LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND (LFS4)

Vorstellung Kurzszenarien | 18.11.2025

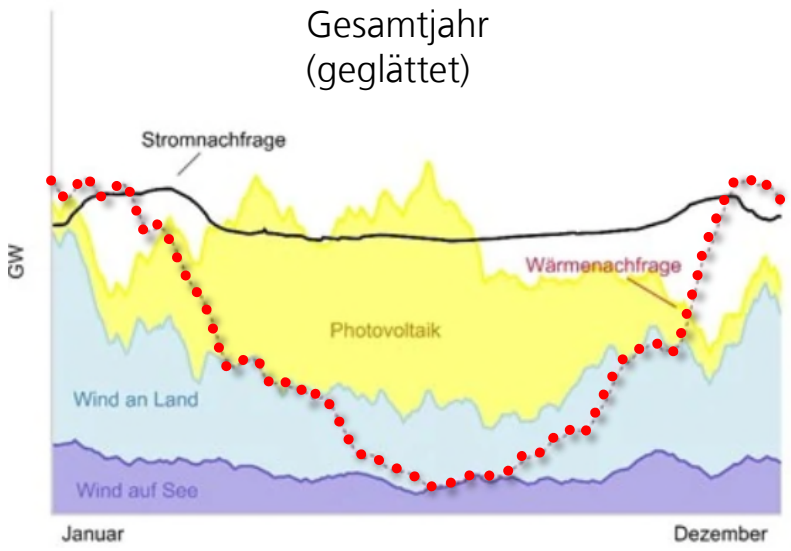
Saisonale Wärmespeicher

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher

- Motivation & Ausgangslage
- Zielsetzung & Fragestellungen
- Methodik & Szenariodesign
- Ergebnisse
- Schlussfolgerungen

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher



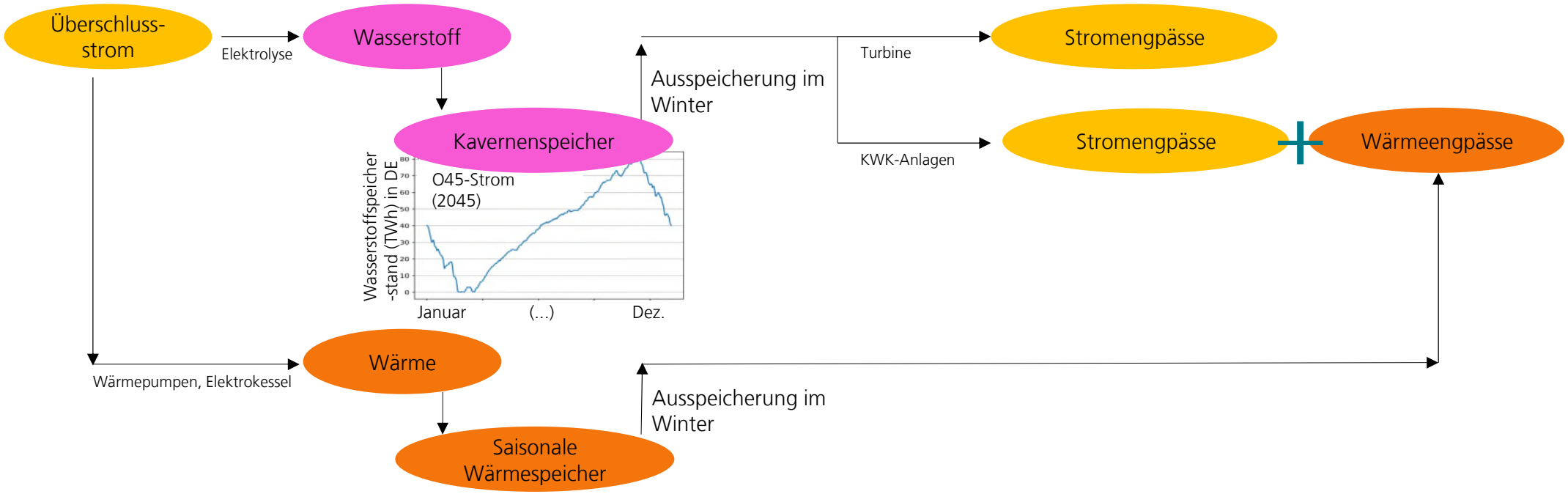
Stilisierte Darstellung der fluktuierenden Erzeugung und Nachfrage von Strom (PV, Wind) und Wärme aus [1] basierend auf skalierten historischen Zeitreihen (kein optimiertes Modellszenario)

- Motivation
  - **Wärmenachfrage** im Jahresverlauf: Saisonale Speicher zur Verschiebung der erzeugten Wärme in den Winter mit **erhöhtem** Wärmebedarf
  - **Flexible Sektorenkopplung:** Durch die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeerzeugung, insbesondere mit Wärmepumpen, dienen Wärmespeicher auch der Flexibilisierung der Stromnachfrage. Sie ermöglichen es, den Stromverbrauch der Wärmepumpen so zeitlich zu verschieben, dass Stunden mit viel Überschussstrom (günstig) zur Wärmeerzeugung genutzt werden können, anstatt diesen abzuregeln.
  - **Abwärmenutzung**: Saisonale Wärmespeicher ermöglichen die Integration von Abwärme (insbesondere aus Industrieprozessen) in Wärmenetze
  - **Integration erneuerbarer Wärmeerzeugung**: überschüssige Wärme aus erneuerbaren Energiequellen (Geothermie, Solarthermie) kann gespeichert werden und bei Bedarf (zeitlich versetzt) an die Verbraucher abgegeben werden. Dies ermöglicht eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energien und eine verbesserte Flexibilität im Wärmesystem.

