



Wärmespeicherkraftwerke

Positionspapier des DLR zum Umbau von Kohlekraftwerken auf einen CO₂-neutralen Betrieb

Prof. Dr. André Thess, Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt, Stefano Giuliano, Dr. Franz Trieb
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

22. Februar 2019

Wärmespeicherkraftwerke sind umgebaute Kohlekraftwerke, die ihre Energie nicht durch Verbrennung, sondern aus erneuerbaren Quellen beziehen. Im vorliegenden Positionspapier wird das Grundprinzip dieser Kraftwerke erläutert und ihre Bedeutung für ein emissionsarmes Energiesystem der Zukunft aufgezeigt.

Die preiswerte Verfügbarkeit von Strom aus Kohlekraftwerken hat für hunderte Millionen von Menschen in Schwellen- und Entwicklungsländern wie China und Indien einen Beitrag zum Übergang von Armut zu Wohlstand geleistet. Gleichzeitig sind Kohlekraftwerke, schematisch dargestellt in Abbildung 1, im globalen Maßstab neben dem Verkehr der größte Emittent von CO₂. Der Erfolg der weltweiten Dekarbonisierung des Energiesystems hängt in hohem Maße davon ab, wie schnell und in welcher Form die Kohle durch CO₂-neutrale Energiequellen ersetzt werden kann. Dabei ist es wünschenswert, die regelbare und jederzeit sichere Leistung der Kraftwerke beizubehalten und einen Teil der vorhandenen Kraftwerksinfrastruktur weiterzunutzen.

Für eine erfolgreiche Transformation des weltweiten Energiesystems muss die Kohle ersetzt, aber die sichere Leistung der Kraftwerke erhalten werden. Ein in Abbildung 2 schematisch dargestelltes Wärmespeicherkraftwerk ist in der Lage, beide Ziele zu erreichen. Wärmespeicherkraftwerke ersetzen nicht die Kraftwerke, sondern lediglich deren fossilen Brennstoff.

Wärmespeicherkraftwerke sind in der Lage, Stromschwankungen aus variabler regenerativer Erzeugung aus dem Netz zu entfernen und dafür Strom nach Bedarf ins Netz zu liefern. Sie dienen damit der Veredelung variabler Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (wie zum Beispiel von Photovoltaik und Wind) und liefern genauso wie konventionelle Kraftwerke regelbaren Strom entsprechend dem aktuellen Bedarf der Stromkunden. Die Zuführung mit erneuerbaren oder fossilen Brennstoffen erlaubt jederzeit garantierte Leistung. Dies gilt auch während längerer Perioden ohne Wind und Sonne, sogenannten Dunkelflauten. Wegen des regelmäßigen Tag-Nacht Zyklus der Sonnenenergie ist diese besonders für die Nutzung in Wärmespeichern geeignet. Diese müssen dann höchstens für einen Tag Speicherkapazität ausgelegt werden, typischerweise für Kapazitäten zwischen 6 und 18 Stunden.

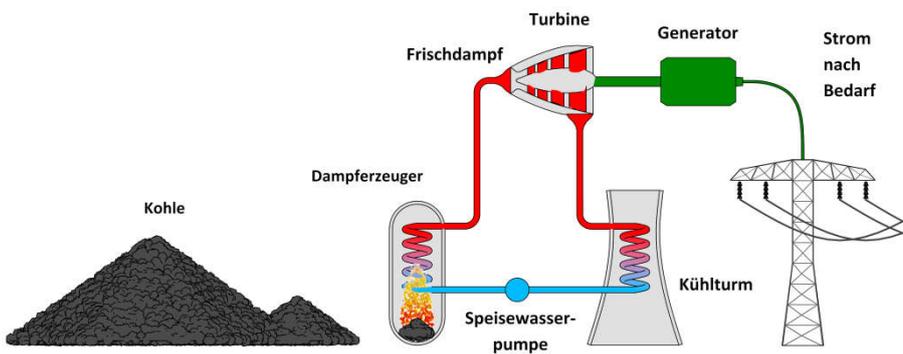


Abb.1: Kohlekraftwerke verbrennen Kohle und liefern dafür jederzeit sichere elektrische Leistung nach Bedarf, sogenannten „regelbaren Strom“.

