



VIK Mitteilungen

Das Fachmagazin des Verbands der Industriellen Energie- & Kraftwirtschaft

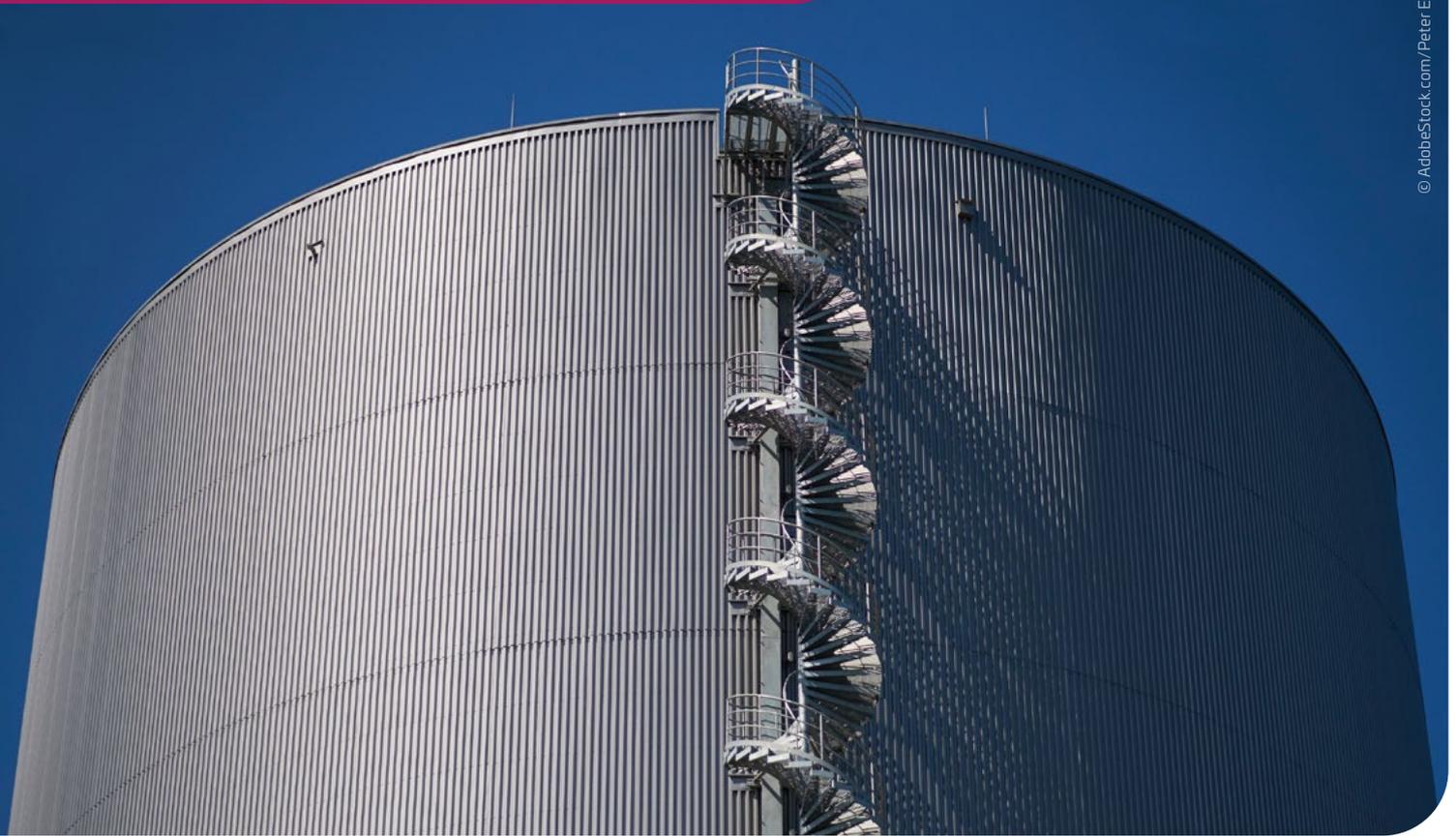


TECHNIK FÜR DIE TRANSFORMATION

Elektrifizierung
von industrieller
Prozesswärme

Predictive
Maintenance mit
Loctite Pulse

Energieversorgung
mit klimafreundlichen
Schaltanlagen



Beyond Renewables

Energiewende.Next Level

Gerrit Koll, Leiter WSK Gruppe, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Martin Lienert, Partner, r2b energy consulting GmbH