[1] Schill et al. (2025): Hintergrund: Welche Rolle spielen Speicher in der Energiewende? [online] https://ariadneprojekt.de/publikation/hintergrund-welche-rolle-spielen-speicher-in-der-energiewende/

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher

- Ausgangslage (in Enertile)
  - Saisonale Speicherung in den Langfristszenarien bisher nur über Wasserstoffspeicher möglich

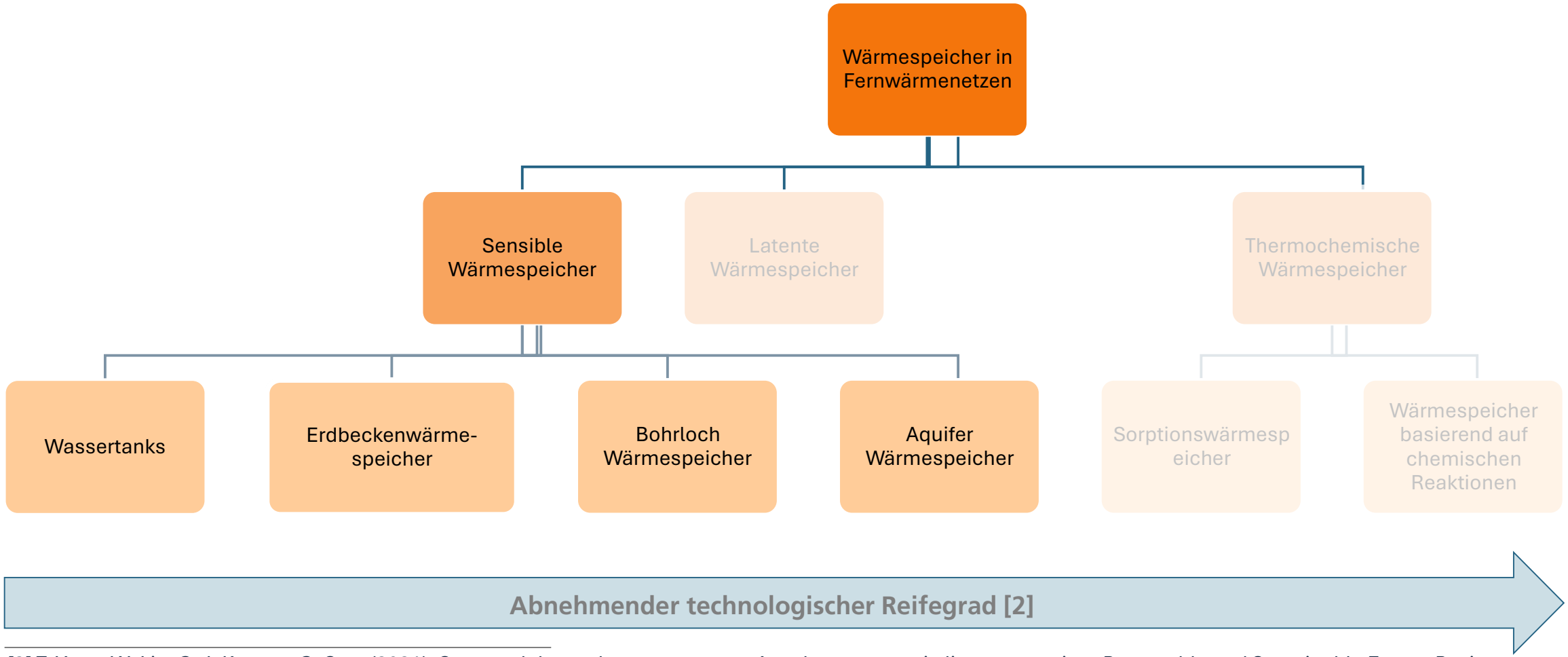


  - Saisonale Wärmenachfrage kann alternativ direkt aus **großskaligen, saisonalen Wärmespeichern** gedeckt werden → diese Technologieoption ist bisher nicht in Enertile enthalten (bzw. nur indirekt über viele kleine Tanks)

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher

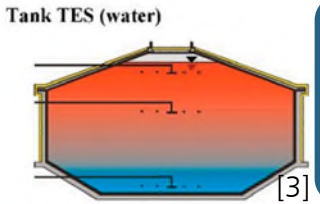
- Zielsetzung & Fragestellungen
  - Welche Speichertechnologie eignet sich für die saisonale Speicherung von Wärme?
  - Integration saisonaler Wärmespeicher in Optimierungsmodell Enertile
  - Fragestellungen:
    - Sind saisonale Wärmespeicher Teil einer kostenoptimalen Lösung?
    - Wie hoch ist das auszubauende Speichervolumen? Relevante Größenordnung für Aufnahme in Hauptszenarien?
    - Was sind die Auswirkungen auf das Gesamtsystem?
    - Wie sieht ein optimaler Betrieb saisonaler Wärmespeicher aus?

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Technologieoptionen



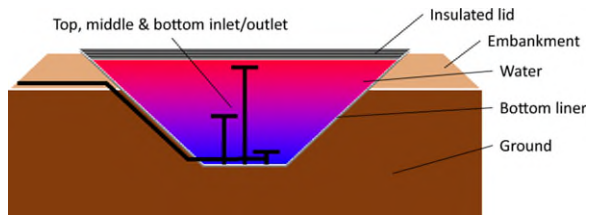
[2] T. Yang, W. Liu, G. J. Kramer, Q. Sun (2021): Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110732

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Technologieoptionen



Wassertanks

- Gut isolierte Behälter aus Metall oder Beton
- Speichermedium: Wasser
- Aktueller Stand: ~60 (kleinere) Tankspeicher aktuell in Deutschland (Speicherdauer: **Tage bis Wochen**)
- Zur **saisonalen** Speicherung:
  - neue techno-ökonomische Parametrierung für großskalige Tanks
  - prinzipiell ökonomisch weniger zur saisonalen Speicherung geeignet als Erdbeckenwärmespeicher



