40°C angenommen. Das Speichermedium ist so dann beinahe auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Was den Vorteil hat, dass das Kaltbecken nicht isoliert werden muss. Wenn die Temperaturdifferenz von 90°C bis 40°C wird zur Warmwasseraufbereitung genutzt.

Der Temperaturhub ($T_{\max} - T_{\min}$) des Speichermediums beträgt somit rund 660K.

Die Temperaturniveaus an verschiedenen Punkten im System während dem Laden und Entladen des Speichers sind in den Prinzipschaltbildern dargestellt.

Bei den Wärmetauschern wird in der Regel mit einer Temperaturdifferenz von rund 30K gerechnet.

Bei der isothermen Entspannung während des Ladevorgangs wird das Temperaturniveau der Luft im Entspanner tief gehalten (ca. 5...10°), um zur Klimatisierung die «Kälte» nutzen zu können, beziehungsweise Wärmeenergie aus der Umgebung (Wasser, Luft) entnehmen zu können.

Bei der isothermen Kompression während des Entladevorgangs hingegen ist das Temperaturniveau der Luft im Kompressor etwas erhöht, um die bei der Kompression anfallende Wärme für den Heizkreislauf nutzbar zu machen.

2.4.2. Wärmeverluste, Mindestgrösse

Um die Wärmeenergie über eine lange Zeit im Heissbecken ohne all zu grosse Verluste halten zu können bedarf es folgender Massnahmen:

- minimale Speichergrösse
- gute Isolation
- Schalentechnik

Je grösser ein Objekt ist, desto kleiner ist das Verhältnis Oberfläche/Volumen. Da die gespeicherte Energie proportional zum Volumen und die Wärmeverluste proportional zur Oberfläche sind, werden die Wärmeverluste mit zunehmender Grösse des Speichers automatisch kleiner. Um sich diese Tatsache zu Nutzen zu machen, sollte der Speicher eine gewisse Grösse nicht unterschreiten. Der Skaleneffekt spielt hier also eine sehr wichtige Rolle. Aus energetischer Sicht, aber natürlich auch aus wirtschaftlicher Sicht.

Jedoch soll diese Mindestgrösse klein genug sein, damit die Idee der dezentralen Energieversorgung - was auch eine dezentrale Energiespeicherung bedingt - beibehalten werden kann und genügend Flexibilität erhalten bleibt, das System in bestehende Infrastrukturen zu integrieren. Oder anders gesagt: der Speicher muss möglichst nahe dorthin platziert werden, wo die Abwärme genutzt werden kann.

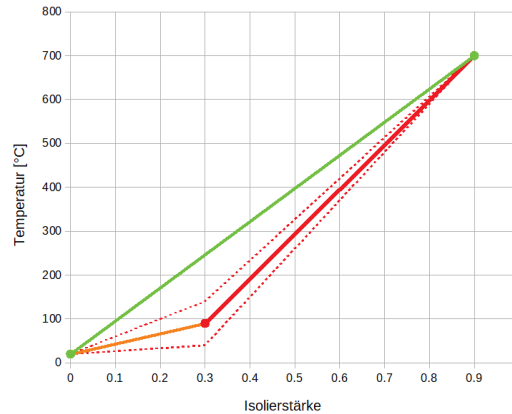
Es versteht sich von selbst, dass eine rundum gute Isolierschicht um das Heissbecken (Wärmetauscher und WKK) die Wärmeverluste reduziert. Als Hitzebeständiges Isoliermaterial bietet sich Steinwolle, evt. auch Glaswolle an. Die Wärmeleitfähigkeit von Steinwolle beträgt: 0.035 [W/m*K].

Für ganz grosse Anlagen reicht eine dicke Isolierschicht unter Umständen aus die Wärmeverluste in akzeptablem Mass zu halten. Für mittelgrosse bis «kleine» Anlagen jedoch reicht dies nicht. Dazu bedarf es einer weiteren Massnahme, welche als «Schalentechnik» bezeichnet wird.

Die Idee der Schalentechnik ist, die Isolierschicht aus zwei Schalen zu gestalten. Zwischen den Schalen bzw. Isolierschichten wird Wärmeenergie «abgefangen» und nutzbar gemacht. Für den Lade- oder Entladeprozess selber, oder aber für Prozesswärme, Warmwasser und Raumwärme.

Es geht hier also nicht darum den Wärmefluss durch die Isolation zu bremsen, sondern um einen möglichst geschickten Umgang mit der Wärmeenergie.

Die folgenden Grafik soll dies etwas veranschaulichen:



Die grüne Kennlinie stellt den Temperaturverlauf in einer ungeteilten Isolierschicht dar. Die rote und orange Kennlinien den mittleren Temperaturverlauf mit Schalentechnik. Die rot-gestrichelten Kennlinien zeigen eine ungefähre Bandbreite des Temperaturverlaufs an. Wichtig: die Steigungen der Kurven entsprechen dem Energiefluss durch die Isolierschicht. Je geringer die Steigung ist, desto geringer ist der Energiefluss!

Im Knickpunkt, der Zwischenschicht, wird Wärmeenergie entzogen und nutzbar gemacht. Das heisst, die Wärmeenergie, welche durch die innere Isolation (Isolierstärke 0.3...0.9) hindurchdringt, geht nicht verloren. Verloren geht lediglich die Wärmeenergie, welche durch die äussere Isolierschicht (Isolierstärke 0 ... 0.3) dringt. Betrachtet man zum Beispiel die orange Kennlinie (äusser Isolation), so ist deren Steigung gegenüber der grünen Kennlinie um etwa Faktor 3.2 kleiner. Was bedeutet, dass auch die Wärmeverluste an die Umgebung um Faktor 3.2 geringer sind. Man nimmt dabei jedoch in Kauf, dass durch die innere Schicht etwas mehr Wärmeenergie durchdringt. Dieser Faktor beträgt jedoch nur ca. 1.35 gegenüber der grünen Kennlinie.

Die Wärmeenergie, welche in der Zwischenschicht abgezweigt wird, wird in den Kreislauf des Speichermediums zurückgeführt. Beim Laden also sozusagen zurück in das Heissbecken geführt. Und beim Entladen direkt dem Heizkreislauf zugeführt.

Mit all diesen Massnahmen ist es möglich, mit vertretbarem Aufwand die effektiven Wärmeverluste über einen langen Zeitraum auf einem geringen Niveau halten zu können. Angestrebt wird, dass die jährlichen Wärmeverluste des Speichers <10% der Energiespeicherkapazität betragen. Für das Winterhalbjahr die Hälfte. Also ca. 5% der im Herbst gespeicherten Wärmeenergie gehen an die Umgebung verloren.

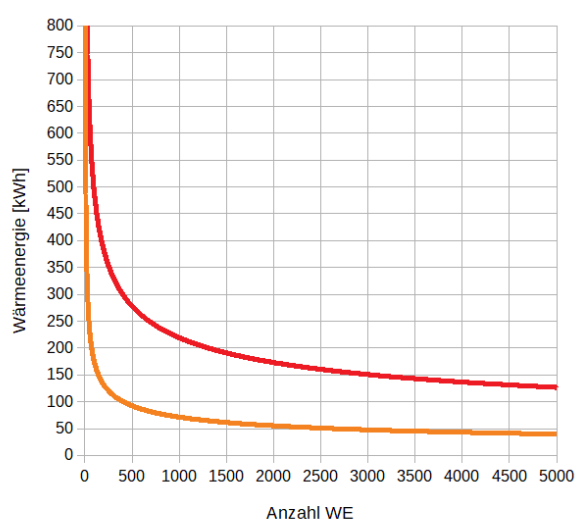
Für kleine Anlagen könnten etwas mehr Verluste des Speichers in Kauf genommen werden, wenn durch ganz kurze Wärmetransportwege Transportverluste und Kosten eingespart werden können. Kosteneinsparungen, die man in die Erhöhung der Stromgewinnung (PV) investieren kann.

