



Techno-ökonomischer Vergleich von Druckluft- und Wasserstoff-basierten Speicherkraftwerkskonzepten

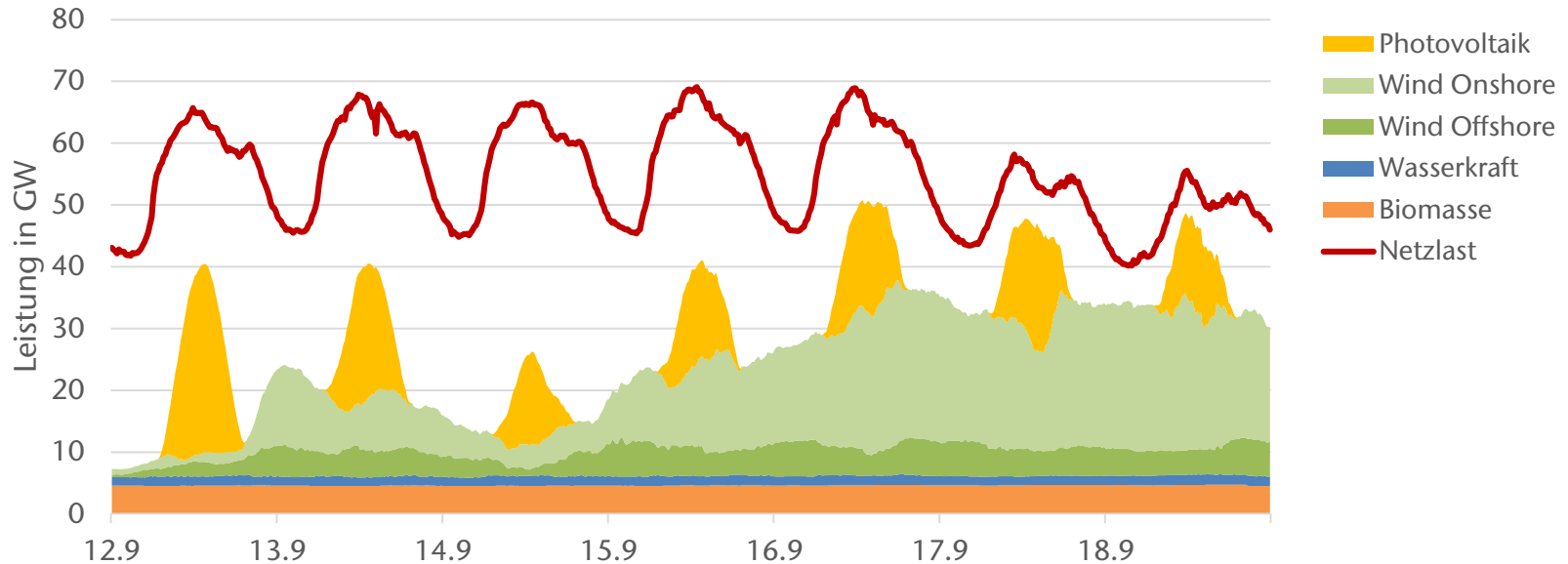
Ann-Kathrin Klaas

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal

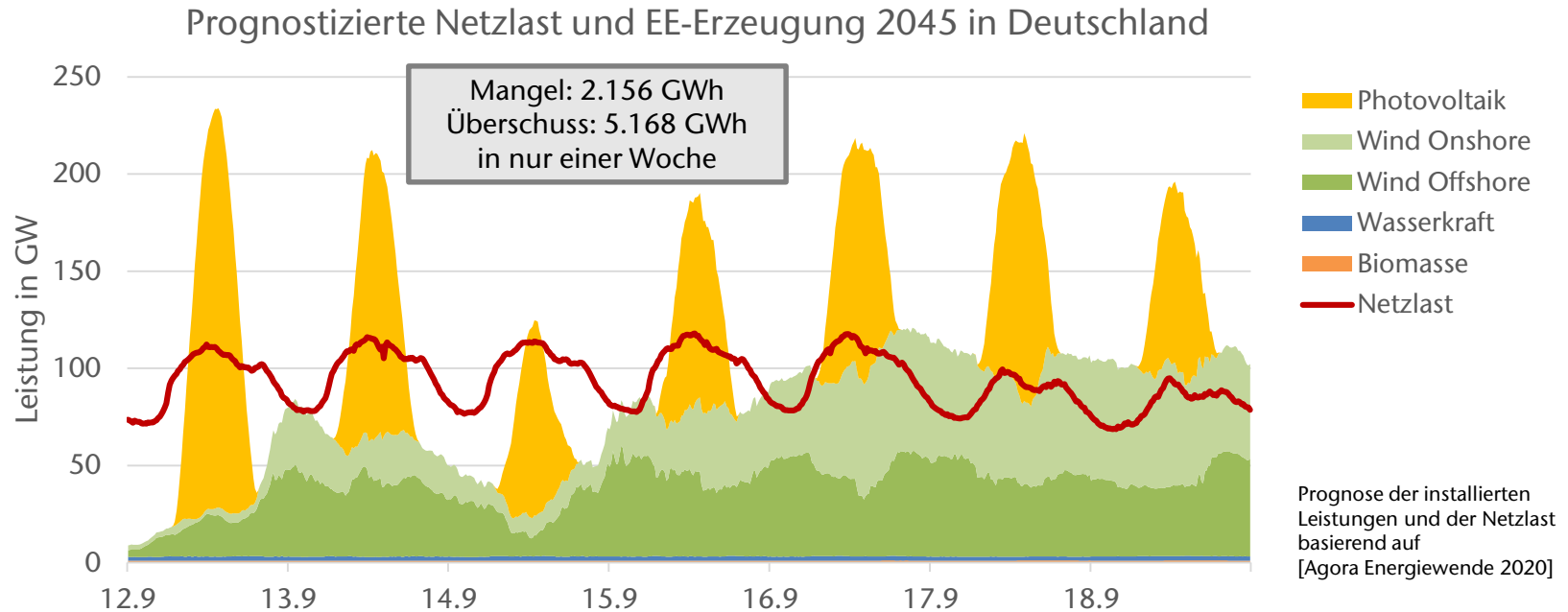
6. Herbstworkshop Energiespeichersysteme am 30.11.2022

Zukünftiger Speicherbedarf?