Erdbeckenwärme-speicher

- Grube (Oberfläche auf Bodenniveau) mit einer Kunststoffabdichtungsbahn ausgekleidet, wärmegedämmten Abdeckung
- Speichermedium: Wasser oder einem Kies-Wasser-Gemisch befüllt
- Aktueller Stand: Vier kleinere Grubenspeicher, ein großer für saisonale Speicherung (Meldorf, 43.000m^3) in Deutschland in Betrieb, in Dänemark und Schweden weiter verbreitet
- Größe: Erdbeckenspeicher haben eine Tiefe von 5-15 Metern. Die Größenordnung derzeit realisierter Erdbeckenspeicher liegt zwischen 1 500m^3 und 230 000m^3 (Vojens, Dänemark)

[3] T. Hua et al. (2023): Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials, Journal of Energy Storage, https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107378

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Technologieoptionen

	Wassertanks	Erdbeckenwärmespeicher (im folgenden „PTES“)
	Reuter West (Berlin), Deutschlands größter Wassertank	**Fig. 1.** Aerial view of the PTES and solar collector field in Dronninglund.
Vorteile	+ gute Betriebseigenschaften (Be- und Entladeleistung) + Geringere Grundfläche als Erdbeckenspeicher (↑ Höhe)	+ gute Betriebseigenschaften (Be- und Entladeleistung) + einfache Bauweise + sehr große Speichervolumen möglich + niedrige Investitionskosten
Heraus-forde-rungen	- Hohe Baukosten - Begrenzte Größe (< 100.000m³)	- Möglichst kein hoher Grundwasserstand (sonst weitere Abdichtung an Seitenwänden und unten notwendig → erhöhte Investitionskosten) - Platzbedarf (Tiefe nur bis 18m)

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Techno-ökonomische Parametrierung

Status	Technologie	Investment (€/kWh)	Lebensdauer (a)	Stündliche Verlustrate	O&M fix (€/MWh)	Quelle
In O45 Szenarien enthalten	Tankspeicher (100m³)	22,2	20	0	0	*Mittlere Größenklasse, Tabellenblatt „141 Large hot water tank“ und „142 Small scale hot water tank“ in [4]*
Neu	Tankspeicher (3000m³)	3	40	0,00007738	8,8069	*3000m³ Speicher, Tabellenblatt „141 Large hot water tank“ in [5]*
Neu	PTES	0,9	30	0,0000606	2,5	*70.000m³ Speicher, Tabellenblatt „140 PTES seasonal“ in* [5]
Neu	PTES (Sensitivität)	0,48 (untere Grenze)	25	0,0000606	3,07216	*70.000m³ Speicher, Tabellenblatt „140 PTES seasonal“ in* [4]

[4] Technology Data for Energy Storage. Danish Energy Agency (Hrsg.), Version 8, „Datasheet for energy storage“.
[5] Technology Data for Energy Storage. Danish Energy Agency (Hrsg.), Version 9 (Update am Feb. 2025), „Datasheet for energy storage“. [Online] https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-energy-storage, Zul. geprüft: 26.06.2025

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Vergleich der Speichertechnologien

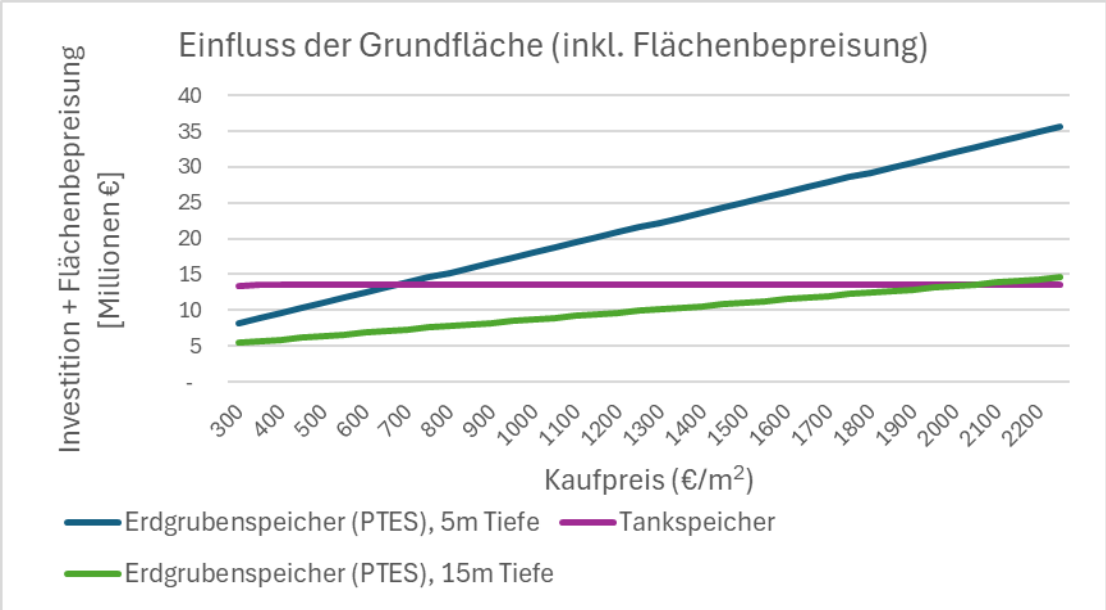
Techno-ökonomische Parameter (vgl. Folie 9)

- Optimierungsmodell wählt aus den beiden Technologien (Erdgrubenspeicher vs. Wasserstanks) immer Erdgrubenspeicher
- Grund: die zugrundeliegende techno-ökonomische Parametrierung der Speicheroptionen
- U.a. der erhöhte Flächenbedarf der Erdgrubenspeicher kann gerade im urbanen Raum je nach örtlichen Gegebenheiten ein Hindernis darstellen

Einflussfaktoren für Technologiewahl, die teilweise nicht in Enertile abbildbar sind:

- Grundwasserstand vor Ort (limitiert Bautiefe des Erdgrubenspeichers und kann Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum Wassertank beeinflussen (siehe Abbildung rechts)
- Flächenverfügbarkeit (Bebauung, weitere geologische Voraussetzungen, Wasser- und Naturschutz)