Die Wärmeverluste an die Umgebung können deutlich reduziert werden, wenn die durch die äussere Isolierschicht tretende Wärmeenergie aufgefangen und zur lokalen Warmwasseraufbereitung genutzt wird. Frischwasser hat eine Temperatur von rund 15°C und muss für Warmwasser auf eine Temperatur von rund 65°C aufgewärmt werden. Wird das Frischwasser wie eine Art Mantel um das Heissbecken gelegt, so wird die abgestrahlte Wärmeenergie aus der Zwischenschicht des Heissbeckens genutzt um das Wasser aufzuheizen. Wenn dieser Mantel so gestaltet ist dass das Wasser quasi vom äussersten Rand radial nach innen fliesst, bleibt die Hülle gegen aussen im Temperaturbereich von 15...20°C, da ständig frisches Wasser von ca.15°C einfliesst. Bei einer Umgebungstemperatur von 20°C wird vom

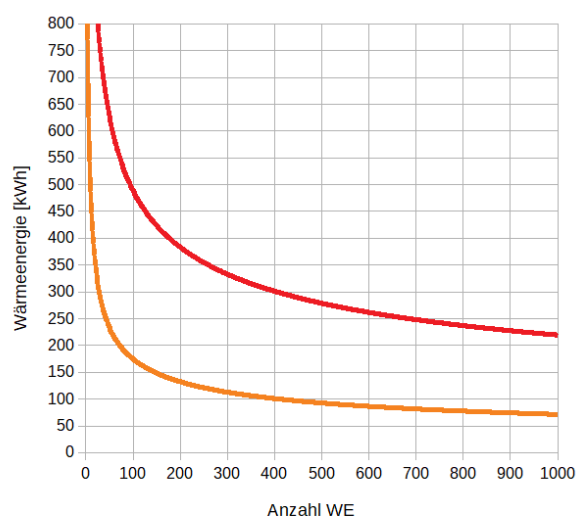
Heissbecken somit also keine Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Und die durch die äussere Isolierschicht tretende Wärmeenergie wird vollständig für die Warmwasseraufbereitung genutzt. Mit «lokaler» Warmwasseraufbereitung sind Gebäude mit einem grösseren Warmwasserbedarf gemeint, welche nebst der Heizleitung eine zusätzliche Leitung zum Speicher für das Warmwasser besitzen und sich in der Nähe des Speichers befinden, damit diese separate Warmwasserleitung möglichst kurz gehalten werden kann.

Die Mindestgrösse des Speichers ist kein fixer Wert. Sie hängt ab von den jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen. Anhand der folgenden Grafik soll jedoch ein Gefühl dafür vermittelt werden, von welchen Grössenordnung die Rede ist.

Dazu wird eine Annahme getroffen, dass für eine Wohnungseinheit (WE) eine Wärmemenge von 11'000kWh gespeichert werden soll (ca. 1'900kWh Strom; 8'500kWh Wärme; 600kWh Wärmeverluste des Speichers). In den folgenden Grafiken wird nun gezeigt, wie gross die Wärmeverluste des Heissbeckens sind in Funktion der Anzahl WE (die Grafiken sind dieselben, jedoch in der horizontalen Achse unterschiedlich skaliert):

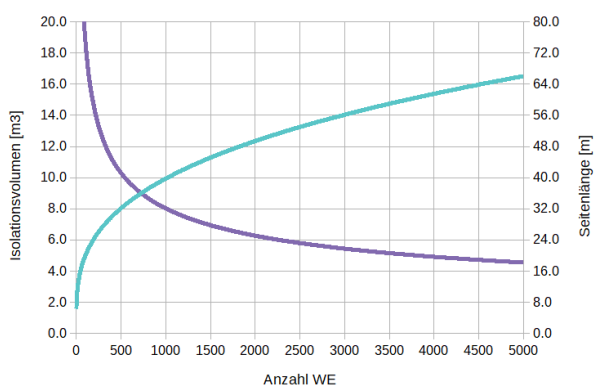


— Wärmeverluste Heissbecken (pro Monat und WE)
— Wärmeentnahme Zwischenschicht (pro Monat und WE)

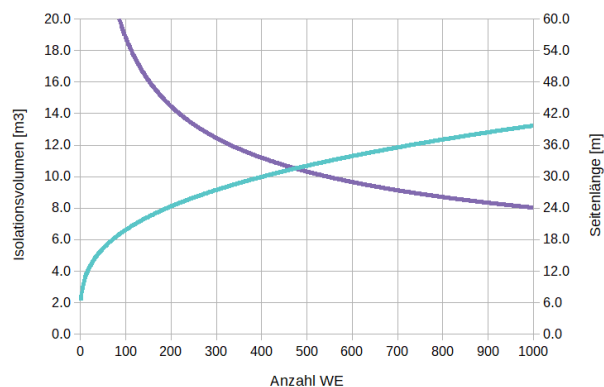


— Wärmeverluste Heissbecken (pro Monat und WE)
— Wärmeentnahme Zwischenschicht (pro Monat und WE)

In den beiden folgenden Grafiken wird gezeigt, wie gross die äusseren Abmessungen des Heissbeckens in etwa sein werden, und wie gross der spezifische Isolationsbedarf (m^2 Isolation pro WE) ist:



— Seitenlänge Heissbecken — Isolationsvolumen pro WE



— Seitenlänge Heissbecken — Isolationsvolumen pro WE

(Zum Vergleich: ein EFH mit 150m^2 Fassadefläche und 20cm Isolierstärke benötigt ca. 30m^3 Isolation)

Eine Zusammenfassung der diesen Berechnungen zu Grunde gelegten Daten:

Form des Speichers:	Würfel
Zu speichernde Wärmeenergiemenge pro WE:	11'000 kWh
Speicherreserve:	20%
Max. Temperatur Speichermedium:	700°C
Min. Temperatur Speichermedium:	40°C
Temperaturhub:	660K
spez. Speicherkapazität Gestein:	0.4 kWh/m ³ *K
Volumetrische Speicherkapazität:	260 kWh/m ³
Wärmeleitfähigkeit Isolation:	0.045 W/m*K (hier wird gegenüber dem Wert von Steinwolle ein grösserer Wert angenommen um zu berücksichtigen, dass das Fundament weniger gut isoliert werden kann).
mittlere Temperatur Zwischenschicht:	90°C
Umgebungstemperatur:	20°C
Isolierstärke:	Innere Isolation: 60cm äussere Isolation: 30cm

Aus den Grafiken sieht man, dass eine kritische Grenze in etwa bei 300WE liegt. Unterhalb steigen die Wärmeverluste sehr stark an. Ebenso das benötigte Isoliervolumen.

Man kann also sagen, dass der Speicher eine **minimale Gesamtwärmespeicherkapazität** von ungefähr **3'300 MWh_{th}** haben sollte. Was in etwa einer **Strom-Speicherkapazität** von **570 MWh_{el}** und **Nutzwärme** von **2'500 MWh_{th}** entspricht.

Die äusseren Abmessungen für die ganze Speichereinheit betragen bei dieser Grösse rund 60x30x30m (etwas mehr als ¼ eines Fussballfeldes).

Die minimale Speichergrösse ist immer noch klein genug, dass selbst kleine Ortschaften in dieses Konzept mit eingeschlossen werden können. Für abgelegenen Einzelbauten ist SCB jedoch nicht geeignet.

Die Leistungsfähigkeit der WKK und in Abhängigkeit davon auch die Wärmetauscher, können unabhängig von der Speicherkapazität dimensioniert werden. Entscheidende Grössen sind vor allem die Grösse der Stromspitzen welche durch den Speicher aufgefangen werden sollen. Und die Leistungsfähigkeit Strom zur Verfügung stellen zu können.

Als Anhaltspunkt wird angenommen, dass zur Deckung des jährlichen Energiebedarfs einer WE eine PV-Anlage mit einer max. Leistung von 12kW notwendig ist. Da beim Laden des Speichers noch zusätzlich Strom generiert wird, beträgt die max. **Leistung für Wärmetauscher und WKK** der isentropen Kompression/Expansion pro WE rund 18kW. Für die isotherme Kompression/Expansion ist eine Leistung von ca. 10kW pro WE notwendig. Unter der Annahme einer **minimalen Speichergrösse** von 300WE ergibt dies folgende Leistungswerte:

- **Isentrope** Kompression/Entpannung: **5.4 MW**
- **Isotherme** Kompression/Entpannung: **3.0 MW**

2.5. Wirkungsgrad

Von grosser Bedeutung ist natürlich auch die Effizienz. Das heisst, wieviel Energie beim Ein-/Auspeichern und während der Speicherdauer verloren geht. Bei SCB lässt sich diesbezüglich keine simple Aussage treffen, da dies von verschiedenen Faktoren abhängt. An dieser Stelle soll versucht werden, dennoch ein grober Überblick zu dem Thema zu verschaffen.

Die jährlichen Wärmeverluste des Heissbeckens werden, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben mit $<10\%$ der gespeicherten Wärmeenergie kalkuliert. Für das Winterhalbjahr bedeutet dies, dass wenn der Speicher im Herbst voll geladen ist, rund 5% dieser Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben wird und somit verloren geht. Es sei denn, dass wie in jenem Kapitel beschrieben, diese Wärmeenergie für die lokale Warmwasseraufbereitung genutzt werden kann und die jährlichen Speicherwärmeverluste so fast gänzlich eliminiert werden können.