Ein Alleinstellungsmerkmal der Wärmespeicherkraftwerke ist der nahezu verlustfreie Standby-Betrieb. Dieser erlaubt ununterbrochene Primär- und Sekundärreserve ohne Brennstoffverbrauch, allein durch Nutzung der regenerativen Wärme aus dem Speicher. Wärmespeicherkraftwerke verwenden weitestgehend Komponenten, die schon heute mehrfach und in großem Maßstab gebaut wurden und kommerziell verfügbar sind.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 3 die vereinfachte Skizze eines Wärmespeicherkraftwerks, das zur Umwandlung von fluktuierendem Strom aus einer Photovoltaikanlage in kontinuierlichen Grundlaststrom verwendet wird. Schematisch sind vier aufeinanderfolgende Tage dargestellt.

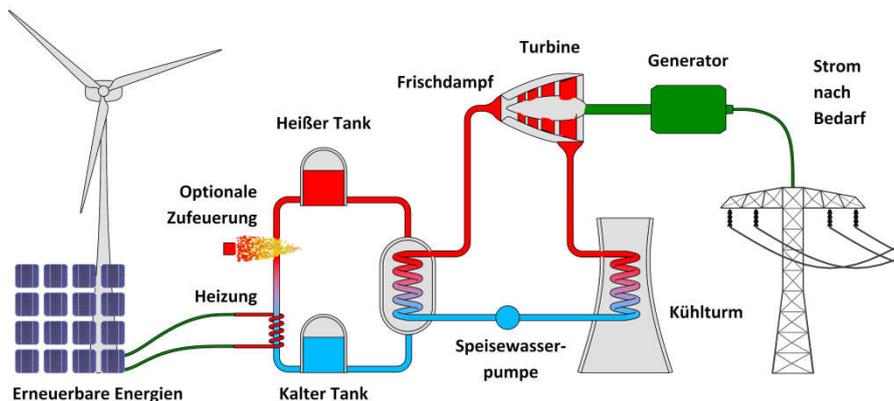


Abb.2: Wärmespeicherkraftwerke verwenden Strom aus erneuerbaren Quellen zur Beheizung eines Wärmespeichers mit umlaufender Salzschnmelze. Wenn überschüssiger Strom verfügbar ist, wird das Salz über eine Elektroheizung erhitzt und in einem „heißen“ Tank bei über 400°C zwischengespeichert. Zur späteren Stromerzeugung wird das heiße Salz über den Dampferzeuger des Kraftwerks zurück in den „kalten“ Tank bei über 200°C gepumpt und steht dann für einen weiteren Ladezyklus zur Verfügung. Die Möglichkeit der Zuführung mit Biogas, Synthesegas aus Power-to-Gas oder Erdgas garantiert jederzeit sichere Leistung.

Die Veredelung des stark schwankenden Solarstroms in regelbaren Strom auf dem Weg über Speicher und Turbine erfolgt derzeit mit einem Wirkungsgrad von etwa 40%. Weil ein Teil des Solarstroms tagsüber direkt und damit verlustfrei durchgeleitet werden kann, ist im Fall einer Grundlastversorgung ein deutlich höherer Strom-zu-Strom Wirkungsgrad möglich.

Mit Hilfe von Wärmespeicherkraftwerken könnte die Leistung von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland weiter ausgebaut werden, ohne Stromüberschüsse tagsüber oder Versorgungslücken nachts signifikant zu verstärken. Fossile Brennstoffe, die bisher in konventionellen Kraftwerken zur Erzeugung regelbarer Energie und zum Leistungsausgleich im Netz eingesetzt werden mussten, könnten auf diese Weise unter Beibehaltung der Versorgungssicherheit nahezu vollständig durch erneuerbare Energie ersetzt werden. Mit

künftigen Hochtemperatur-Wärmepumpen sind auf dem Weg über Wärmespeicher und Dampfturbine statt 40% sogar Wirkungsgrade bis zu 70% möglich.