Reale Netzlast und EE-Erzeugung 2022 in Deutschland



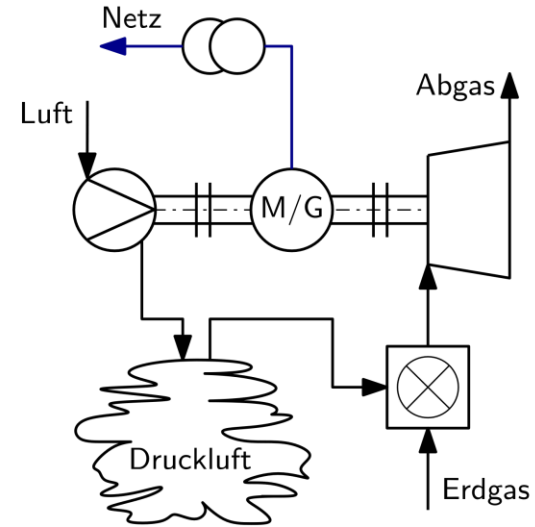
Zukünftiger Speicherbedarf!



Druckluftspeicherwerk

- Engl.: Compressed Air Energy Storage (CAES)
- Motorbetrieb: Verdichtung von Umgebungsluft auf ca. 70 bar
- Speicherung in untertägigen Salzkavernen
- Generatorbetrieb: Erdgasturbine
- Weltweit nur zwei Druckluftspeicherwerke in Betrieb (Huntorf, DE und McIntosh, USA)

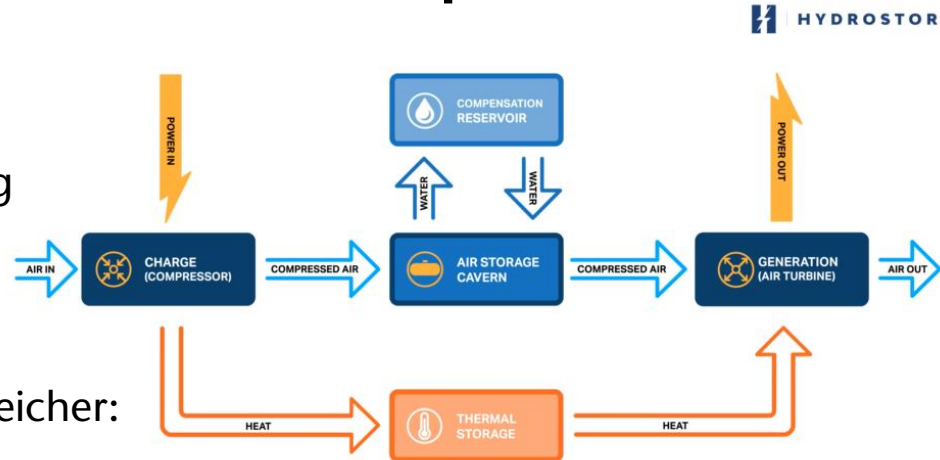
- Vorteile: Bewährtes Kraftwerkskonzept und hohe Speicherkapazität
- Nachteil: CO₂-Emissionen



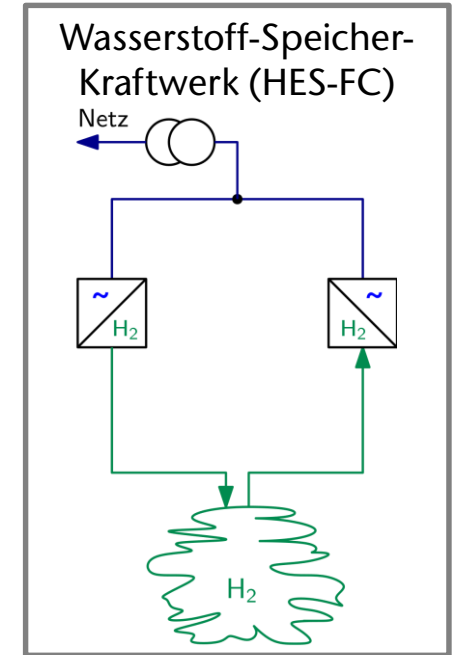
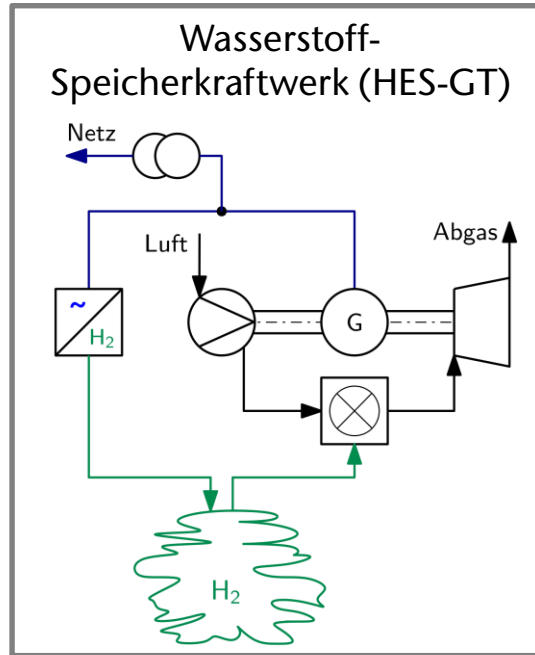
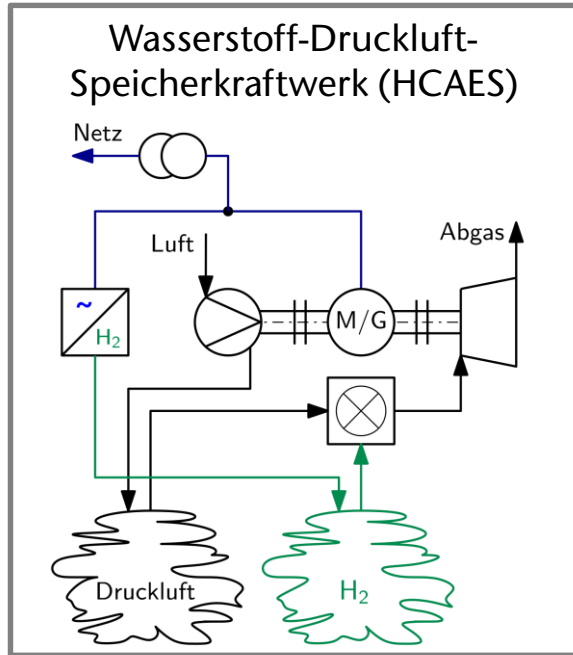
Weiterentwicklungen des CAES-Konzepts