Wichtige Grössen für die Effizienz sind die Wirkungsgrade der Hauptkomponenten in der WKK. Für Kompressoren und Generatoren mit Leistungen im MW-Bereich kann mit sehr guten Wirkungsgraden gerechnet werden. Für die gesamte Umwandlungskette der isothermen bzw. isentropen Zustandsänderung wird mit einem Wirkungsgrad von je 90% gerechnet. Das heisst z.B., dass bei der isothermen Expansion, 90% der eingebrachten Wärmeenergie in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Oder dass bei der isentropen Kompression die Kompressionsarbeit 90% der eingebrachten elektrischen Energie beträgt. Diese Verluste sind vorwiegend Wärmeverluste in den Maschinen, welche durch Reibung, Ventile, elektrischen Widerstand, usw. verursacht werden. Wärmeenergie, die systembedingt in den Kreislauf zurückgeführt und somit nutzbar gemacht werden kann.

Ein Grundgedanke in der Idee von SCB besteht darin, Strom UND Wärmeenergie zu koppeln. Dabei soll beim Laden des Speichers, das heisst vor allem im Sommer, zusätzlich zum Strom Wärmeenergie genutzt werden, die in grossem Mass verfügbar ist und relativ einfach gewonnen werden kann. Dies kann zum einen Wärmeenergie aus der Umgebung, Wasser oder Luft, sein. Bei einem Temperaturniveau von ca. $20\ldots 30^\circ\text{C}$. Oder aber auch industrielle Abwärme, welche nicht genutzt werden kann. Im Fokus steht hier vor allem Kondensationswärme von Dampfprozessen, bei einem Temperaturniveau von ca. 80°C . Anbieten tut sich z.B. die Kombination mit Dampfkraftwerken, Gaskraftwerken, Verbrennungsanlagen, Solarthermie oder Geothermie. Je höher das Temperaturniveau bei der Wärmezufuhr im Ladevorgang (isothermen Expansion), umso vorteilhafter wird es für die Effizienz. Eine interessante Option ist unter anderem, dieses Entziehen von Wärme gleichzeitig als Kühleffekt, sprich der Gewinnung von Kälte zu nutzen. Im Sommer könnte so elektrische Energie zur Kühlung, z.B. Klimatisierung, eingespart werden. Und nebst der elektrischen Energie könnten so auch die sonst notwendigen Kühlkompressoren eingespart werden.

Diese «Umgebungs-Wärmeenergie» wird bei der isothermen Expansion des Ladevorgangs in Strom umgewandelt – welcher sogleich wieder dem Ladeprozess – sprich der isentropen Kompression – zugeführt wird.

Die elektrische Energie, welche für die isentrope Kompression notwendig ist, wird in Wärme umgewandelt (\Rightarrow Erwärmung der Luft). Bei der isochoren (oder isobaren) Zustandsänderung wird die komprimierte Luft abgekühlt und die Wärme dem Speichermedium übergeben.

Die gespeicherte Wärmeenergie setzt sich also zusammen aus überschüssiger elektrischer Energie welche gespeichert werden soll, so wie Wärmeenergie, welche ungenutzt oder in überreichem Mass quasi «gratis» zur Verfügung steht. Wie gross der Anteil an Strom und Umgebungswärme ist, der schliesslich im Speichermedium gespeichert wird, hängt im Wesentlichen von dem Temperaturniveau ab, mit welchem die zusätzliche Wärmeenergie eingespeist werden kann. Je höher dieses Temperaturniveau ist, desto grösser ist der Anteil an Wärmeenergie von der gespeicherten Energie. (Genauere Angaben dazu sind in einer Tabelle weiter unten zu finden).

Wird im Winter die Wärmeenergie aus dem Speicher entnommen um Strom und Wärme zu gewinnen, so ist der Wirkungsgrad der WKK zur Stromgewinnung relativ bescheiden. Da jedoch im Sommer während des Ladevorgangs nebst der elektrischen Energie auch Wärmeenergie zugeführt worden ist, kann so der Strom-Strom Wirkungsgrad erhöht werden.

Wichtig bei der Betrachtung ist nicht nur der Strom-Strom Wirkungsgrad. Denn im Speicher wird auch sehr viel Wärmeenergie vom Sommer in den Winter gespeichert. Wärmeenergie, die in Nah- und Fernheizungsnetzwerken genutzt werden kann. Was zum einen möglich ist durch das hohe Temperaturniveau (Abwärme der WKK von ca. 80°C). Aber auch dadurch gegeben ist, dass der Speicher möglichst nahe am Wärmeverbraucher platziert werden kann. So steht im Winter viel Wärmeenergie zur Verfügung, welche nicht durch Wärmepumpen gewonnen werden muss und somit Strom eingespart werden kann, weil anstelle von Strom für die Wärmegewinnung zu speichern, die Wärme direkt gespeichert wird. In den Gesamtbetrachtungen ist dies ein wichtiges Element, welches nicht zu vernachlässigen ist. Weil dadurch im Winter sogar noch mehr Strom eingespart werden kann als die WKK an Strom generiert.

Der folgende Zahlenvergleich soll diese Zusammenhänge etwas verdeutlichen:

Die im Sommer aus dem Stromüberschuss eingebrachte elektrische Energie wird als Referenz mit 100% angenommen. Durch das zusätzliche Einbringen von Wärmeenergie aus der Umgebung (bei Temperaturen von 20...30°C) kann die total gespeicherte Energie auf 165% erhöht werden. Es werden also zusätzlich 65% Wärmeenergie aus der Umgebung zugefügt.

Im Winter werden rund 10% von der gespeicherten Energie in der Zwischenschicht für die Raumwärme/Warmwasseraufbereitung abgezweigt. Rund 5% von der gespeicherten Energie gehen an die Umgebung verloren (wenn sie nicht zur lokalen Warmwasseraufbereitung genutzt werden kann). Von den 165% gespeicherten Energie bleiben somit 140% übrig, welche der WKK zugeführt werden kann.

Der Wirkungsgrad der WKK bei der Rückverstromung beträgt ca. 20%. Da jedoch 140% Energie in die WKK eingebracht wurden, beträgt der Strom-Strom Wirkungsgrad 28%.

Die Nutzwärme setzt sich zusammen aus der Wärme die in der Zwischenschicht entnommen worden ist (ca. 16%) und der Restwärme der WKK (ca. 105%). Ergibt total rund 120% Wärmeenergie, welche als Nutzwärme in den Heizkreislauf fließt. Der Heizkreislauf selber ist wiederum mit ca. 10% Verlusten an die Umgebung behaftet. Somit bleiben für die Heizung 108% Wärmeenergie übrig. Müsste diese Wärmeenergie mit einer Wärmepumpe (Leistungszahl = 3) gepumpt werden, wären dazu 36% elektrische Energie notwendig.

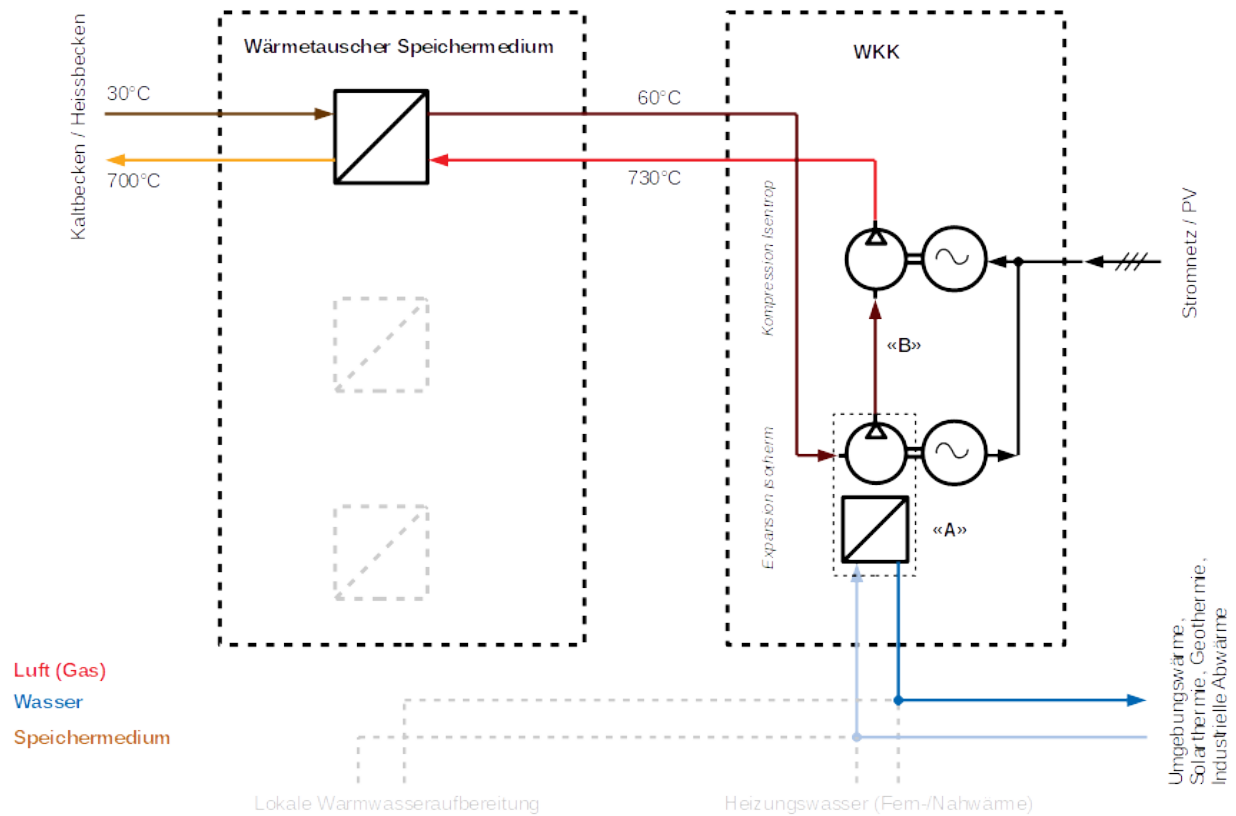
So gesehen, können aus der im Sommer eingebrachten Strommenge (100%), im Winter 64% (Summe der zurück gewonnenen und der eingesparten elektrischen Energie) zurück gewonnen werden.