→ Der reine Ausbau von Erdgrubenspeichern im Modell bedeutet nicht, dass in der Realität nur diese Technologien geeignet ist.
Je nach Standort unterschiedliche Eignung



Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Szenariodesign

Methodik

- Erweitertes Energiesystemmodell Enertile
- Szenarienbasierte Analyse von saisonalen Wärmespeichern

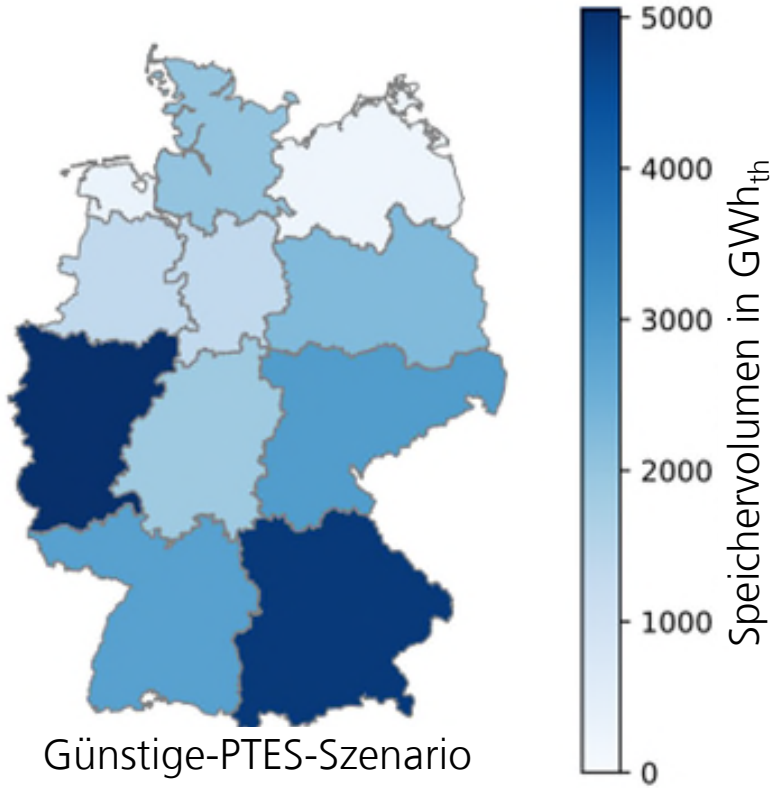
Status	Technologie	Szenario
In O45 Szenarien enthalten	Tankspeicher (100m³)	Referenz-Szenario (=O45-Strom als Stützjahr)
Neu	Tankspeicher (3000m³)	Tank-Szenario
Neu	PTES	PTES-Szenario
Neu (Sensitivität)	PTES (günstiger)	Günstige-PTES

Auf folgenden Folien zur besseren Übersicht größtenteils die Ergebnisse aus den beiden Randszenarien gezeigt[1]

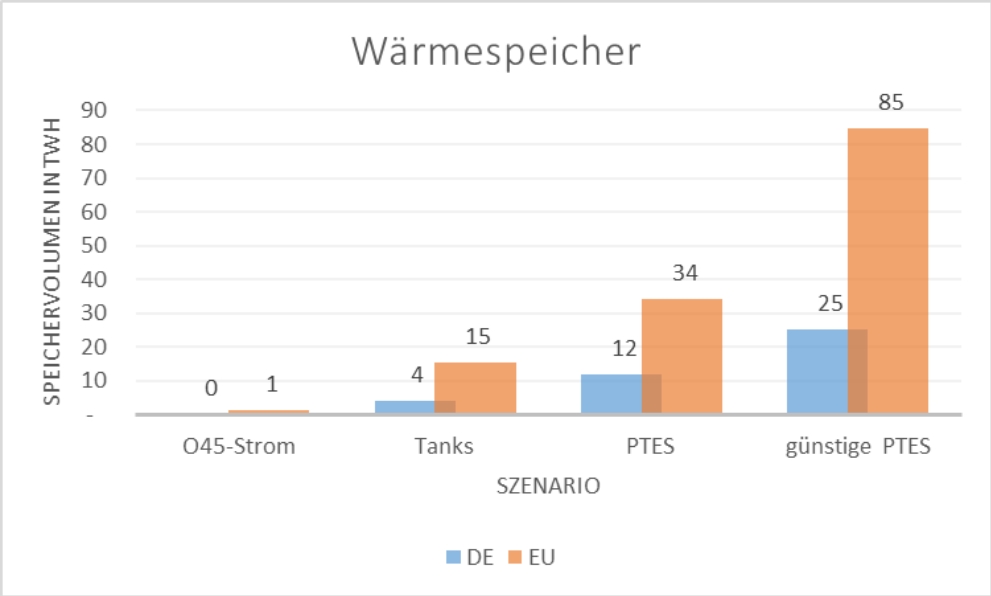
1: Ergebnisse des Tank-Szenarios und des PTES-Szenarios i.A. analog (nur in geringerer Ausprägung als im Günstige-PTES Szenario)

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Ergebnisse

Sind Wärmespeicher Teil einer kostenoptimalen Lösung?