Adiabates Druckluftspeicherkraftwerk

- Speicherung der Abwärme der Kompression zur späteren Nutzung bei der Expansion
- Kein Erdgasbedarf → keine CO₂-Emissionen
- Hohe Anforderungen an Wärmespeicher: Druck, Temperaturen, Zyklen
- Demonstrationsanlage in Deutschland (Projekt ADELE) 2013 wegen fehlender Marktperspektiven gescheitert
- Demonstrationsanlagen der Firma Hydrostor in Kanada und „Advanced“ CAES in China



Weiterentwicklungen des CAES-Konzepts



Speicherkraftwerkskonzepte

Abk.	Beschreibung	Speichermedium	Rückverstromung
CAES	Druckluftspeicherkraftwerk	Druckluft	Erdgasturbine
ACAES	Adiabates Druckluftspeicherkraftwerk	Druckluft und Wärme	Expansionsturbine
HCAES	Wasserstoff- Druckluftspeicherkraftwerk	Druckluft und Wasserstoff	Wasserstoffturbine
HES-GT	Wasserstoff-Speicherkraftwerk	Wasserstoff	Wasserstoffturbine
HES-FC	Wasserstoff-Speicherkraftwerk	Wasserstoff	Brennstoffzelle

Kriterien für den Vergleich

Quantitative Kriterien

Qualitative Kriterien

Speicher-
kapazität

Speicher-
wirkungs-
grad

Spezifische
Investitions-
kosten

Technology
readiness
level

System-
dienst-
leistungen

Emissionen

Speicher-
verluste

Thermodynamische
Berechnungen

Literatur-
Recherche

Vergleich basierend auf Rangfolge je Kriterium (Paarweiser Vergleich)

Thermodynamische Berechnungen: Bsp. Kompressor

Arbeit des HD-Luft-Kompressors

$$W_{K,HD} = \int_{p_{SK,min}}^{p_{SK,max}} c_P \cdot (T_{K,ein} - T_{K,aus}) \cdot dm_{ch}$$

Änderung der Luft-Masse beim Charging-Prozess

$$dm_{ch} = \frac{V \cdot (p_{SK,max} - p_{SK,min})}{R \cdot \kappa \cdot T_{SK,ein}}$$

Ausgangstemperatur des Kompressors

$$T_{K,aus} = T_{K,ein} - \frac{1}{\eta_K} \cdot (T_{K,ein} - T_{K,aus,is})$$

Isentrope Ausgangstemperatur des Kompressors

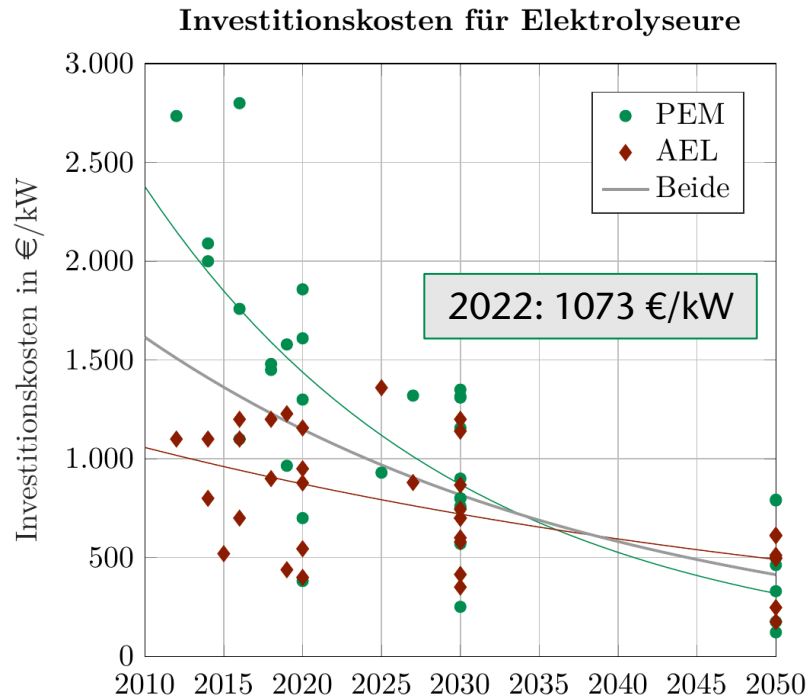
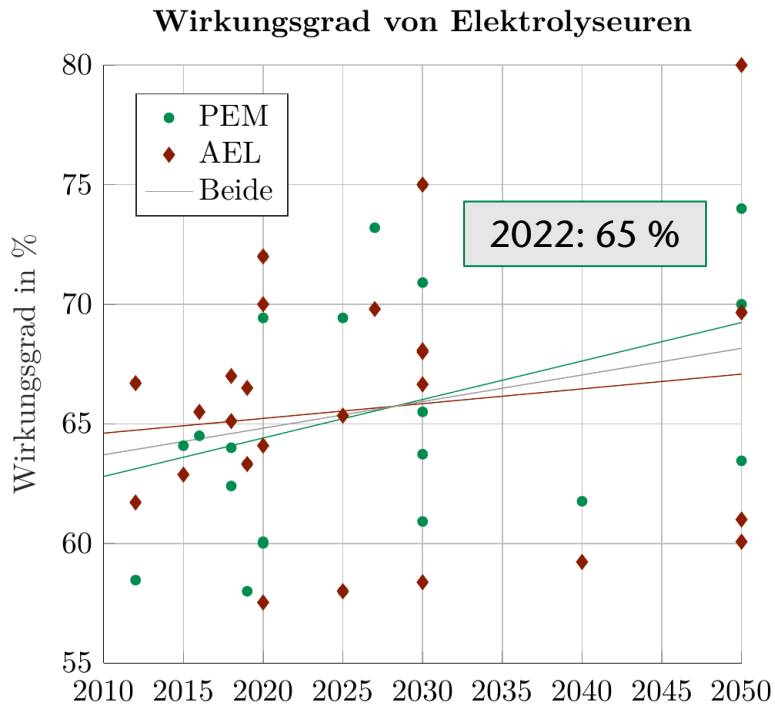
$$T_{K,aus,is} = T_{K,ein} \cdot \left(\sqrt[2]{\frac{p_{SK}}{p_0}} \right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Annahmen:

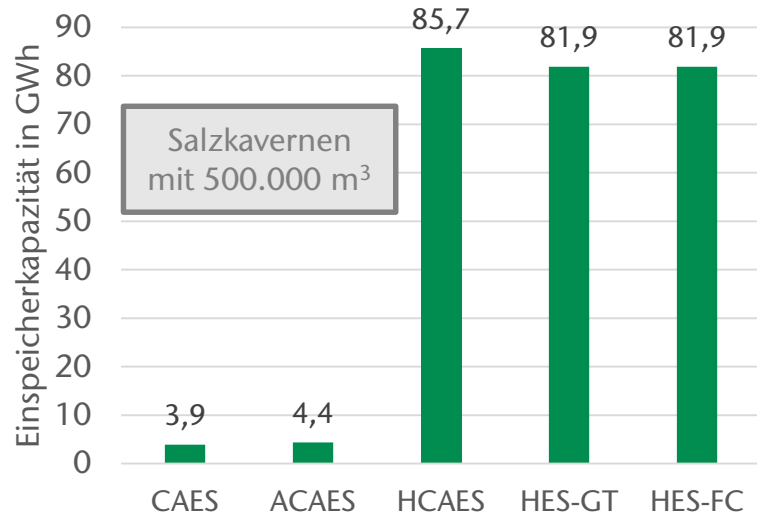
- ideales Gas
- isentrope und adiabatische Kompression und Expansion
- isobarer Wärmeaustausch
- Masse des Brennstoffs vernachlässigbar im Vergleich zur Masse der Luft
- stationäre Zustände in den Kavernen zu Beginn jedes Kompressions- und Expansionsprozesses

[Safaei 2017]

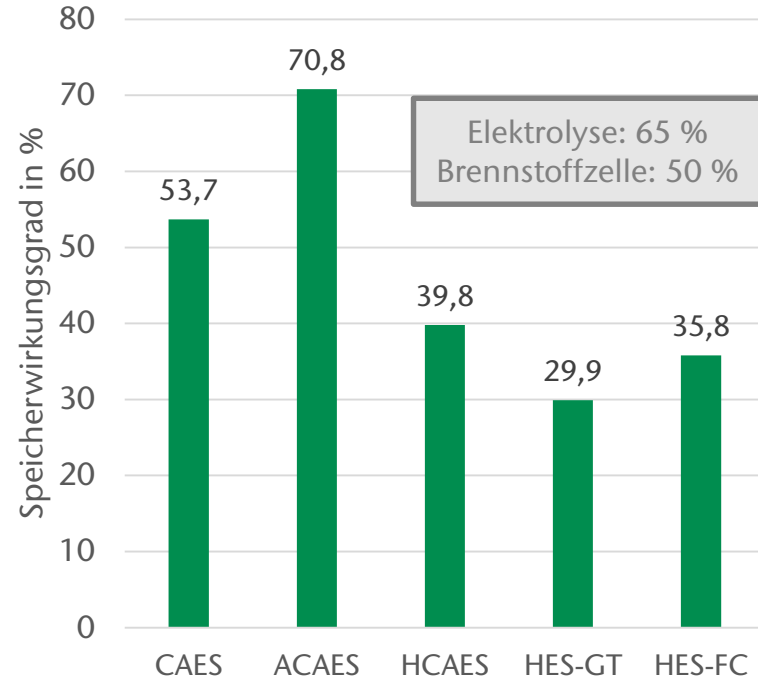
Literaturrecherche: Parameter der Elektrolyse



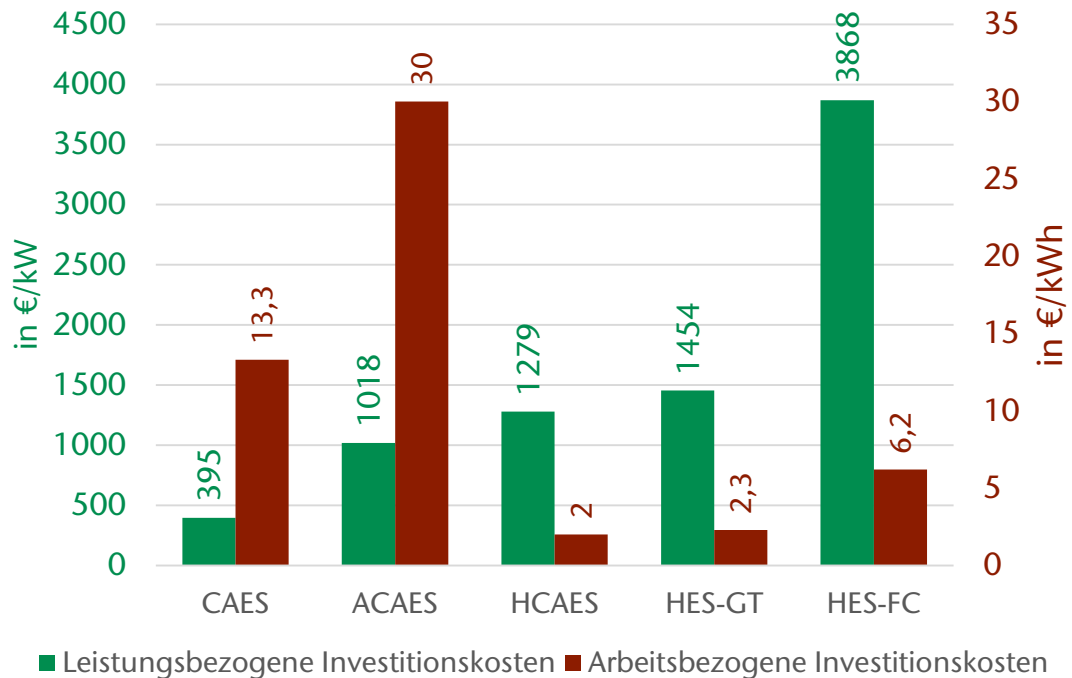
Speicherkapazität und Speicherwirkungsgrad



- Größtes Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland: 3,5 GWh [European Commission 2020]
- Größte Li-Ion-Batterie in Europa: 0,1 GWh [European Commission 2020]