Angenommen die im Sommer zugeführte Wärme kann als Kälte genutzt werden, lässt sich zusätzlich Strom sparen: bei einer Leistungszahl der Kühlanlage = 5 und einer Energiemenge von 65% können so 13% an elektrischer Energie eingespart werden.

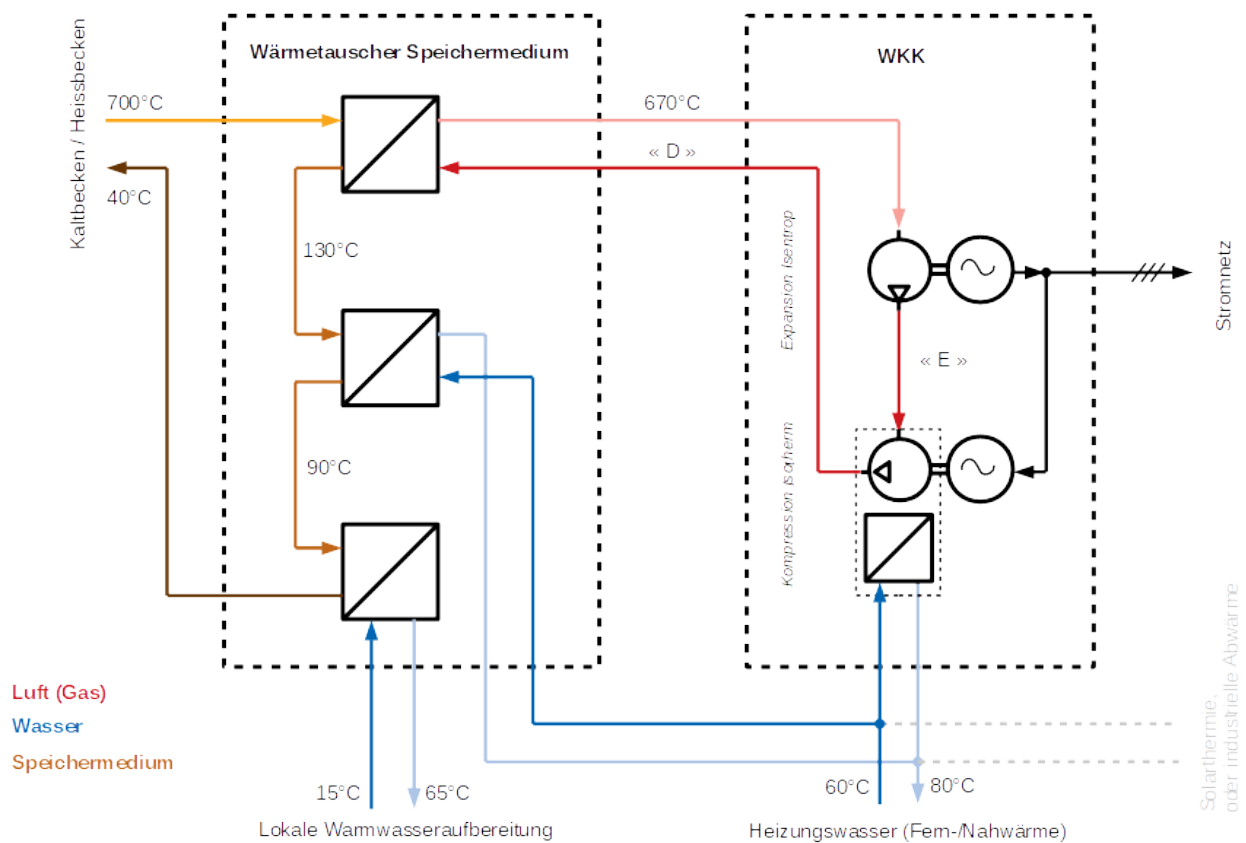
Wie bereits erwähnt, spielt das Temperaturniveau bei der isothermen Expansion während des Ladevorgangs, aber auch das Temperaturniveau bei der isothermen Kompression beim Entladevorgang eine ganz wesentliche Rolle auf die Effizienz. Eine etwas untergeordnete, aber nicht ganz unwesentliche Rolle spielt auch die Ursprungstemperatur bei der Isentropen Kompression des Ladevorgangs. In der folgenden Tabelle sind diesbezüglich einige relevante Werte zusammen gefasst:

Dazu nochmals das Prinzipschaltbild beim

LADEVORGANG:



ENTLADEVORGANG:



Fall	LADEVORGANG			ENTLADEVORGANG				Bemerkung
	Temperatur A (Isotherme Expan.)	Temperatur B (Isentrope Kompr.)	Wärme- energie im Speicher ⁽⁴⁾	Wärme- energie- eintrag in WKK ⁽³⁾	Temperatur D (Isotherme Kompr.)	Temperatur E (Isentrope Expan.)	Wirkungs- grad Strom- generation	
a1	0 °C	0 °C	165 %	140 %				Nutzung von Umgebungswärme (20...30°C)
a2	60 °C	60 °C	180 %	153 %				Nutzung von Wärme aus Prozessdampf(v.a. Kondensations- wärme; ca. 80°C)
a3 ⁽²⁾	120 °C	60 °C	210 %	178 %				Industrielle Abwärme / Solarthermie / Geothermie
a4 ⁽²⁾	160 °C	60 °C	240 %	204 %				Industrielle Abwärme / Solarthermie / Geothermie
a5 ⁽²⁾	200 °C	60 °C	270 %	230 %				Industrielle Abwärme / Solarthermie / Geothermie
b1					30 °C	30 °C	30 % ⁽⁴⁾	Fall, wenn Ab- wärme der WKK nicht, oder noch nicht genutzt werden kann.
b2					100 °C	100 °C	20 % ⁽¹⁾	

⁽¹⁾ Bei diesem Wert ist mitberücksichtigt, dass nur bis ca. 130°C die Wärmeenergie vom Speicher für die Rückverstromung genutzt werden kann. Also etwa nur 85% von der gesamthaft aus dem Speicher gebrachten Energie.

⁽²⁾ Interessant ist die Nutzung industrieller Abwärme, Wärmeenergie aus Solarthermie oder Geothermie im Bereich von 100...200°C (oder höher). Wenn das Temperaturniveau der isothermen Expansion beim Laden sich der Maximaltemperatur annähert, steigt der Anteil der Wärmeenergie, welche für die Erwärmung des Speichermaterials genutzt wird, an. Wird beispielsweise bei einer Temperatur von 160°C isotherm entspannt, so stammen 100% aus dem Stromüberschuss, und 140% der gespeicherten Wärmeenergie aus der zusätzlichen Wärmequelle (dieser Wert kann weiter erhöht werden, wenn die Maximaltemperatur reduziert wird und man dafür in Kauf nimmt, dass mehr Speichermaterial benötigt wird. Wird beispielsweise die Maximaltemperatur im Speicher von 700°C auf 600°C reduziert, so würde der Anteil Wärmeenergie von 140% auf 165% ansteigen).

Der Vorteil liegt darin, dass Wärmeenergie auf einem relativ tiefen Temperaturniveau so effizient genutzt werden kann. Zum einen wird Wärmeenergie saisonal gespeichert. Zum andern kann so der Strom-Strom Wirkungsgrad deutlich angehoben werden, weil bei der Speicherung nebst dem Strom eben auch viel Wärmeenergie zugeführt wird.