Zusammenfassung: Wärmespeicherkraftwerke (WSK) stellen eine technische Möglichkeit zur Dekarbonisierung von Industriestandorten dar, deren technische und ökonomische Bedeutung das DLR und seine Partner in diversen Projekten untersucht und erprobt haben. Für die ökonomische Bewertung – auch im Vergleich zu konkurrierenden Technologien – setzten die Projektpartner unter anderem stundengenaue Preisprognosen für den Großhandelsmarkt für Strom (HPFC's) ein. In diesem Zusammenhang, sowie auch zur Bestätigung von Ergebnissen aus anderen Untersuchungen wurde durch den Partner r2b energy consulting mit dem Energiesystemmodell SESAM (Stochastic Energy System Analysis Model) eine solche HPFC erstellt. Darüber hinaus wurde das Modell um Wärmespeicherkraftwerke als zusätzliche Technologieoption ergänzt und die Auswirkungen auf das Energiesystem und die resultierenden stündlichen Strommarktpreise

betrachtet. Es konnten unterschiedliche positive Auswirkungen, wie die Einsparung von wertvollem grünen H₂, die Reduzierung der EE-Abregelung, die Weiternutzung und Flexibilisierung insbesondere von industriellen Wärmekraftwerken, die sichere Lastdeckung in Dunkelflauten sowie eine leichte Reduzierung der Strompreise festgestellt werden. Diese Vorteile wurden besonders im Zusammenhang mit der Nutzung industrieller KWK (Kraft-Wärme-Kopplung) festgestellt.

Einleitung & Randbedingungen

Die Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag ehrgeizige Ziele zum Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) verankert. Sie will 80 % des Stromverbrauchs bis 2030 aus erneuerbaren Energien erzeugen bei einem gleichzeitigen, möglichst früheren Abschalten der Kohlekraftwerke vor 2038. Diese Änderungen im Erzeugungspark bringen große Herausforderungen für das Energiesystem mit sich.

Auch die Industrie hat sich hohe Ziele zur Dekarbonisierung gesetzt. Diese sollen durch die Umstellung von Prozessen auf eine Versorgung mit Erneuerbarem Strom oder eigenen Erneuerbaren Erzeugungsanlagen erfolgen. Die Umstellung stellt sowohl die Industrie als auch die öffentliche Versorgung vor erhebliche Anforderungen, da große Energiemengen künftig nicht mehr als fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoff an die Standorte der Industrie geliefert werden, sondern in Form von Strom. Hiermit sind erhebliche Herausforderungen für die Netzinfrastruktur verbunden, welche aber in dieser Analyse nicht im Fokus stehen. Schwerpunkt dieser Analyse ist vielmehr das stark variable Dargebot der Erneuerbaren Energien, im Gegensatz zum meist kontinuierlichen Energiebedarf 24/7 der Industrie. Diese Entwicklung wird sich zukünftig mit der fortschreitenden Dekarbonisierung von Industriestandorten noch zusätzlich verschärfen. Die Integration von Stromspeicher,