Spezifische Investitionskosten



Nennleistung: 130 MW_{el}
im Motor- und Generatorbetrieb

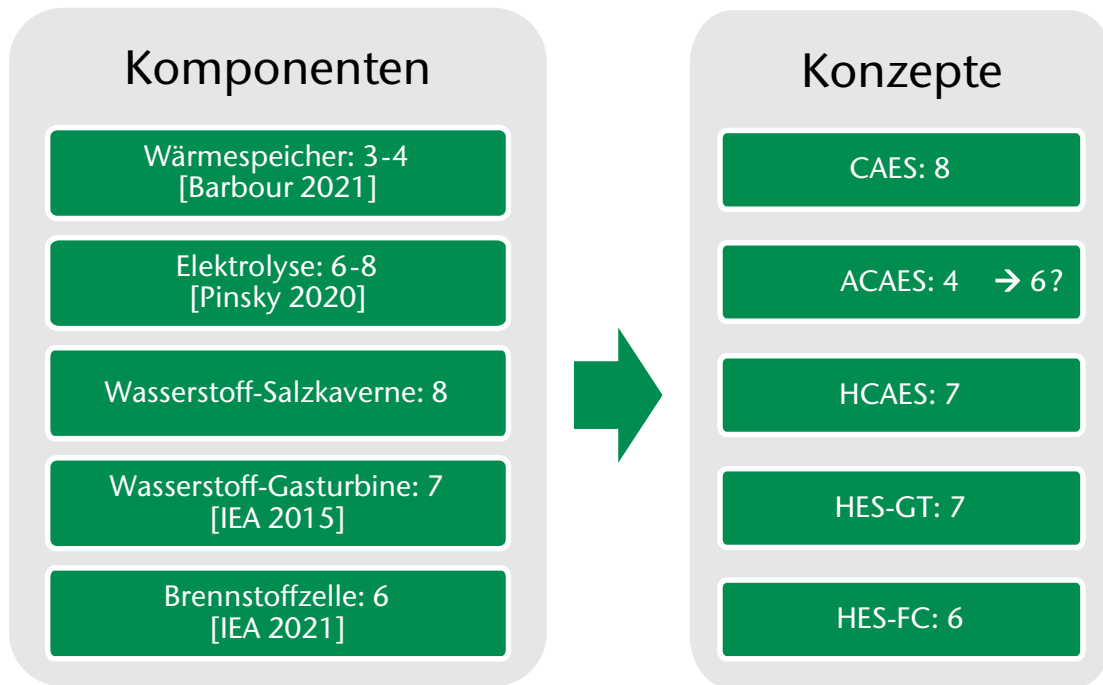
Teuerste Komponenten:

- Wärmespeicher (20 €/kWh_{th})
 - 63 % bei ACAES
- Elektrolyse (1074 €/kW_{el})
 - 61 % bei HCAES
 - 73 % bei HES-GT
- Brennstoffzelle (2500 €/kW_{el})
 - 65 % bei HES-FC

Vergleich [Schmidt 2019]:

- PSW: 960 €/kW, 70 €/kWh
- Li-Ion: 570 €/kW, 680 €/kWh

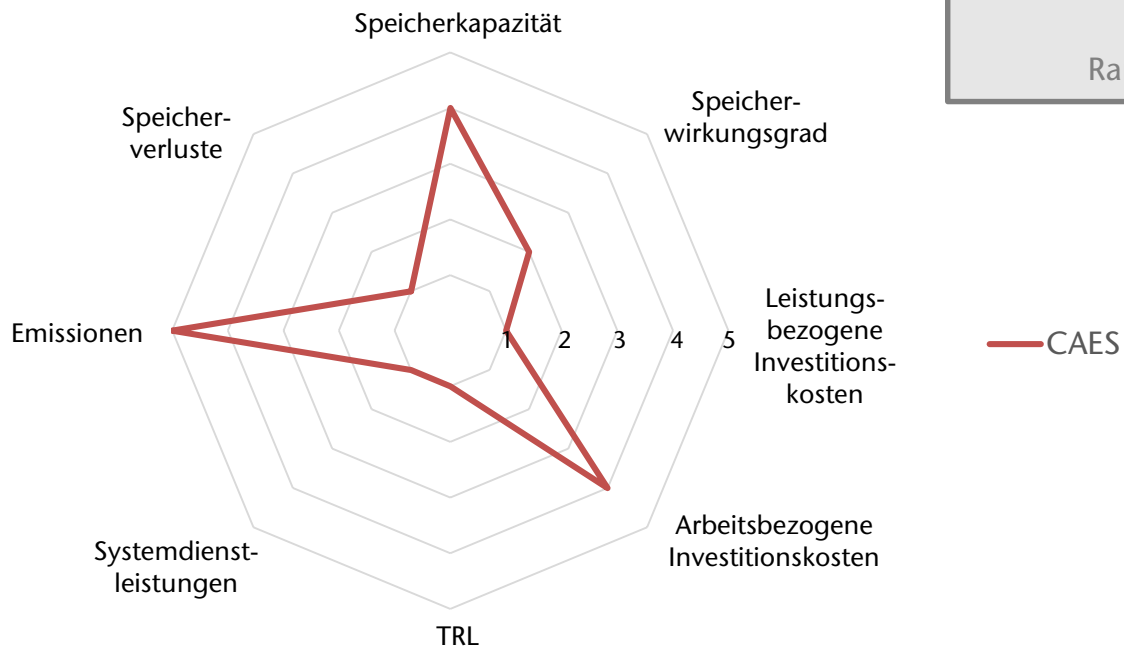
Technology Readiness Level



TRL	Beschreibung
1	basic principles observed
2	technology concept formulated
3	experimental proof of concept
4	technology validated in lab
5	technology validated in relevant environment
6	technology demonstrated in relevant environment
7	system prototype demonstration in operational environment
8	system complete and qualified
9	actual system proven in operational environment

[European Commission 2015]