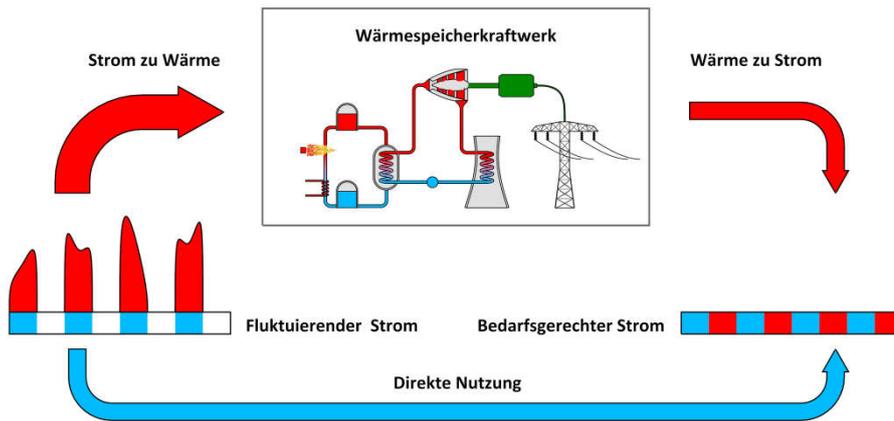


Abb.3: Energieflüsse in einem Wärmespeicherkraftwerk: Ein Teil des Stromertrags einer Photovoltaik-Anlage kann tagsüber direkt ins Netz gespeist werden. Der größere Teil wird einem Wärmespeicher zugeführt, der eine Dampfturbine nachts mit Energie versorgt. Die Verfügbarkeit der installierten Leistung der Turbine ist dabei jederzeit, sogar während einer „Dunkelflaute“, durch Zuführung von Erd- oder Biogas garantiert. Solche Kraftwerke können zukünftig wie hier im Beispiel für den Grundlastbetrieb oder auch für den flexiblen Netzausgleich ausgelegt und eingesetzt werden.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse einer kurzen Modellstudie auf der Basis eines DLR-Energieszenarios für das Jahr 2030. In der ersten Zeile sind die CO₂-Emissionen für ein reines Kohlekraftwerk („First Life“), für ein auf Erdgasverbrennung umgebautes Kohlekraftwerk („Second Life“) und für ein zum Wärmespeicherkraftwerk („Third Life“) umgebautes Kohlekraftwerk angegeben. Die Zahlen zeigen, dass durch Umbau von First Life zu Second Life eine moderate und durch Umbau von First Life auf Third Life eine drastische Reduktion der CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde möglich ist. Somit kann Third Life einen effektiven Beitrag zur Dekarbonisierung von Kohlekraftwerken leisten.

Status etwa im Jahr 2030	Braunkohle-kraftwerk: „First Life“	Brennstoffwechsel zu Erdgas: „Second Life“	Wärmespeicher-kraftwerk: „Third Life“
CO ₂ -Emission kg/kWh	1,15	0,65	0,06
Stromkosten (Cent/kWh)	4,5	12	14
CO ₂ -Vermeidungskosten (€/Tonne)		150	87

Tabelle 1: Ergebnisse für CO₂-Emissionen, Stromkosten und CO₂-Vermeidungskosten. Die CO₂-Emissionen ergeben sich aus dem Kohlenstoffgehalt der Brennstoffe und der eingesetzten erneuerbaren Energiequellen. Die Stromkosten berechnen sich aus Zeitreihen von Angebot und Nachfrage des zugrunde liegenden Energieszenarios. Die CO₂-Vermeidungskosten sind jeweils der Quotient aus der CO₂-Einsparung und der Kostendifferenz von Second Life beziehungsweise Third Life zu First Life.

Die zweite Zeile zeigt die aus den Annahmen des Energieszenarios für 2030 folgenden Stromerzeugungspreise (ohne Steuern und Umlagen) für die drei betrachteten Kraftwerkstypen. Aufgrund immer geringerer Auslastung durch die Energiewende werden die Stromkosten der Braunkohlekraftwerke (First Life) von heute etwa 3,5 Cent/kWh voraussichtlich auf etwa 4,5 Cent/kWh ansteigen, obwohl die Braunkohle im betrachteten Szenario nicht teurer wird. Der Brennstoffwechsel zu deutlich teurerem Erdgas (Second Life) würde bei gleichbleibendem Wirkungsgrad zu Stromkosten von etwa 12 Cent/kWh führen. Die Stromkosten betragen im Fall der in Abbildung 3 dargestellten Konfiguration des

Wärmespeicherkraftwerks (Third Life) etwa 14 Cent/kWh. Der Anstieg der Erzeugungspreise mit dem Übergang von First Life auf Second Life und Third Life verdeutlicht, dass die Dekarbonisierung von Kohlekraftwerken nur unter geänderten regulatorischen Randbedingungen wie etwa einem Verbot der Kohleverstromung oder einer CO₂-Steuer wirtschaftlich werden kann.

In der dritten Zeile von Tabelle 1 sind die CO₂-Vermeidungskosten eines Brennstoffwechsels von First Life zu Second Life sowie eines Umbaus von First Life zu Third Life für das Jahr 2030 angegeben. Beim Brennstoffwechsel von Kohle auf Erdgas betragen die CO₂-Vermeidungskosten etwa 150 €/Tonne. Bei einem Umbau von First Life auf Third Life liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei ungefähr 87 €/Tonne. Die bei Third Life gegenüber Second Life geringeren CO₂-Vermeidungskosten implizieren, dass im Fall einer schrittweise eingeführten globalen Verteuerung von CO₂ durch Steuern oder verknappte Zertifikate der Umbau zu Third Life die wirtschaftlichere Alternative gegenüber einer Umstellung auf Erdgas wäre.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Wärmespeicherkraftwerke ein wichtiges Schlüsselement für die erfolgreiche Transformation des Energiesystems hin zu sehr hohen erneuerbaren Anteilen im Stromsektor darstellen können. Dadurch, dass sie Schwankungen erneuerbarer Stromerzeugung aus dem Netz nehmen und in regelbaren Strom nach Bedarf umsetzen können, erlauben sie einen weiteren starken Ausbau der Photovoltaik, ohne signifikante zusätzliche Stromüberschüsse oder Abregelungen zu erzeugen. Gleichzeitig kann die installierte Leistung der Dampfturbinen der Wärmespeicherkraftwerke als jederzeit sicher abrufbar eingestuft werden, da sie auch bei Dunkelflauten durch Zufeuerung von verschiedenen erneuerbaren oder fossilen Brennstoffen garantiert werden kann. Dadurch wird die notwendige Leistung zukünftiger Backup-Kraftwerke mit geringer Auslastung signifikant reduziert. Die Nutzung von Wärmespeichern erweitert zudem das Spektrum an zukünftig verfügbaren Speichertechnologien für Elektrizität. Dadurch könnten Wärmespeicherkraftwerke möglicherweise auch den Druck auf Rohstoffe für Batterien wie etwa Lithium reduzieren.

Weitere Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmespeicherkraftwerken sind die Kombination mit Hochtemperaturwärmepumpen zur Steigerung des Strom-zu-Strom-Wirkungsgrades und die Kraft-Wärme-Kopplung zur Steigerung des Nutzungsgrades der eingesetzten erneuerbaren Primärenergie.

Thesen

- **Wärmespeicherkraftwerke ersetzen fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energie und erhalten gleichzeitig die sichere Leistung und Regelbarkeit konventioneller Kraftwerke.**
- **Wärmespeicherkraftwerke erlauben den weiteren Ausbau der Photovoltaik ohne zusätzliche Stromüberschüsse und ohne Abregelung.**
- **Wärmespeicherkraftwerke liefern regelbaren und gleichzeitig erneuerbaren Strom bei moderaten CO₂-Vermeidungskosten.**
- **Wärmespeicherkraftwerke erlauben den Erhalt erprobter Infrastrukturen, Betriebsweisen und Arbeitsplätze in der Stromversorgung trotz vollständiger Vermeidung von Treibhausgasen.**
- **Wärmespeicher sind ein Schlüsselement der zukünftigen Stromversorgung in einem weltweiten CO₂-armen Energiesystem der Zukunft.**