⁽³⁾ Wärmeenergie im Speicher minus 15% (=> Auskopplung in der Zwischenschicht ca. 10%; Verluste des Heissbeckens ca. 5%)

⁽⁴⁾ Werte für die kurzfristige und mittelfristige Speicherung. Kombiniert man «b1» mit den Fällen «a1» bis «a5», so ergeben sich Strom-Strom Wirkungsgrade von 50 ... 81%.

Aus den in der Tabelle aufgelisteten Fällen ergeben sich verschiedene Kombinationen der «a» und «b» Fälle.

Der Fall «b1» macht nur Sinn bei Kurzzeitspeicherung oder wenn die Abwärme der WKK nicht, oder zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme noch nicht, genutzt werden kann. Dann steht der Fokus auf der Optimierung des Strom-Strom Wirkungsgrads.

Selbst wenn die Abwärme noch nicht genutzt werden kann, so kann in einer ersten Phase SCB in einem Strom-Strom optimierten Modus arbeiten, mit Wirkungsgraden >50%. Für die Integration ist dies ein nicht unwesentlicher Faktor. Fernwärmenetze brauchen zur Erstellung und Ausdehnung einige Jahre. Weil potentielle Wärmeabnehmer von einer bestehenden Heizanlage auf Fernwärme umstellen müssen und dies natürlich nicht sofort geschehen wird. Mit SCB kann Fernwärme angeboten werden. Wenn diese aber dann nicht, oder nicht sofort, genutzt werden kann, so ist dies wohl ein finanzieller und auch aus Sicht der Energieeffizienz ein Nachteil, der durch das, dass der Strom-Strom Wirkungsgrad trotzdem relativ hoch ist (wenn auch nicht vergleichbar mit Batterien), weniger stark gewichtet.

Die wohl am meisten genutzte Kombination wäre wahrscheinlich «a1-b2». Die Kombination, welche im Zahlenvergleich bereits genauer betrachtet worden ist.

Was ebenfalls erwähnenswert ist, ist die Kombination «a4-b2».

Der Strom-Strom Wirkungsgrad beträgt ca. 41%. Zudem stehen ca. 160% Wärmeenergie für die Heizung zur Verfügung. Was einer Stromeinsparung von 53% (Leistungszahl Wärmepumpe = 3) gleich kommt. Es wäre nicht korrekt zu sagen dass der Speicher einen Strom-Wirkungsgrad von 94% hat. Da nebst dem Strom ja eben eine grosse Menge an Wärmeenergie zugeführt wird. Wärmeenergie auf einem Temperaturniveau, welche zum Beispiel mit Solarthermie oder Geothermie erschlossen werden kann, oder als nicht genutzte industrielle Abwärme zur Verfügung steht. Aber man kann festhalten, dass mit einem anderen Speichersystem, welches nur die elektrische Energie speichern würde, der Strom über lange Zeit fast verlustlos gespeichert werden müsste um das selbe Resultat zu erhalten.

(An dieser Stelle sei auch auf die Anmerkung in Kapitel 5 betreffend des Wärmetransports hingewiesen).

Was noch erwähnt werden sollte ist, dass der Energieaufwand für den Transport des Speichermediums < 1% des regenerierten Stroms beträgt und somit auf die Bilanz keinen massgebenden Einfluss hat.

3. Kostenabschätzung

Die folgende Kostenabschätzung soll einen ungefähren Anhaltspunkt vermitteln, in welcher Grössenordnung sich die Kosten befinden, um auch aus wirtschaftlicher Sicht Vergleiche mit anderen System ziehen zu können.

Exemplarisch wird eine **Strom-Wärme-Energieversorgungszelle**, ein **Verbund von 500 WE** betrachtet. Mit Wärmegewinnung aus der Umgebung und Abwärmenutzung der WKK für Fernwärmeheizung (Gemäss Kap. 2.5 wäre dies der Fall «a1-b2»). In der Betrachtung wird auch die Stromgewinnung und die Wärmeverteilung eingeschlossen. Man kann davon ausgehen, dass damit die Hauptkomponenten einer Energieversorgungszelle berücksichtigt sind, mit welcher die Verbraucher über das ganze Jahr mit Strom und Wärme versorgt werden können. Wenn man das Gesamte – nämlich die jährliche Strom und Wärmeversorgung – betrachtet, lässt sich SCB mit anderen Systemen vergleichen, die eine andere Struktur aufweisen.

Dabei werden folgende Daten angenommen:

Jährliche Energiegewinnung, Bedarf und Verluste, bezogen auf eine WE:

Strombedarf:	6'000 kWh (Haushalt inkl. E-Mobilität; 4'000kWh direkt von PV; 2'000kWh aus Speicher)
Wärmebedarf Warmwasser:	2'500 kWh
Wärmebedarf Heizung:	7'500 kWh
Stromgewinnung:	12'000 kWh (4'000kWh werden direkt genutzt; 8'000kWh für die Ladung des Speichers)
Wärmegewinnung:	5'500 kWh (Umgebungswärme)

Gesamtgrösse von:

PV-Anlage: 30'000 m² (Annahme jährlicher Ertrag: 200kWh/m²)

Speicher:

Speicherkapazität total:	5'500 MWh
Volumen Speichermaterial:	25'500 m ³
Volumen Isolation total:	5000 m ³
Grösse total:	ca. 70 x 35 x 35 m

Wärmetauscher:

Speichermedium WKK:	9.0 MW
Umweltwärme WKK:	5.0 MW

WKK:

Leistung (elektrisch und thermisch)	
Isentrope Kompression/Entpannung:	9.0 MW
Isotherme Kompression/Entpannung:	5.0 MW

(Die weiteren technischen Parameter sind gemäss den Angaben aus Kapitel 2.4.2)

Sämtliche Kostenangaben in der folgenden Kosten Zusammenstellung sind in CHF.

Photovoltaikanlage:		
Investitionskosten (inkl. Wechselrichter und Montage: 250.-/m ²)		7'500'000
Unterhalt jährlich		20'000
Lokales Wärme-/Stromnetz:		
Investitionskosten (25'000.-/WE)		12'500'000
Unterhalt jährlich		100'000
Wärmetauscher:		
Investitionskosten		2'500'000
1x Generalrevision		500'000
Unterhalt jährlich		80'000
WKK:		
Investitionskosten		2'500'000
1x Generalrevision		500'000
Unterhalt jährlich		80'000
Speicher:		
Investitionskosten		
Gestein, inkl. Transport und Bearbeitung (60.-/m ³)	1'600'000	
Isolation (100.-/m ³)	500'000	
Material Grundkonstruktion (Becken, Hülle, Dach, Fundament)	1'500'000	
Kransystem	300'000	
Konstruktionsaufwand	1'000'000	
Steuerung/Überwachung/el. Anschluss	600'000	
Projektierung	500'000	
Summe Investition		6'000'000
Unterhaltskosten jährlich		80'000
Generalrevision (1x nach 25 Jahren)		1'000'000
Zusammenfassung jährlicher Kosten:		
Photovoltaik (Betriebsdauer 25 Jahre):	320'000	
Lokales Wärme-/Stromnetz (Betriebsdauer 50 Jahre):	300'000	
WKK (Betriebsdauer 25 Jahre):	200'000	
Wärmetauscher (Betriebsdauer 25 Jahre):	200'000	
Speicher (Betriebsdauer 50 Jahre):	220'000	
Administrativer Aufwand für den Betrieb des Gesamtsystems:	40'000	
Total:	1'280'000	

Somit fallen **pro WE für die gesamte Energieversorgung von Wärme, Strom und Mobilität jährliche Kosten von rund 2'560 CHF** an.

Bei grösseren «Zellen» liegen die Kosten tiefer, weil durch den Skaleneffekt die Kosten reduziert werden können.

Analog steigen die Kosten für «Zellen» mit weniger WE. Ab einer gewissen Grösse steigen die Kosten in stark überproportionalem Mass an.

Kosten könnten zudem eingespart werden:

- Bei einer dichten Besiedelung. Strom- und vor allem Wärmenetz bedürfen nur kurzer Leitungen.
- Wenn die PV-Anlage für weitere Funktionen - zum Beispiel zur Überdachung (Ersatz von Dachziegel) – genutzt wird.
- Durch Modularisierung und Serienfertigung von WKK und Wärmetauscher.
- Leistungsreduktion der WKK und Wärmetauscher:

In den Berechnungen wurde auf die Maximalleistung der PV-Anlage Bezug genommen. Diese wird jedoch nur bei einem sehr sonnigen Tag und selbst dann nur während ein paar wenigen Stunden pro Tag erreicht. Eine Möglichkeit wäre, diese Spitzen durch kleine Batteriespeicher (z.B. von Elektroautos) auszugleichen, sprich über den Tag hinweg zu verteilen. Somit könnte die Maximalleistung der WKK und der Wärmetauscher mindestens um Faktor 2, wahrscheinlich sogar bis Faktor 4 reduziert werden, was unter anderem auch zu einer gleichmässigeren Auslastung der Anlage führen würde.