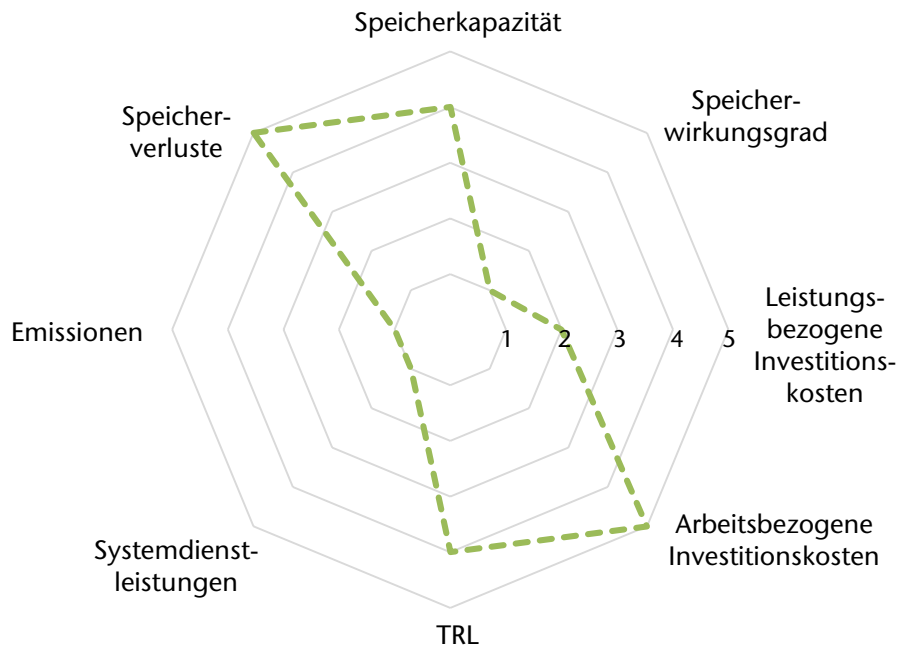
CAES: Ergebnisse



Rang 1: bestes Konzept
Rang 5: schlechtestes Konzept

— CAES

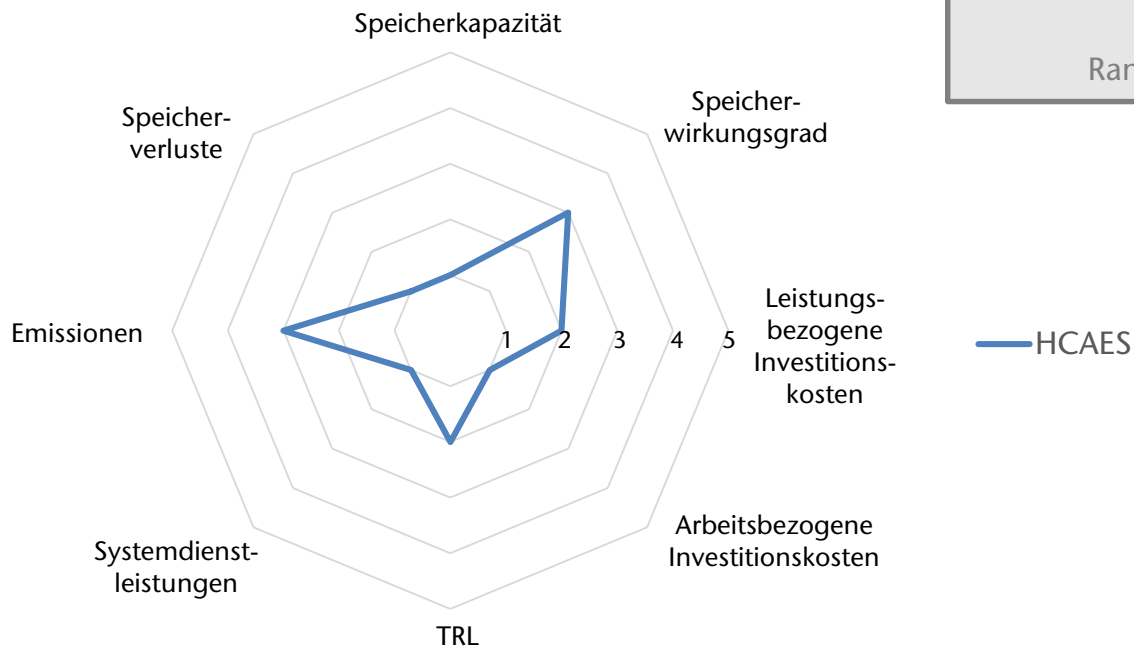
ACAES: Ergebnisse



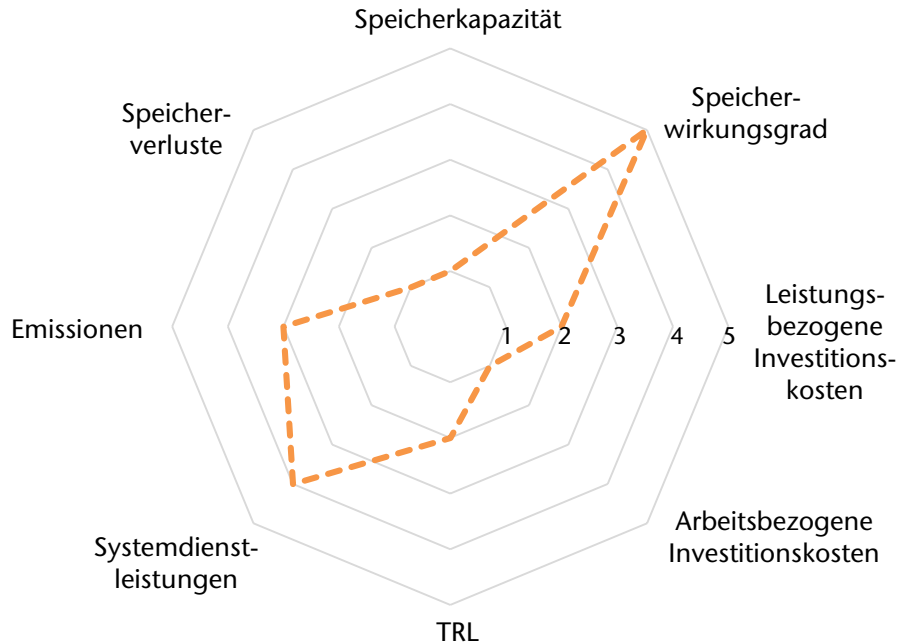
Rang 1: bestes Konzept
Rang 5: schlechtestes Konzept

--- ACAES

HCAES: Ergebnisse



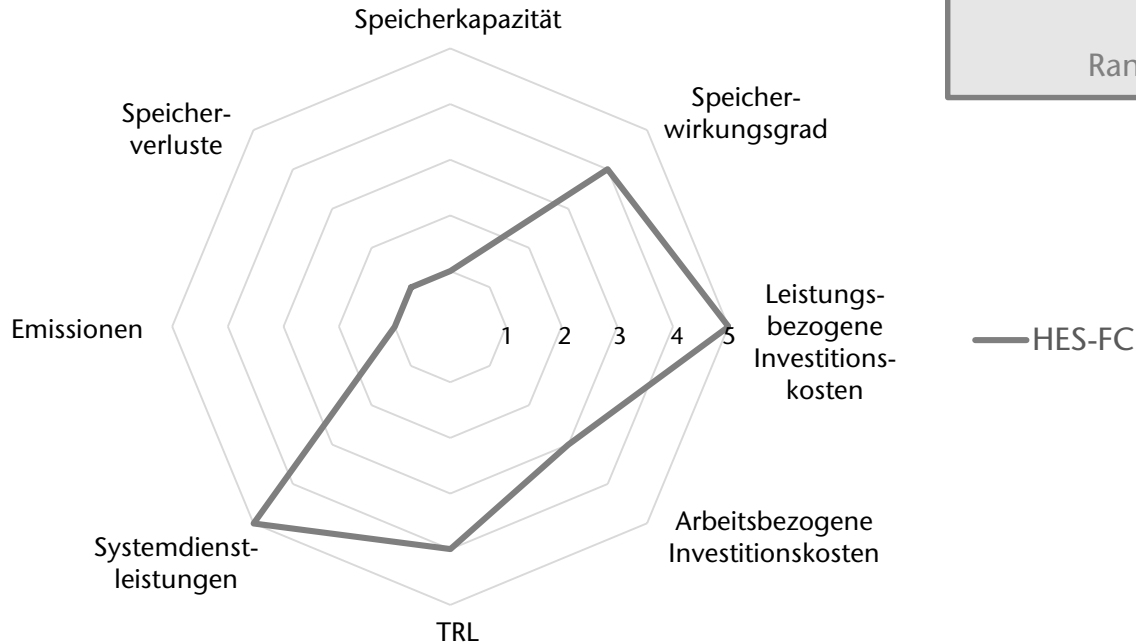
HES-GT: Ergebnisse



Rang 1: bestes Konzept
Rang 5: schlechtestes Konzept

--- HES-GT

HES-FC: Ergebnisse

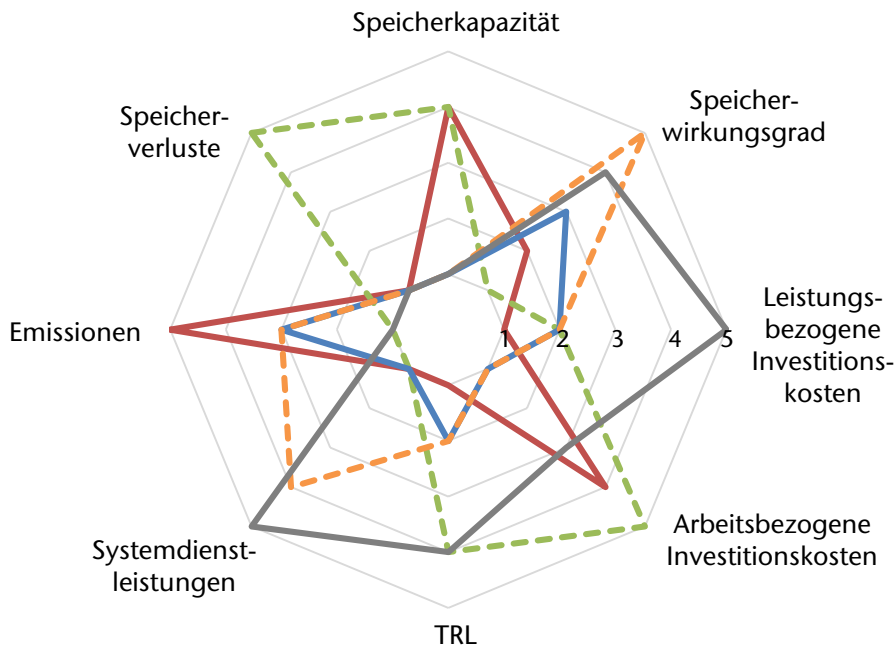


Rang 1: bestes Konzept
Rang 5: schlechtestes Konzept

— HES-FC

Vergleich der Speicherkraftwerkskonzepte

Rang 1: bestes Konzept
Rang 5: schlechtestes Konzept



- CAES
- - - ACAES
- HCAES
- - - HES-GT
- HES-FC



Ungewichteter durchschnittlicher Rang

CAES	2,4
ACAES	2,9
HCAES	1,8
HES-GT	2,4
HES-FC	3,0

Fazit

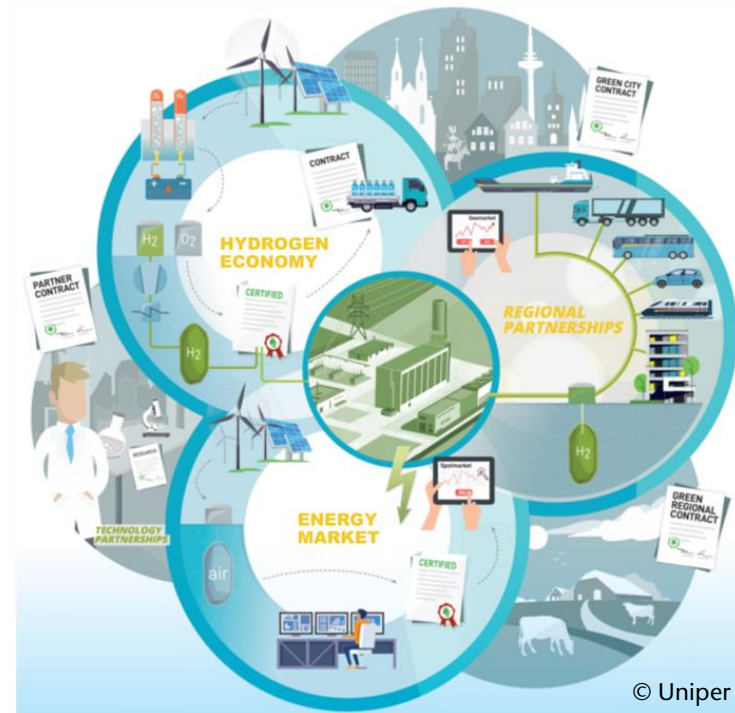
- Speicherkraftwerke mit Kavernen eignen sich zur Langzeitspeicherung von elektrischer Energie
 - Hohe Speicherkapazität, niedrige kapazitätsbezogene Kosten
 - Niedriger Wirkungsgrad, hohe leistungsbezogene Kosten
- Wasserstoff-Druckluft-Speicherkraftwerk (HCAES) ist das beste Konzept
 - CAES: CO₂-Emissionen
 - ACAES, HES-BSZ: geringe Marktreife, hohe Kosten
 - HES-GT: geringer Wirkungsgrad
- Bestehende CAES können in HCAES überführt werden

Wasserstoff-Speicherkraftwerk in Huntorf

Innovationslabor H₂-ReNoWe:

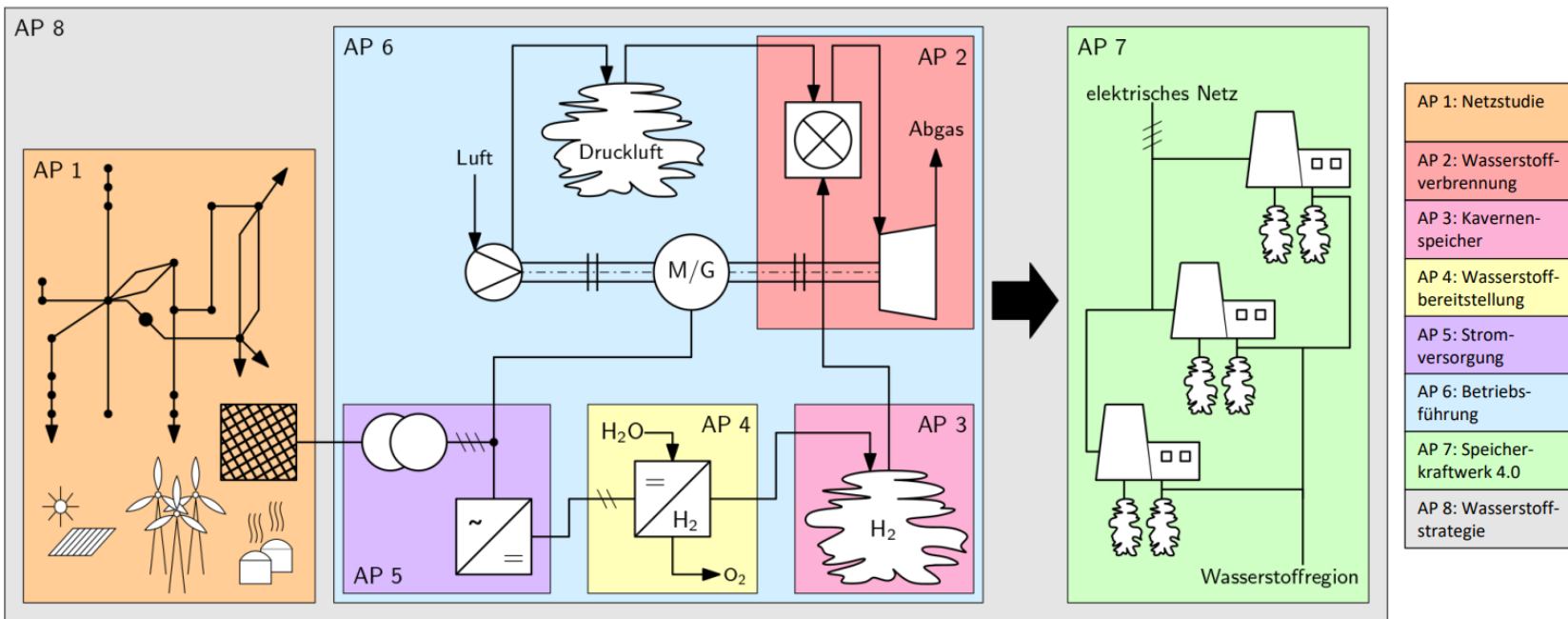
Wasserstoffregion Nord-West-Niedersachsen

- Forschungsprojekt von TU Clausthal, DLR und Uniper (Mai 2021 bis April 2024)
- Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf:
 - Inbetriebnahme 1978
 - Leistung: 68 MW / 321 MW
- CO₂-freies Speicherkraftwerk Huntorf durch Einsatz von Wasserstoff
- Speicherkraftwerk Huntorf als Wasserstoff-Hub für die Wirtschaftsregion



© Uniper

Innovationslabor H₂-ReNoWe



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Die vorgestellten Ergebnisse wurde im Rahmen der 16. International Renewable Energy Storage Conference (IRES) im September 2022 veröffentlicht. Der dazugehörige Artikel „Comparison of Renewable Large Scale Energy Storage Power Plants based on Technical and Economic Parameters“ befindet sich im Review-Prozess.



Kontakt:

Ann-Kathrin Klaas, M. Sc.

Technische Universität Clausthal

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

ann-kathrin.klaas@tu-clausthal.de

+49 5323 723597

Literatur

- [Agora Energiewende 2020] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, Towards a Climate-Neutral Germany. Executive Summary conducted for Agora Energiewende, Agora Verkehrswende and Stiftung Klimaneutralität, 2020 [online]. Available: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/towards-a-climate-neutral-germany-executive-summary/>
- [Safaei 2017] H. Safaei and M. J. Aziz, “Thermodynamic analysis of three compressed air energy storage systems: Conventional, adiabatic, and hydrogenfueled,” *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 1020, Jul. 18, 2017. DOI: 10.3390/en10071020.
- [European Commission 2020] European Commission (Directorate General for Energy), Artelys, Trinomics, and Enerdata, “Study on energy storage: Contribution to the security of the electricity supply in europe.,” LU, 2020. [online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/077257>
- [Schmidt 2019] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, “Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies,” *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, Jan. 16, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2018.12.008.
- [European Commission 2015] European Commission, HORIZON 2020 – Work Programme 2014 – 2015: 19. General Annexes, March 2015 [online]. Available: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-ga_en.pdf
- [Barbour 2021] E. Barbour and D. L. Pottie, “Adiabatic compressed air energy storage technology,” *Joule*, vol. 5, no. 8, pp. 1914–1920, Aug. 2021, DOI: 10.1016/j.joule.2021.07.009.
- [Pinsky 2020] R. Pinsky, P. Sabharwall, J. Hartvigsen, and J. O’Brien, “Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 123, p. 103 317, May 2020. DOI: 10.1016/j.pnucene.2020.103317.
- [IEA 2015] International Energy Agency, “Technology roadmap: Hydrogen and fuel cells,” Paris, 2015 [online]. Available: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>
- [IEA 2021] IEA. “ETP clean energy technology guide.” November 2021 [online]. Available: <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>.