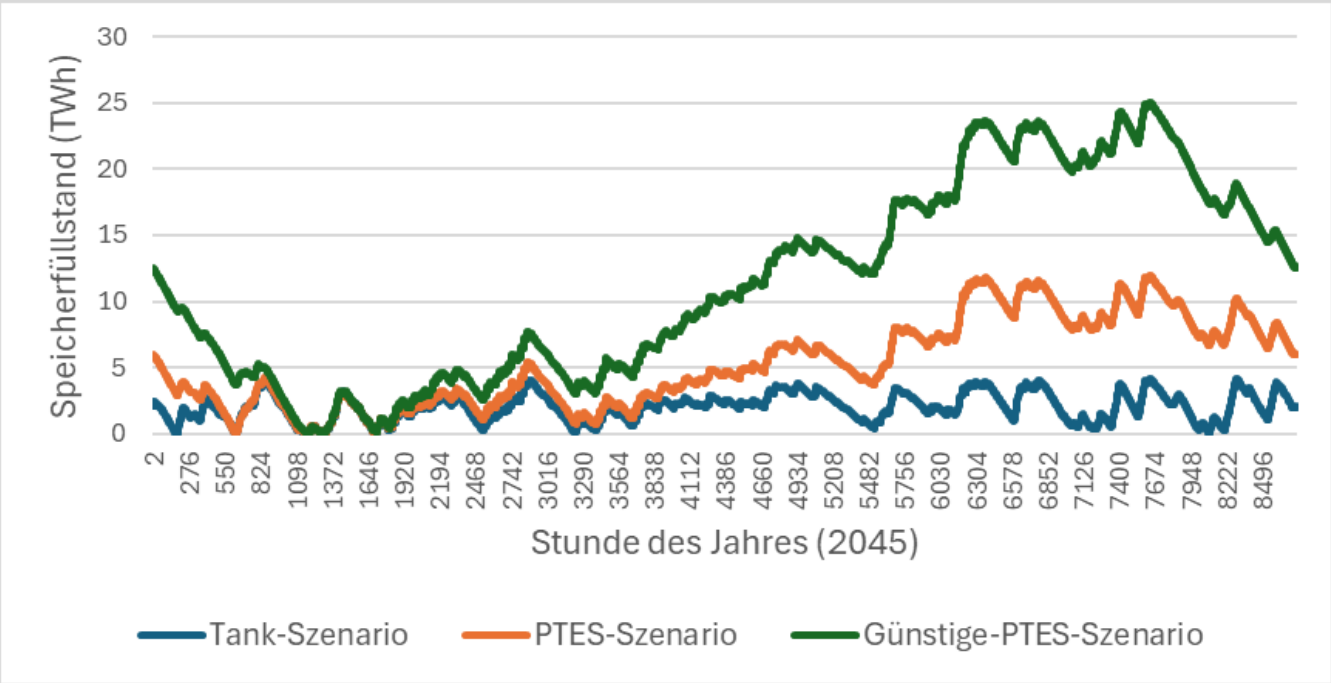
Günstige-PTES-Szenario



- Ausgebautes Speichervolumen liegt zw. 8% (DE3) und 27% (DE11) der Wärmenachfrage in Wärmenetzen
- Ausbau der Speicher ist abhängig von der Erzeugungsstruktur im Wärmenetz sowie der Saisonalität der Stromerzeugung in den Modellregionen

→ Implikationen für Hauptszenarien: Relevante Größenordnung für Aufnahme in Hauptszenarien

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Dispatch

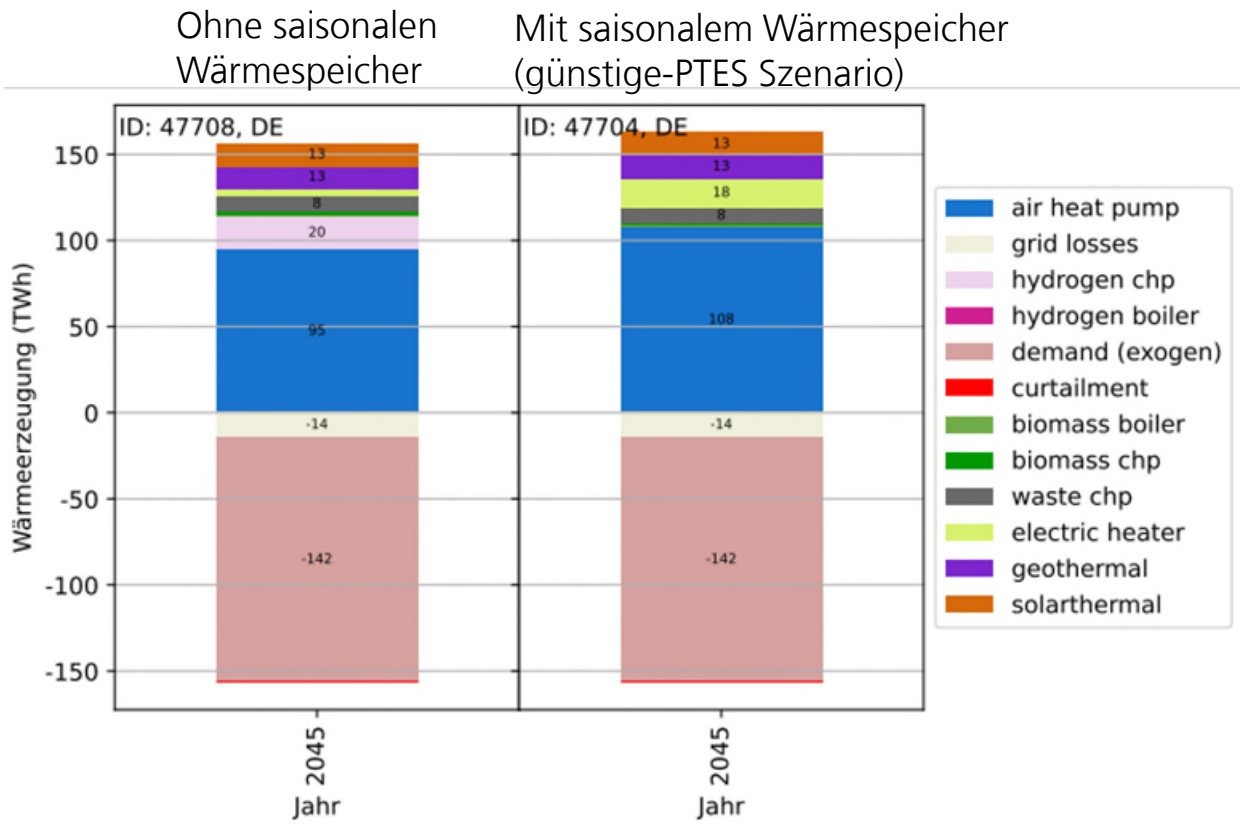


Zyklenzahl		
Tank-Szenario	PTES-Szenario	Günstige-PTES
20,9	7,1	3,7

Erdbeckenspeicher (PTES) werden sowohl als eine kurzfristige als auch eine langfristige (saisonale) Flexibilitätsfunktion eingesetzt.
Tankspeicher werden im Modell mit wesentlich mehr Ladezyklen eingesetzt, doch eine durchgängige Beladung der Speicher im Sommer ist auch hier ersichtlich.