Kapitalanlagekosten usw. wurden bei dieser sehr vereinfachten Kostenabschätzung nicht mitberücksichtigt.

Zum Vergleich:

Würde die WE heute mit einer Wärmepumpe ausgestattet (Investitionskosten ca. 1'000.- CHF/Jahr) und der Strompreis mit 20 Rp/kWh angenommen, so beliefen sich die jährlichen Kosten ganz grob abgeschätzt auf 2'800 CHF.

4. Vergleich Speichersysteme

Im folgenden Zahlenbeispiel werden auf ganz grobe und einfache Art die wichtigsten saisonalen Energiespeichervarianten bezüglich der energetischen Effizienz miteinander verglichen. Es muss betont werden, dass es hier in erster Linie darum geht, in etwa ein Gefühl für die Grössenordnungen zu kriegen, auch wenn die Werte eben nur ungefähr sind.

Ausgangspunkt ist, dass im Winter 28kWh Strom und 108kWh Wärmeenergie zur Verfügung gestellt werden sollen. (Dies sind rein fiktive Zahlen. Das Verhältnis von Strom- zur Wärmemenge stimmt aber in etwa mit der Realität überein). Anschliessend wird berechnet, wie viel Strom und Wärme bei den entsprechenden Speichertechnologien im Sommer eingesetzt werden muss:

	SCB (Fall «a1-b2»)	Wasser Pumpspeicher (1)	Power-to-Gas (2)
Strom [kWh]	100	98	140
Wärme [kWh]	65	-	-

⁽¹⁾ Wirkungsgrad Strom-Strom: 65%

Die Wärme wird mit einer Wärmepumpe (Leistungszahl = 3) bereitgestellt.

⁽²⁾ Wirkungsgrad Strom-Strom: 35%

Rund 25% der im Sommer eingebrachten elektrischen Energie können durch die Abwärme der Brennstoffzelle im Winter genutzt werden. Dazu kommt die Gewinnung von Wärme mit einer Wärmepumpe (Leistungszahl = 3).

Der Vergleich zeigt, dass SCB auch aus energetischer Sicht durchaus mit den beiden wichtigsten saisonalen Energiespeichertechnologien verglichen werden kann. Gegenüber P2G muss bei SCB rund 40% weniger Strom gewonnen werden um dasselbe Resultat zu erzielen. Man berücksichtige, dass die Wärme, welche bei SCB zugeführt werden muss, relativ einfach gewonnen werden kann.

5. Optionen

Die Idee mag im ersten Moment vielleicht etwas eigenartig klingen, jedoch wäre es auch denkbar, das heisse Speichermedium, und somit die Wärmeenergie, mit Güterwagons der Eisenbahn zu transportieren. Beispielsweise in der Stahlindustrie, Zement oder Ziegelproduktion oder auch Verbrennungsanlagen fallen grosse Mengen an Abwärmeenergie auf hohem Temperaturniveau an. Diese Anlagen befinden sich jedoch nicht immer an einem geeigneten Standort, wo die Wärmeenergie genutzt werden kann. Es wäre denkbar, dass das Speichermedium in diesen Anlagen durch die Abwärme aufgeheizt und dann an geeignete Orte transportiert wird. Das ausgekühlte Medium von dort natürlich wieder zurück. Auch Tiefengeothermie mit Temperaturen im Bereich von 100...200°C könnte eine interessante Wärmequelle sein. Solche Stellen liefern lokal sehr viel Wärmeenergie, die jedoch nicht immer optimal genutzt werden kann, weil nicht genügend Wärmebedarf (Fernwärme) vorhanden ist (nicht nur zeitlich – sprich im Frühling bis in den Herbst – sondern auch örtlich). Wie in Kapitel 2.5 erwähnt, könnte diese Wärmeenergie mit SCB in einem Speichermedium gespeichert werden, das es ermöglicht, die Wärmeenergie über mittlere Distanzen zu transportieren. Wo daraus lokal im Winter dann Strom generiert und die Abwärme als Fernwärme genutzt werden kann. Aufgrund des hohen Gewichts des Speichermediums wäre ein solcher Transport nur mit der Eisenbahn denkbar. Die Wirtschaftlichkeit müsste geprüft werden.

Ein solcher Wärmetransport – wo bestehende Infrastruktur, sprich die Eisenbahn genutzt werden kann - würde auch noch eine andere Möglichkeit öffnen: wie beschrieben, hängen die Wärmeverluste stark mit der Grösse des Speichers zusammen. Je grösser der Speicher ist, desto geringer sind die Verluste. Eine Möglichkeit wäre es, dass mehrere kleinere Speicher auf diese Weise mit einem grossen Speicher verbunden sind. Aus den kleinen «Zwischenspeichern» wird die Wärme dem Speichermedium entnommen, Strom generiert und Fernwärme bereitgestellt. Je nach Gegebenheit, wird dort auch wieder Wärme zugeführt. Mehrmals pro Jahr wird das Speichermaterial dann via Eisenbahn von den kleinen Zwischenspeichern in den gemeinsamen grossen Speicher befördert bzw. wieder zurückgeführt. Inwiefern sich ein solcher Transportaufwand jedoch bezahlt macht müsste genauer analysiert werden.

Wie erwähnt, lässt sich SCB auf verschiedene Arten in industrielle Prozesse einbinden:

- Nutzung von Abwärme industrieller Prozesse auf verschiedenen Temperaturniveaus. Weil das Temperaturniveau eine sehr grosse Bandbreite hat, können damit potenziell viele Prozesse in Betracht gezogen werden.
- Speicherung von Prozesswärme: nicht nur die Nutzung von industrieller Abwärme ist von Interesse, sondern auch die Bereitstellung von Wärmeenergie für Industrielle Prozesse. Heute dienen dazu vor allem fossile Energieträger, die jedoch in Zukunft ersetzt werden sollen. Bis ca. 150° sind Hochtemperatur-Wärmepumpen eine mögliche Alternative. Nachteil davon ist jedoch, dass diese viel Strom benötigen, der für die Wintermonate auch irgendwie gespeichert werden muss. Für höhere Temperaturen gibt es nebst Strom direkt genutzt oder Synthesegas nicht viele Alternativen. SCB könnte hier bis zu einer Temperatur von rund 500°C eine interessante Option sein.

Für Prozesse, die viel Wärmeenergie um die 100°C benötigen, kann die Temperatur am WKK Ausgang leicht angehoben werden. Dabei reduziert sich der Wirkungsgrad der WKK, jedoch kann die Wärmeenergie am Ausgang der WKK dann für den industriellen Prozess genutzt werden. Und es wird trotzdem noch Strom generiert, und nicht wie bei Hochtemperatur-Wärmepumpen eine grosse Menge an Strom verbraucht.

Für Prozesstemperaturen zwischen 100°C ... 500°C muss die Wärmeenergie direkt vom Speicher entnommen werden. Solche Prozesstemperaturen mit Strom bereitstellen zu können ist nicht besonders effizient. Und mit Synthesegas noch weniger, da dieses ja auch vorwiegend

mit Strom hergestellt wird und verlustbehaftet ist. SCB, mit Wärme aus Tiefengeothermie (150° ... 200°C) stellt diesbezüglich eine effizientere Lösung zur Verfügung. Nebst dem Strom wird 1 ...1,5 Mal soviel Wärmeenergie zusätzlich zum Strom beigefügt. So benötigt es für die Bereitstellung der Prozesswärme deutlich weniger Strom. Strom, nebenbei bemerkt, den man in den Zeiten des Stromüberschusses braucht und nicht wenn Stromknappheit herrscht. Die Möglichkeit der Transportfähigkeit, wie im vorgängigen Abschnitt beschrieben, kommt dieser Lösung zugute, weil Tiefengeothermie in der Regel nicht dort vorhanden ist, wo die Prozesswärme genutzt werden will.

6. Gesamtschweizerische Strom-/Energieversorgung

In den vorhergehenden Kapitel wurde jeweils auf die Strom-/Energieversorgung von kleineren «Zellen» fokussiert. In diesem Kapitel soll das Betrachtungsspektrum auf nationale Ebene ausgedehnt werden.