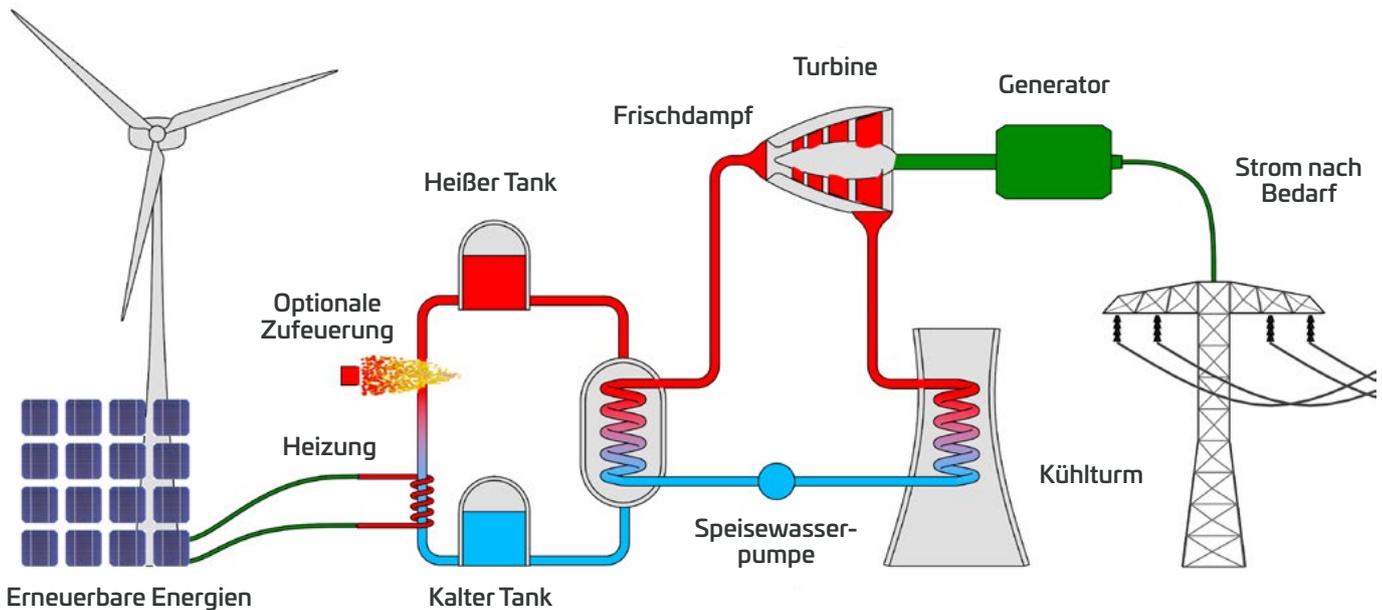


Abb. 1 | Verfahrensschema eines Wärmespeicherkraftwerkes, Quelle: DLR

Wärmespeichern und sogenannten Carnot Batterien in Industriekraftwerke kann zu deutlichen Entlastungen des Energiesystems führen und wirtschaftliche Vorteile sowohl für das Gesamtsystem als auch einzelne Industriestandorte bringen. Dies zeigten schon diverse Machbarkeitsstudien für Wärmespeicherkraftwerke der Beteiligten.

Eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit künftiger CO₂-armer Versorgungsoptionen spielen die Prognosen der künftigen stündlichen Strompreise und die Entwicklung der Volatilität der Strompreise im Zusammenhang mit dem Aus- und Umbau des Energiesystems bis in die Jahre 2040/50. Im Rahmen dieser Analyse steuert r2b energy consulting (r2b) entsprechende Analysen bei.

Was sind Wärmespeicherkraftwerke und welche Funktion haben sie?

Bei Wärmespeicherkraftwerken (WSK) handelt es sich um Kraftwerke, die über einen großen Hochtemperatur-Wärmespeicher verfügen. Dieser kann mit Erneuerbarem Strom beheizt werden, entweder mit einem einfachen Elektroheizer oder künftig mittels Hochtemperatur Wärmepumpen. Das Kraftwerk ist dabei mit einer Zusatzfeuerung und optional einer Gasturbine ausgestattet, die zunächst mit Erdgas, im weiteren Verlauf auch mit Erneuerbaren Brennstoffen wie Biogas, Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen betrieben werden kann.

Die sehr flexible Betriebsweise des Kraftwerks mit Zufeuerung ermöglicht eine weitere Integration von Erneuerbaren Energien in das Stromsystem. In Zeiten mit hoher EE-Einspeisung (niedrige Strompreise) wird der Speicher beladen und in Zeiten mit geringer EE-Einspeisung (hohe Strompreise) wird der Speicher entladen. Mittels dieses Prinzips wird die Erzeugung am Standort flexibilisiert bei gleichzeitiger kontinuierlicher Versorgung des Standortes mit Strom. In den seltenen Fällen von lang anhaltenden hohen Strompreisphasen kann mittels Zufeuerung, die Stromversorgung am Standort aufrechterhalten werden.

Zur Spitzenlastabdeckung kann darüber hinaus eine Gasturbine betreibbar mit Erneuerbarem Brennstoff ergänzt werden.

Das System kann bei Knappheit am Strommarkt (hohe Strompreise) Leistung bereitstellen und das Gesamtsystem entlasten. Da es als GuD betrieben wird, können deren Effizienz- und Kostenvorteile genutzt werden. Gleichzeitig kann die Gasturbine für den Industriestandort als Backup für die lokale Stromversorgung eingesetzt werden. Der zusätzliche Einsatz der Gasturbine in den Regelenergiemärkten kann dem Gesamtsystem zusätzlichen Nutzen bringen.

Verschiedene Speichermedien können in einem WSK eingesetzt werden. Zum einen kommen Schmelzsaltzspeicher bei ca.

560 °C, bekannt aus den „Concentrating Solar Thermal Power Plants“ (CSP), in Frage. Weltweit sind mit diesem Verfahren Speicherkapazitäten von über 22 GWhel im Einsatz, besonders in Spanien, USA, China und einer Reihe weiterer Staaten.

Die Salzmischung wird geschmolzen und zwischen einem Heiß- und Kalttank hin- und hergepumpt. Aus dem Kalttank bei ca. 280 °C kommend, wird das Salz mittels Elektroheizer erhitzt und im Heißtank eingelagert. Von dort gelangt es bedarfsgerecht zur Strom- und Wärmeerzeugung. Dazu gibt es in einem Wärmetauscher seine gespeicherte Energie an einen Wasserdampfkreislauf ab und erzeugt dort Dampf, der in einer Dampfturbine in Strom umgewandelt wird. Parallel kann die Turbine Dampf zur Nutzung in einem Industrieprozess oder als Fernwärme liefern. Das System ist aufgrund der hohen Wärmekapazität sehr kompakt. Das DLR betreibt am Standort Köln seit mehreren Jahren eine Versuchsanlage (Tesis).

Ein weiteres erprobtes Verfahren beruht auf Feststoffen als Speichermedium und Luft als Wärmeträger bei Temperaturen von bis zu 900 °C. Vorteile sind hohe Prozess-Temperaturen, das günstige Wärmeträgermedium, sowie die einfache Integrierbarkeit in Gasturbinenkraftwerken. Das Verfahren ist weltweit erprobt im Einsatz als Hochtemperaturspeicher für die Stahlindustrie und in kleinerer



Abb. 2 | Weltweit im Einsatz befindliche Schmelzsatzspeicher, Quelle: DLR

Bauweise in RTO-Anlagen (Regenerative Thermische Oxidation). Das DLR betreibt Versuchsanlagen an den Standorten Jülich und Stuttgart.

Als WSK kommen sowohl sogenannte „Brownfield Standorte“ in Frage, also die Umbaubestehender konventioneller Kraftwerksstandorte, als auch Kraftwerksneubauten. Die Komponenten werden von deutschen und europäischen Herstellerfirmen geliefert, die Anlagen können von deutschen und europäischen Kraftwerksanlagenbauern errichtet werden, dies schafft auch eine industriepolitische Bedeutung der Technologie.

Der Strom-zu-Strom Umwandlungswirkungsgrad ist dabei begrenzt durch die heute üblichen Kraftwerkswirkungsgrade. Zur Verbesserung können künftig Hochtemperatur Wärmepumpen zur Beladung eingesetzt werden.

Modell für Strompreisprognosen und Integration der WSK in Fundamentalmmodellierung

Für die standortbezogene Wirtschaftlichkeitsrechnung eines WSK werden unter anderem sogenannte Hourly Price Forward Curves (HPFC's) benötigt. HPFC's sind in Modellrechnungen ermittelte jährliche Strompreiskurven mit jeweils stündlichen

Preisen, die die künftigen Börsenstrompreise bis 2050 abbilden. Diese werden in sogenannten Fundamentalmmodellen der Energieversorgung für Zukunftsszenarien berechnet. Auf Basis von HPFC's können Einsatzrechnungen mit verschiedenen Technologieoptionen unter verschiedenen Marktszenarien durchgeführt werden und die sinnvollste und wirtschaftlichste Technologieoption für künftige Strom (und Wärme) -Märkte bestimmt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden in Zusammenarbeit mit einem Industriestandort Wirtschaftlichkeitsanalysen für ein WSK im Vergleich zu anderen Technologien vorgenommen.

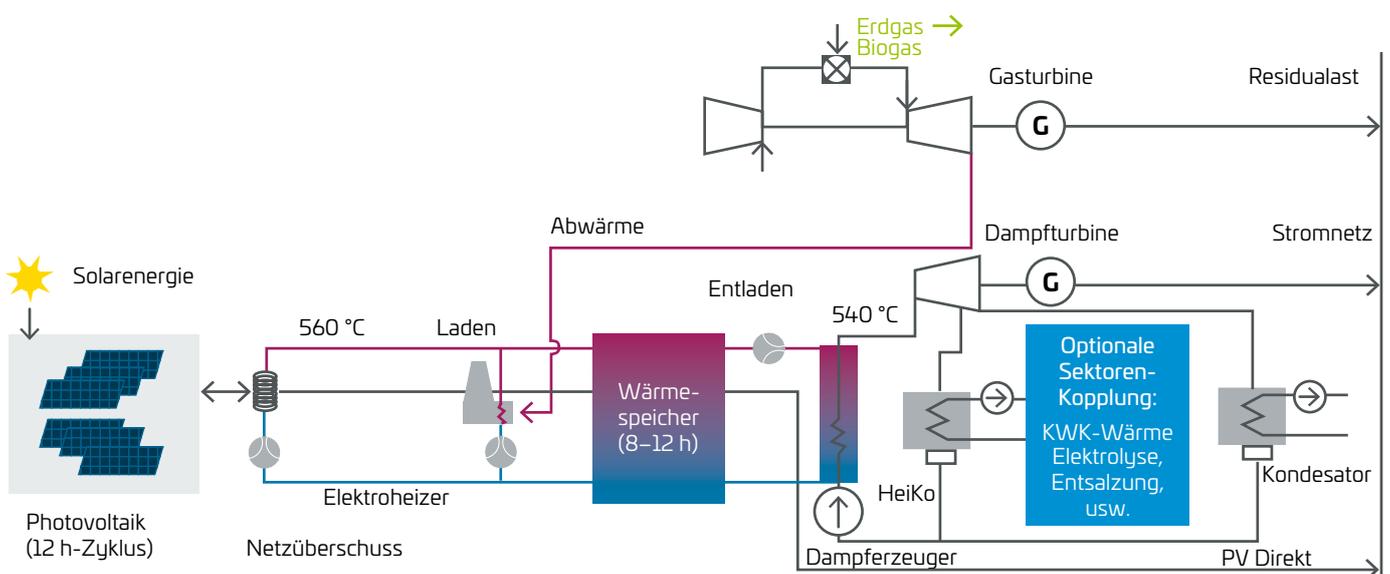


Abb. 3 | Konzeptvorschlag einer Pilotanlage eines Industrie WSK mit GT und Feststoff-Luft-Speichersystem, Quelle: DLR

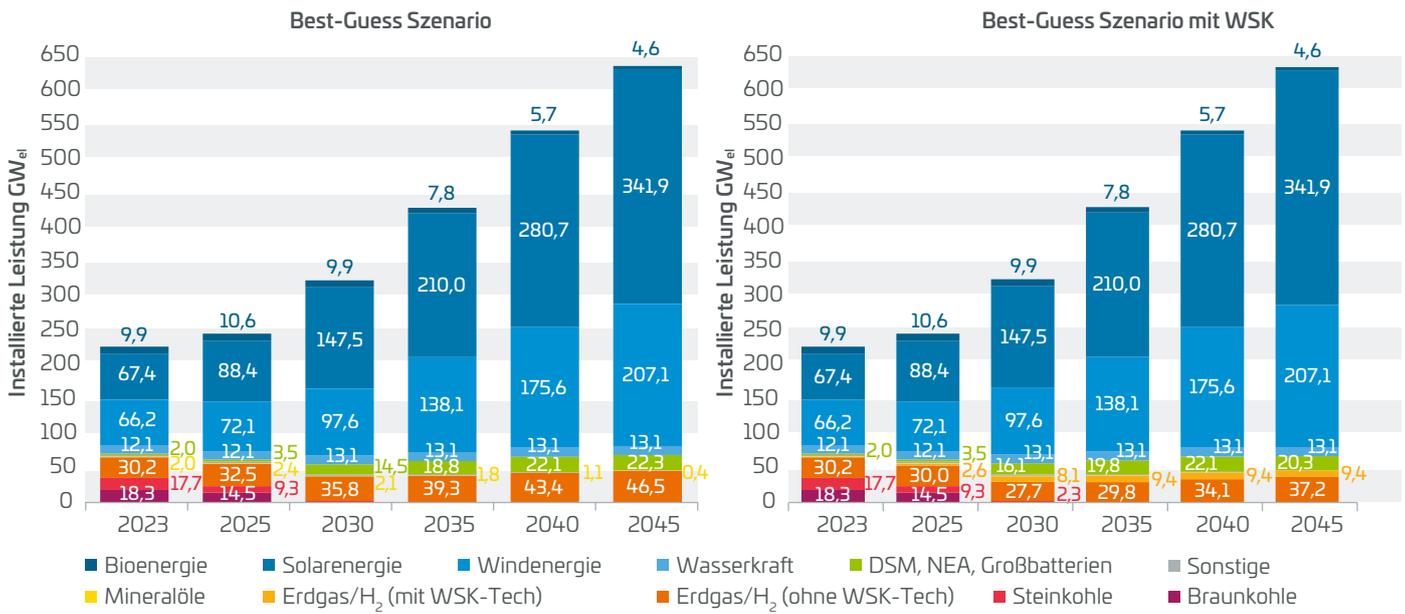


Abb. 4 | Leistungsentwicklung im Best-Guess Szenario mit und ohne WSK, Quelle: r2b

Derzeitige Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Stromsystems bilden die Möglichkeiten und Nutzen der WSK und deren Rückwirkungen auf das Gesamtsystem und die HPFC's nur eingeschränkt ab. So haben z. B. vorangegangene Analysen des DLR gezeigt, dass WSK's insbesondere im Zusammenhang mit der gleichzeitigen Nutzung der gespeicherten Hochtemperaturwärme in KWK positive Effekte und wirtschaftlichen Nutzen erbringen können. Rückwirkungen auf das Gesamtsystem durch flächenverbreitende

Nutzung von WSK blieben dabei bisher unberücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein erster Schritt zur Modellierung von WSK in Fundamentalmodellen gegangen. Dadurch konnte der gesamtsystemische Nutzen und Rückwirkungen von großflächiger Nutzung von WSK auf die HPFC's analysiert werden.

Aufgabenstellung und Modellierung

In diesem Projekt zur industriellen Dekarbonisierung wurden zunächst Strompreis-

kurven, also HPFC's, basierend auf einem Best-Guess-Szenario (vgl. Abbildung 4) für die Jahre 2023 bis 2045 für herkömmliche Wirtschaftlichkeitsanalysen verwendet. Relevant für die Betrachtungen im Hinblick auf verschiedene Flexibilitätsoptionen sind neben der absoluten Höhe der Stundenpreise die zeitliche Verteilung ihrer Variation. Daneben wurden eine Reihe von weiteren relevanten Marktparametern für künftige Energiesysteme wie CO₂ Be- preisung, Entwicklung der H₂ Preise sowie die Preise anderer alternativer Erneuerba-

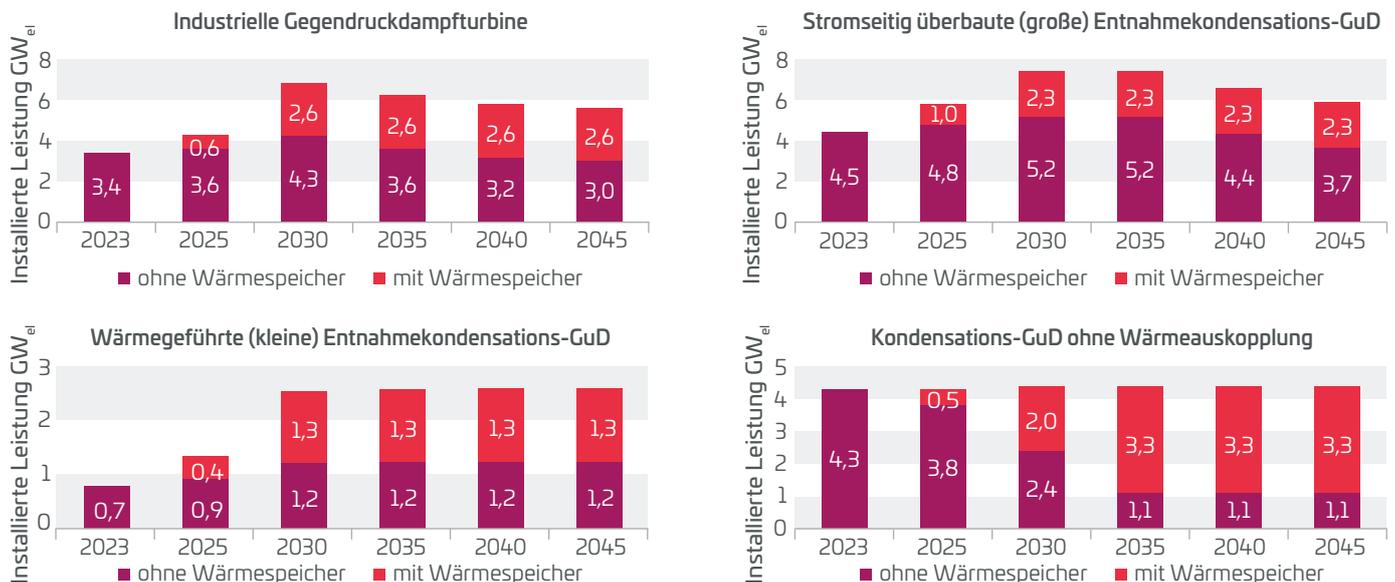


Abb. 5 | Hochlauf der WSK in Deutschland nach Technologieoptionen, Quelle: r2b

rer Energieträger mit betrachtet. Unter den getroffenen Annahmen konnte standortbezogen ein wirtschaftlicher Einsatz der WSK-Technologie festgestellt werden. Weiterführend ergab sich deswegen die Fragestellung nach einem umfassenderen Einsatz der WSK im deutschen Energiesystem. In einem Umfeld starken Ausbaus der Erneuerbarer Energien war zu klären, ob und inwieweit die Technologie positive Einflüsse auf die Residuallastdeckung haben kann.

Abbildung 4 zeigt das verwendete Best-Guess Szenario, welches im Folgenden weiterverarbeitet wurde.

Im Hinblick auf die Analyse gesamtsystemischer Zusatznutzen wurden in der vorliegenden Analyse die WSK in das oben dargestellte Szenario integriert und deren systemische Auswirkungen auf das Gesamtsystem, insbesondere auf die HPFC, untersucht. Hierzu sind folgende zusätzliche Technologieoptionen in das Modell SESAM implementiert worden:

- Dampfkraftwerke zur industriellen Strom- und Wärmeversorgung mit WSK
- mittelgroße öffentliche Heizkraftwerke, wärmegeführt in KWK zur Deckung des kommunalen Fernwärmebedarfs (typi-

sche mittlere Stadtwerke) mit WSK

- große Heizkraftwerke zur Stromversorgung mit anteilig kleiner Wärmeauskopplung zur Fernwärmedeckung (große EVU Gaskraftwerke) mit WSK
- große GuD Kraftwerke ohne nennenswerte Wärmeauskopplung (typisch EVU Großkraftwerke) mit WSK

Zur Abbildung der WSK im Energiesystemmodell SESAM mussten unterschiedliche Modellerweiterungen umgesetzt und dafür Parametrierungen vorgegeben werden. Einerseits wurden dem Modell Entwicklungen für den Hochlauf der WSK in den jeweiligen o.g. Segmenten vorgegeben (vgl. Abbildung 5). Dies ist eine vereinfachende Annahme, könnte aber in weiteren Analysen verallgemeinert werden.

Ebenso wurden allen Segmenten mit Wärmebedarfsdeckung eigene stündliche Wärmelastprofile vorgegeben, welche durch die WSK gedeckt werden müssen. Andererseits waren die technischen Charakteristika der WSK auf sinnvoller Aggregationsstufe vorzugeben. Dafür wurden für jeden Teil des WSK-Prozesses (elektrische und brennstoffbasierte Wärmeerzeugung, Ein-/Auspeicherung der Wärme, Dampferzeugung/Rückverstromung (Dampftur-

bine und ggf. Gasturbine) Wirkungsgrade ermittelt. Darüber hinaus wurden sinnvolle Vorgaben zur Dimensionierung der WSK (z. B. Speichervolumen, Größe des E-Heizers im Verhältnis zur Gesamtanlage) für die einzelnen Nutzungsfälle analysiert und vorgegeben. Alle Parameter wurden in die Modellierung integriert. Im Anschluss an die durchgeführten Berechnungen wurden die Auswirkungen auf das Gesamtsystem sowie auf die einzelnen HPFC's mit den Ergebnissen der Modellierung ohne WSK verglichen. Die Ergebnisse im Vergleich zum vorherigen Szenario ohne WSK geben Aufschluss über die Auswirkungen von WSK auf das Gesamtsystem.

Abbildung 6 zeigt schematisch die modelltechnische Umsetzung der WSK in das Energiesystemmodell SESAM.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

EE-Anteile im Stromsystem größer 70 % des jährlichen Stromverbrauches stellen eine Herausforderung für das Energiesystem dar und bringen Energiespeicherung in den Fokus. Gleichzeitig stellten sich auf standortspezifischer Ebene die Frage, wie zukünftig der lokale Energiebedarf jederzeit dekarbonisiert und mit sehr hohem EE-Anteil gedeckt wird. Das Projekt zeigte, dass WSK hierzu einen wichtigen Beitrag leisten können. Erste signifikante Effekte können schon ab 65-70 % EE-Anteil identifiziert werden, ab dem Jahr 2040 mit EE-Anteilen von ca. 90 % wurde Folgendes festgestellt:

- **Reduktion der EE-Abregelung im Stromsystem**, ab dem Jahr 2040 konnten die EE-Abregelungen um 15-20 % reduziert werden
- **Kostengünstige Flexibilisierung der Energieversorgung an KWK-Standorten** durch Nutzung von Bestandsinfrastruktur
- Vergleichsweise **großer Nutzen bei der industriellen Wärmeversorgung I-EE-KWK**
- Jederzeit **sichere Leistung in voller Höhe der installierten Leistung bei minimalem Erneuerbaren Brennstoffeinsatz**, begrenzt auf Zeiten ohne Erneuerbare und leere Speicher bei gleichzeitiger **erneuerbarer Versorgung**

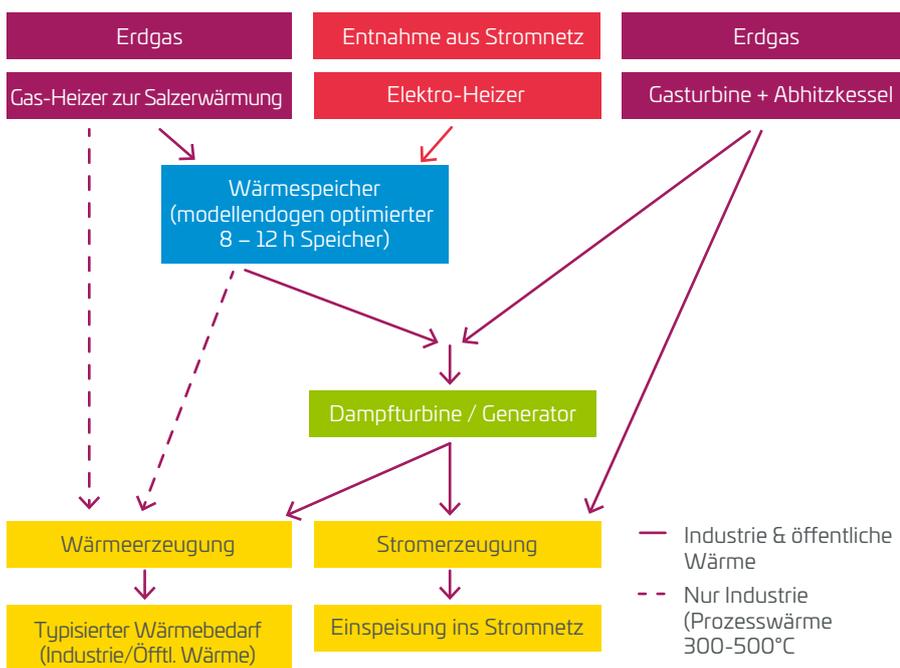


Abb. 6 | Schematische Darstellung der Modellierung von WSK im SESAM, Quelle: r2b

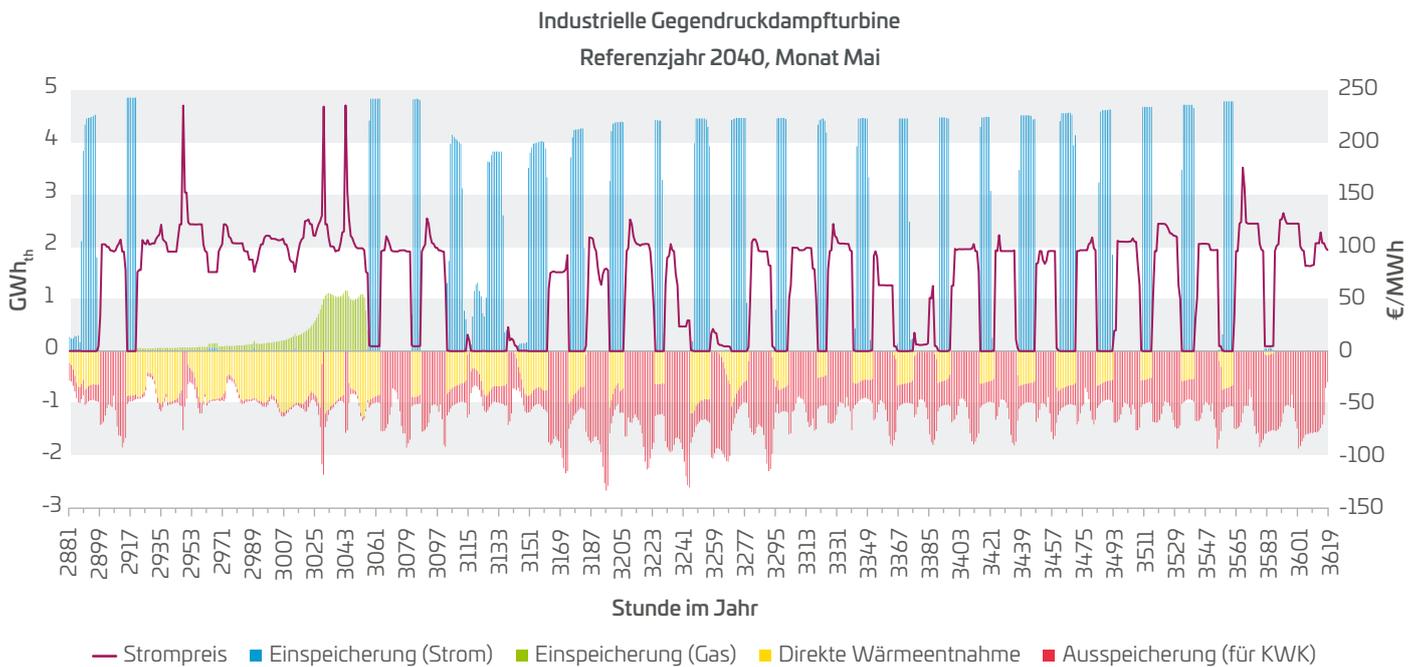


Abb. 7 | Speicherzyklen im Referenzjahr 2040 für den Monat Mai, Quelle: r2b

des Wärmebedarfs mit maximaler Flexibilität

- **Aufrechterhaltung von Bestandskraftwerksleistung:** (steuerbare Leistung & Regelleistung) und Einsatz in Zeiten von Knappheiten am Strommarkt (z. B. Dunkelflaute) bei gleichzeitiger Absicherung der Energieversorgung am Standort (Netzausfälle etc.)
- **Einsparung von Brennstoffen** (insbesondere von wertvollem H₂)
- **Reduktion der Strompreise**, ab 2040 ca. 5 % geringer im Vergleich zu Szenario ohne WSKs
- **Weiterführende Nutzen** z. B. im Bereich der Netzstabilität sind zu erwarten, sind jedoch in diesem Rahmen noch nicht untersucht worden

Die oben dargestellten systemischen Nutzen ergeben sich durch die unterjährige (strompreisbasierte) Fahrweise des WSK. Folgende Grafik zeigt exemplarisch für den Monat Mai 2040 die Fahrweise des thermischen Speichers an einem Industriestandort. Die strombasierte Einspeicherung von Wärme in den Wärmespeicher findet zu Zeiten geringer

Strompreise statt (blau ab Stunde 3056). Es ist sogar eine direkte Wärmeentnahme (gelb) sowie eine Rückverstromung über die Dampfturbine mit Wärmeauskopplung möglich (rot). In Zeiten hoher Strompreise größer 100 €/MWh (also Zeiten geringer Verfügbarkeit der Erneuerbaren Energien) weicht das WSK auf brennstoffbasierte (Gas) Wärmeerzeugung (grün) aus. In Summe wird sichergestellt, dass der stündliche Energiebedarf jederzeit bereitgestellt wird.

Ähnliche Ergebnisse konnten auch im Rahmen anderer Untersuchungen der DLR WSK Gruppe für die Energieversorgung von einzelnen Industriestandorten gefunden werden. Aufgabenstellung war hierbei eine möglichst autarke Versorgung des Standortes mit Erneuerbarer Energie aus einem standortnahen Portfolio verschiedener Wind- und Solarparks unter Einbindung verschiedener Speicheroptionen (Batteriespeicher, Wasserstoffelektrolyse mit Brennstoffzelle) sowie die Abdeckung von industriellen Wärmebedarfen.

Eine ausführliche, weiterführende Literaturliste ist bei den Autoren erhältlich. ♣



©Gerrit Koll

Gerrit Koll
Leiter WSK Gruppe

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Gerrit.Koll@dlr.de



©Martin Lienert

Martin Lienert
Partner

r2b energy consulting GmbH
martin.lienert@r2b-energy.com