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Ergebnisse: Wärmenetze

- Wärmeerzeugung in Deutschland

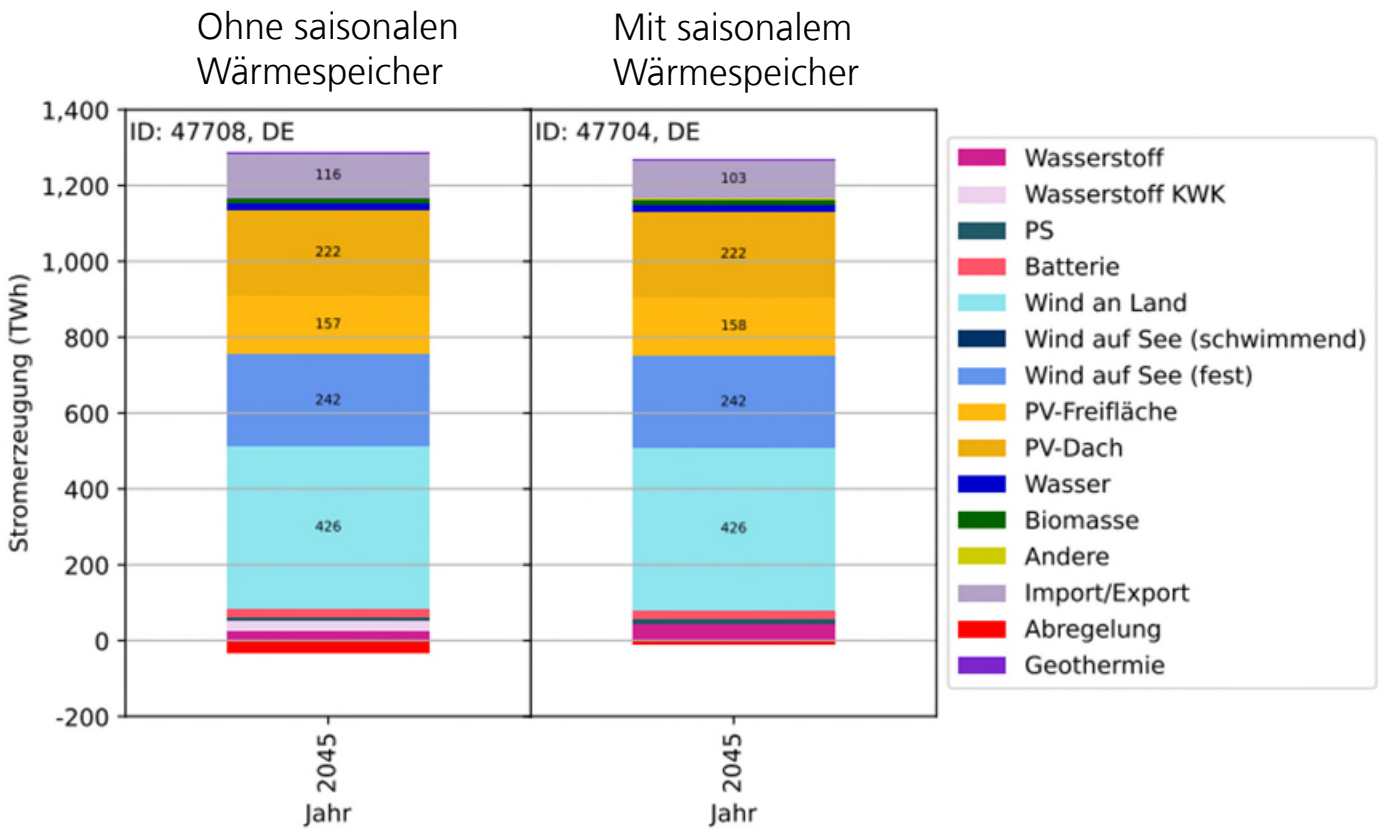


- Elektrifizierung der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen
  - Zunahme
    Großwärmepumpen: + 13 TWh
    Elektrokessel: + 13 TWh
  - Rückgang
    Wasserstoff-KWK: -20 TWh
- Analoges Verhalten in Sensitivitäten, geringere Ausprägung
- Analoges Verhalten in EU

→ **Schlussfolgerung**:
Saisonale Wärmespeicher könnten zukünftig helfen einen größeren Anteil strombasierter Wärmeerzeugung zu integrieren. Wasserstoff-KWK Anlagen werden dadurch verdrängt.

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Ergebnisse

- Stromerzeugung in Deutschland

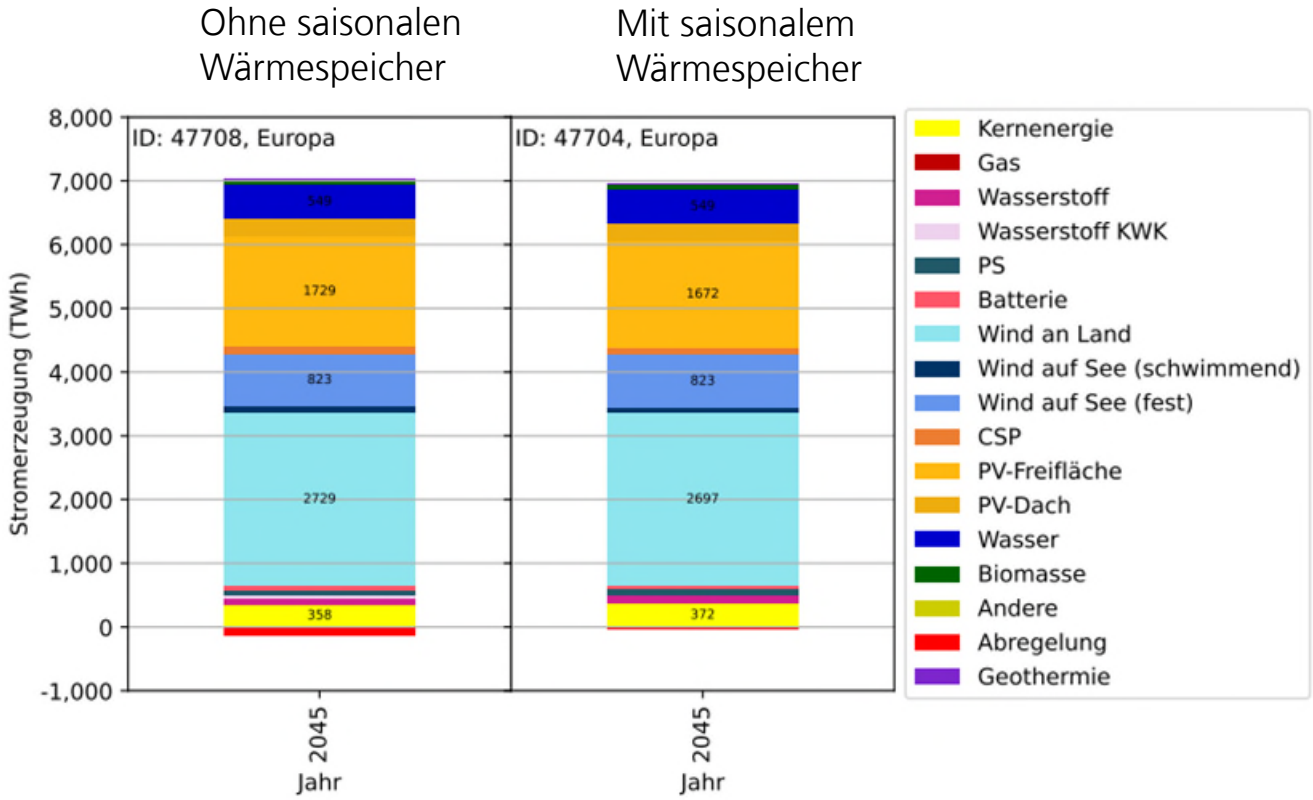


- Erzeugung durch Wind und PV in vergleichbarer Größenordnung
- Rückgang der Abregelung (-23 TWh in DE)
- Rückgang der Importe (-13 TWh)
- Verschiebung von Wasserstoff-KWK hin zu reiner Stromerzeugung

→ **Schlussfolgerung**:
Saisonale Wärmespeicher könnten zukünftig helfen (kostengünstigen, sonst abgeregelten) Überschussstrom effizient zu nutzen.

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Ergebnisse

- Stromerzeugung in Europa

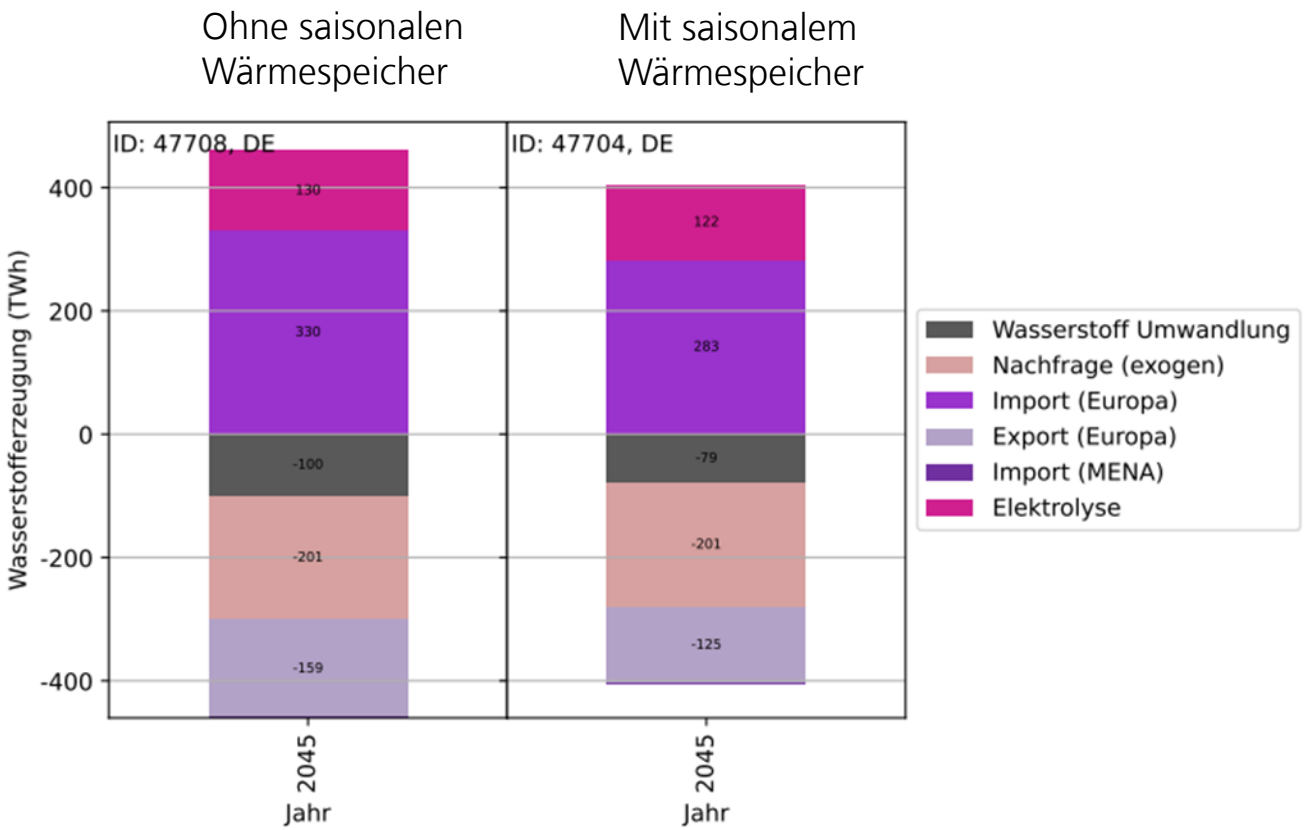


- Vergleichbare Größenordnungen zwischen den Szenarien
  - Leichter Rückgang der Freiflächen-PV und von Wind an Land
  - Erhöhte Erzeugung aus Kernenergie (Frankreich und GB)

→ **Schlussfolgerung:**
Grundlastkraftwerke haben mehr Platz im System, wenn Stromspitzen wärmeseitig gespeichert (und dort zeitlich versetzt) genutzt werden.

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Ergebnisse

- Wasserstofferzeugung

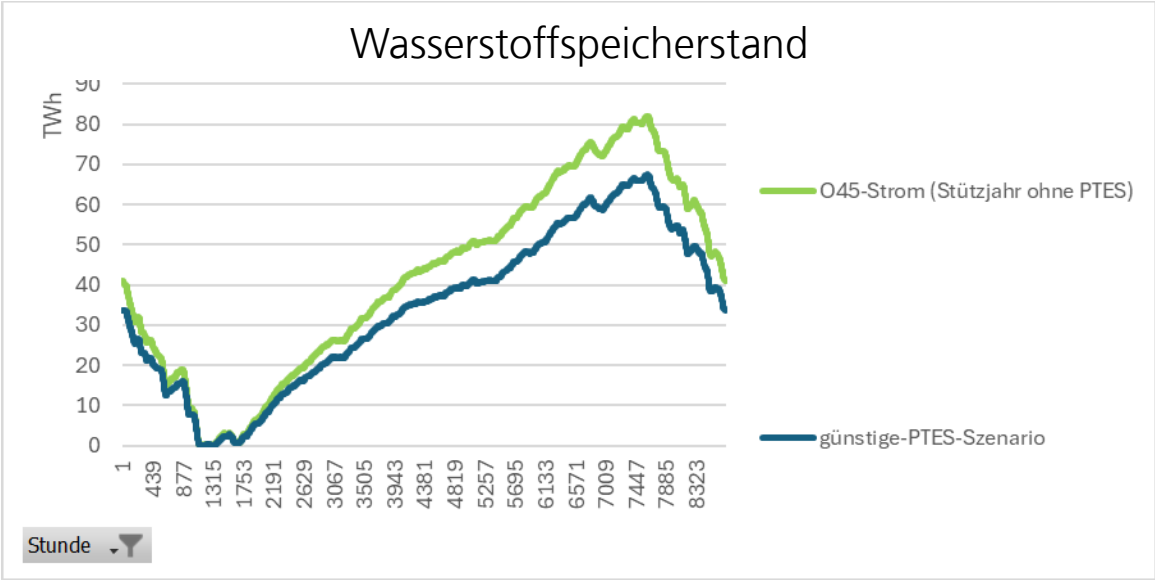


- Geringerer Bedarf im Umwandlungssektor (viel-PTES-Szenario)
  - Weniger Elektrolyse (DE: -8 TWh, EU -42 TWh)
  - Weniger Importe aus Europa (DE: -47 TWh)
  - Rückgang der benötigten Wasserstoffspeicher um bis zu 18 %

→ **Schlussfolgerung:**
Wasserstoffsystem spielt weiterhin eine entscheidende Rolle im Energiesystem, ein Teil der saisonalen Flexibilitätsfunktion kann jedoch durch Erdbeckenspeicher ersetzt werden

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher Dispatch

Was sind Auswirkungen auf Wasserstoffspeicher?



- Saisonaler Einsatz des Wasserstoffspeichers bleibt bestehen
- Reduktion der Wasserstoffmenge im Umwandlungssektor (KWK-Anlagen) reduziert den Bedarf an Wasserstoffspeichern:
  - Tank-Szenario: -13,6%
  - PTES-Szenario: -14%
  - Günstige-PTES-Szenario:-18%

Kurzszenario: Saisonale Wärmespeicher

- Zusammenfassung
  - Saisonale Speicher sind Teil einer kostenoptimalen Lösung
  - Technologieoptionen:
    - Erdbeckenspeicher eignen sich zur saisonalen Speicherung von Wärme, Einschränkungen sind hier stabile Bodenverhältnisse, Grundwasserstand und Flächenverfügbarkeit
    - Tankspeicher werden derzeit überwiegend als Kurzzeitspeicher eingesetzt, können jedoch – wie das Beispiel des Wärmespeichers Reuter West in Berlin zeigt – auch in größeren Dimensionen als saisonale Speicher genutzt werden.
    - Weitere Optionen (Aquiferspeicher, Bohrlochspeicher, latente oder thermo-chemische Speicher) unterliegen stärkeren geologischen Restriktionen oder sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium

  - Saisonale Wärmespeicher helfen einen größeren Anteil strombasierter Wärmeerzeugung in Wärmenetze zu integrieren. Wasserstoff-KWK Anlagen werden dadurch aus den Wärmenetzen verdrängt.
  - Durch den schwindenden Einsatz von Wasserstoff zur Wärmeerzeugung im Winter reduziert sich der Bedarf an Wasserstoffspeichern ebenso.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.