Zuerst ein paar Eckdaten bezüglich Energieverbrauch und Energiegewinnung:

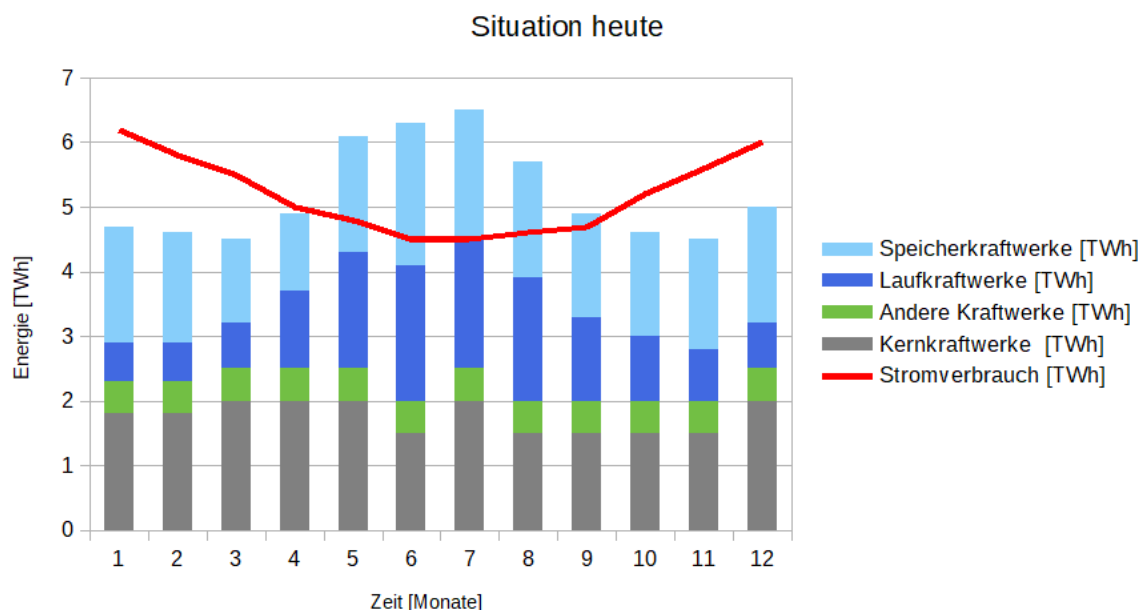
Jährlicher Energieverbrauch der Schweiz nach Verwendungszweck (Total: 225 TWh):

Wärme:	70 TWh Raumwärme (vorwiegend Wintermonate Nov.-März)
	15 TWh Warmwasser (aufs Jahr verteilt)
	30 TWh Prozesswärme (aufs Jahr verteilt)
	(der Wärmebedarf wird heute grösstenteils aus Fossilen Energieträgern gedeckt)
Antrieb/Prozesse:	25 TWh (grösstenteils Elektrizität)
Beleuchtung/IT/Klima:	15 TWh (Elektrizität)
Mobilität (Inland):	70 TWh (heute grösstenteils fossile Energieträger)

Strommix heute (Total: 62 TWh/Jahr):

Kernkraft:	21 TWh
Wasserkraft:	35 TWh (Laufkraftwerke: 15 TWh / Speicherkraftwerke: 20 TWh)
Rest:	6 TWh

Jährlicher Verlauf von Strombedarf und Stromgewinnung in der Schweiz heute (die Werte sind gemittelte Werte aus den Jahren 2015 bis 2019):



Wegweisend für die Energieversorgung der Zukunft ist der Ausstieg aus der Kernenergie, Ersatz fossiler Energieträger und mehr Unabhängigkeit.

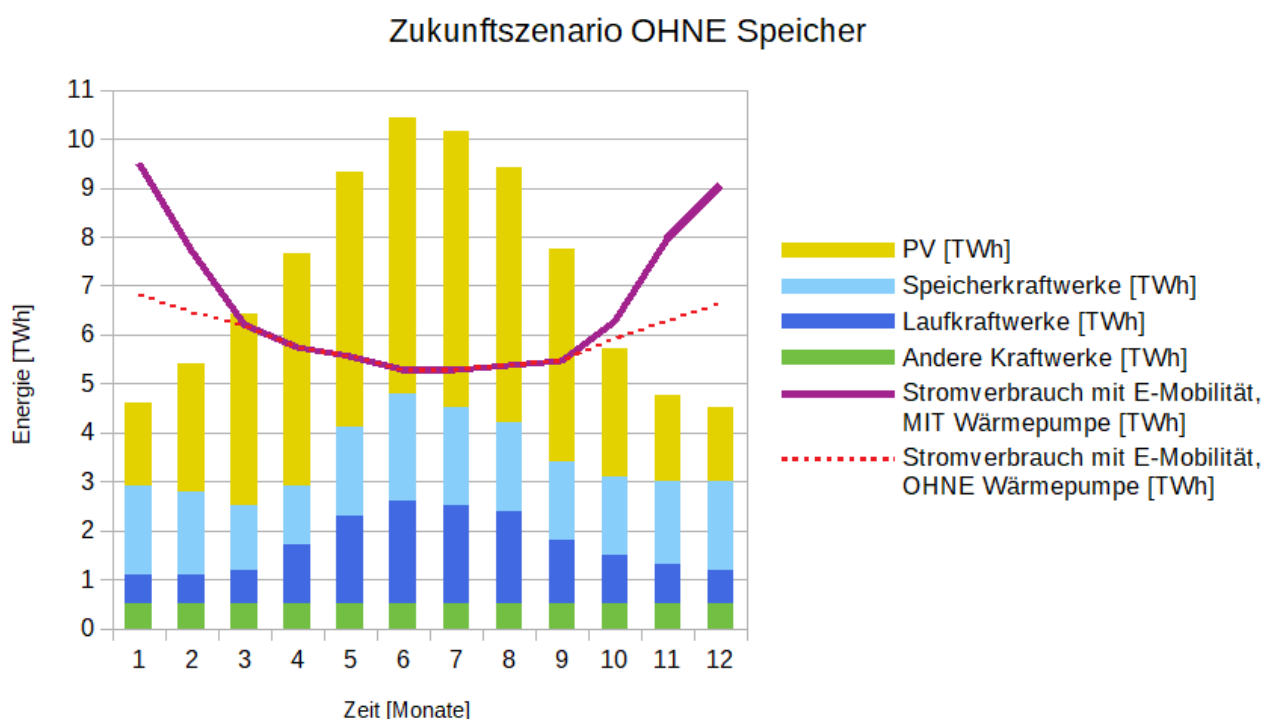
In den folgenden Grafiken wird versucht zu verdeutlichen, in wie fern durch einen massiven Ausbau der PV dieses Ziel erreicht werden kann. Und wie mit SCB die Stromlücke im Winter geschlossen werden kann.

Die dem Szenario zugrunde gelegte Daten sind:

Strombedarf (-10% gegenüber heute durch Effizienzsteigerung):	56 TWh/Jahr
E-Mobilität:	15 TWh/Jahr
Strombedarf für Wärmepumpen (entfällt bei SCB):	8 TWh/Jahr *
Ertrag PV:	45 TWh/Jahr
Zu speichernde Energiemenge (Stromüberschuss + Umweltwärme):	35 TWh
Wärmeertrag aus WKK:	25 TWh **
Wirkungsgrad WKK (Wärmeenergie => Strom):	20 %

* Von November bis März. Mit dieser Energie kann dieselbe Wärmemenge gewonnen werden, welche sonst die WKK zur Verfügung stellt.

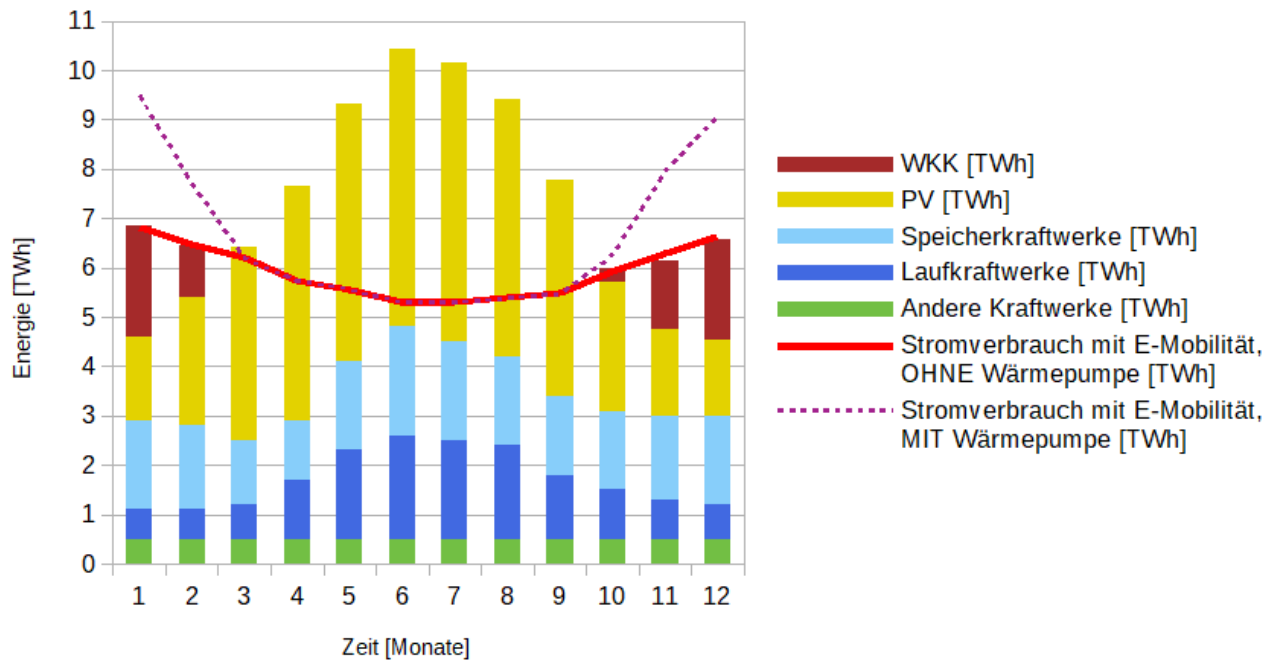
** Annahme, dass der schweizerische Wärmebedarf infolge besser isolierter Gebäude in Zukunft deutlich sinken wird.



Stromüberschuss der PV im Sommer: 22 TWh
Strommangel im Winter: 15 TWh

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass Strom aus PV (sowohl als auch Wasserkraft) vor allem im Sommer gewonnen werden kann. Ein Ersatz der fossilen Energieträger durch Wärmepumpen bedingt einen massiven Anstieg des Strombedarfs im Winter, so dass sich die Winterstromlücke gegenüber heute vergrössern wird.

Zukunftszenario MIT Speicher



Stromüberschuss der PV im Sommer: 22 TWh
 Strommangel im Winter: 0 TWh

Die gestrichelte Linie ist in diesem Diagramm eigentlich nicht relevant. Sie soll lediglich darstellen wie der Stromverbrauch wäre, wenn die Wärmeenergie, welche aus SCB entnommen werden kann, durch Wärmepumpen gewonnen werden müsste.

7. Zusammenfassung

Ein oft diskutiertes Thema in der Energieversorgung mittels erneuerbarer Energie ist, wie der grosse Energieüberschuss im Sommer, vor allem gegeben durch die solare Energiegewinnung, für den Winter gespeichert werden kann. Im Fokus steht dabei die Frage der Stromspeicherung. Strom in sehr grossen Mengen über mehrere Monate zu speichern ist nicht trivial. Das Thema gewinnt noch mehr an Bedeutung durch die Tendenz, dass Gebäudeheizungen und Warmwasseraufbereitungen zunehmend mit Wärmepumpen realisiert werden; wodurch der Strombedarf gerade im Winter stark ansteigen wird.

Dieses Dokument soll einen Gedankenanstoss geben, diese Herausforderung - zumindest zu einem gewissen Teil - mit Hilfe von saisonalen Hochtemperaturspeichern zu lösen. Das heisst, den Stromüberschuss im Sommer in Form von Wärme auf hohem Temperaturniveau in einem «Steinhaufen» zu speichern, und bei Bedarf – das heisst vorwiegend im Winter - mittels Wärmekraftkopplung aus dieser Wärme so weit wie möglich wieder Strom zu generieren. Die Abwärme der Wärmekraftkopplungsanlage wird dabei zur Raumerwärmung und Warmwasseraufbereitung genutzt, was zu einem sehr hohen Gesamtwirkungsgrad führt. Durch die Kopplung der Sektoren Wärme und Strom können wertvolle Synergien erschlossen werden. Durch die Nutzung der Wärmeenergie im Winter kann ein nicht unwesentlicher Anteil an Strom eingespart werden.

Ein wichtiger Aspekt bei den Überlegungen und Analysen ist, nicht nur den Speicher, sondern das Gesamtsystem zu betrachten. Nachhaltigkeit (Umweltverträglichkeit, lokale Wertschöpfung, Betriebsdauer, ...), Integrierbarkeit, Versorgungssicherheit, Unabhängigkeit (national und regional), Flexibilität (Möglichkeit nachträglicher Erweiterungen), Kombinierbarkeit mit anderen Systemen und natürlich die Wirtschaftlichkeit sind dabei ganz wichtige Faktoren.

Grosse Mengen Energie lassen sich relativ gut in Form von Wärme speichern. Das hohe Temperaturniveau ermöglicht es, bei der Stromrückgewinnung einen akzeptablen Wirkungsgrad zu erreichen. Zudem hat die Energiespeicherung in Form von Wärme den Vorteil, dass sich der Speicher sehr einfach an Verbrennungsanlagen (Holz, Kehrlicht, ...) koppeln lässt, und die Abwärme dieser Anlagen optimal genutzt werden kann.

Damit die Wärmeverluste des Speichers in einem akzeptablem Rahmen bleiben, sollte der Speicher eine minimale Grösse haben. Diese ist jedoch genügend klein, so dass das System flexibel und lokal eingesetzt werden kann, was gerade für die Nutzung der Abwärme aus der WKK von grosser Bedeutung ist. Diese Abwärme hat ein genügend hohes Temperaturniveau, sodass die Wärme in Fernwärmenetze geleitet werden kann, und sich so die Speichereinheit einfach in bestehende Infrastruktur integrieren lässt.

Der einfache Aufbau des Speichers mit sehr kostengünstigem Speichermaterial und die sehr lange Betriebsdauer machen den Speicher wirtschaftlich interessant. Bei der Stromgewinnung wird der Fokus auf kostengünstige Photovoltaikanlagen gelegt, die es ermöglichen, den Strom auch sehr lokal zu gewinnen. Nebst dem Strom wird im Sommer auch Umweltwärme, oder Abwärme aus industriellen Prozessen gewonnen und, mit der elektrischen Energie vereint, als Wärmeenergie im Speichermedium gelagert. Dadurch, dass Energiegewinnung, Speicherung und Verbrauch lokal gehalten werden, können die Strom-/Energieverteilnetze entlastet werden. Es ist damit möglich, kleine, autarke Energieversorgungszellen zu erstellen, welche über das ganze Jahr die Energieversorgung sicherstellen können. Das Speichermaterial ist praktisch überall auf der Erde im Überfluss vorhanden, kann relativ einfach und energiearm gewonnen werden, verliert seine Speicherfähigkeit auch über Jahrzehnte nicht und ist äusserst umweltfreundlich; muss auch nicht recycelt werden. Umweltwärme lässt sich im Vergleich zu Strom wesentlich einfacher und günstiger gewinnen. Durch diese Kopplung von Umweltwärme und Strom wird die Effizienz der Anlage erhöht. Der Vergleich mit Wasserspeicherkraftwerken und P2G zeigt, dass SCB punkto Energieeffizienz mit diesen beiden Speichertechnologien mithalten kann.

Eine grobe Kostenabschätzung zeigt, dass wenn man das Gesamtsystem von SCB, von der Energiegewinnung bis zum Verbrauch, betrachtet, die Kosten sich in etwa im selben Rahmen befinden werden wie wenn diese Energie mit heute gängigen Lösungen gewonnen wird.

Die Speicher bedürfen keiner besonderen geologischen Anforderungen (wie zum Beispiel Wasserspeicherkraftwerke), so dass sie fast an jedem beliebigen Ort erstellt werden können. Im Weiteren können ohne grosse Mehrkosten die Speicher reichlich überdimensioniert werden, so dass auch ein gewisser Ausgleich der Energie über 2-3 Jahre stattfinden kann.

Der Speicher dient nicht nur als Langzeitspeicher (Sommer-Winter Ausgleich), sondern kann ebenso gut als mittelfristiger oder kurzzeitiger Speicher (Tag-Nacht Ausgleich) dienen.

Ein Zukunftsszenario zeigt, dass die Schweizerische Strom-/Energieversorgung aus einheimischen Quellen über das ganze Jahr hinweg bewerkstelligt werden könnte, auch mit einem Ausstieg aus der Kernenergie und dem Ersatz von fossilen Energiequellen. Ohne Risiko eines Strommangels im Winter. Erreicht wird dies mit einer Erhöhung des jährlichen Stromertrags aus PV auf 45 TWh und mit SCB, um die Winterstromlücke zu schliessen.

Dadurch, dass SCB auf bekannter und bewährter Technologie basiert, liesse sich innerhalb kurzer Dauer eine Pilotanlage realisieren.

8. Abkürzungsverzeichnis

WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
SCB	Saisonale Carnot-Batterie
WP	Wärmepumpe
WE	Wohnungseinheit
P2H	Power-to-Heat (Strom-zu-Wärme)
P2G	Power-to-Gas (Strom-zu-Gas)
PV	Photovoltaik
CHF	Schweizer Franken
WW	Warmwasser
EFH	Einfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
CSP	Concentrated Solar power
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk