



RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Techno-ökonomischer Benchmark von Flüssigluftenergiespeichern und Lithium-Ionen Batterien in Verbindung mit Photovoltaik am Standort Andasol 3

16. Symposium Energieinnovation

Graz, Donnerstag, 13. Februar 2020

Marc Fiebrandt, Julian Röder, Hermann-Josef Wagner

Techno-ökonomischer Benchmark

Standort Andasol 3

Einleitung

Methodik und Rahmenbedingungen

Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Techno-ökonomischer Benchmark

Standort Andasol 3

Einleitung

- Motivation
- Zentrale Forschungsfrage
- Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?

Methodik und Rahmenbedingungen

Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Einleitung

Motivation

- Zeitliche Verschiebung von erneuerbarer volatiler elektrischer Energie.
- Verstetigung der Netzeinspeisung am Ort der Erzeugung mittels Energiespeicher (ESS) zur Minderung der energetischen Ausgleichsmaßnahmen im Verbundnetz.
- Flexibilitätsoption erfordert großtechnische Tagesspeicher ohne Standortrestriktionen. Restriktionen sind z.B.:
 - unterirdische Kavernen (Druckluftspeicher)
 - oder Höhenunterschiede (Pumpspeicherkraftwerke)
- Anforderungen erfüllt durch:
 - Neuartigen adiabaten Flüssigluftenergiespeicher (A-LAES)
 - International im Mittelpunkt stehende Lithium-Ionen Batteriespeicher (BESS)

Einleitung

Zentrale Forschungsfrage

- Ist eine Kombination aus adiabaten Flüssigluftenergiespeicher (A-LAES) und einachsig nachgeführten PV-System technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber am Markt etablierten Technologien in Bezug auf die zeitliche Verschiebung und die Verstetigung von Energie?

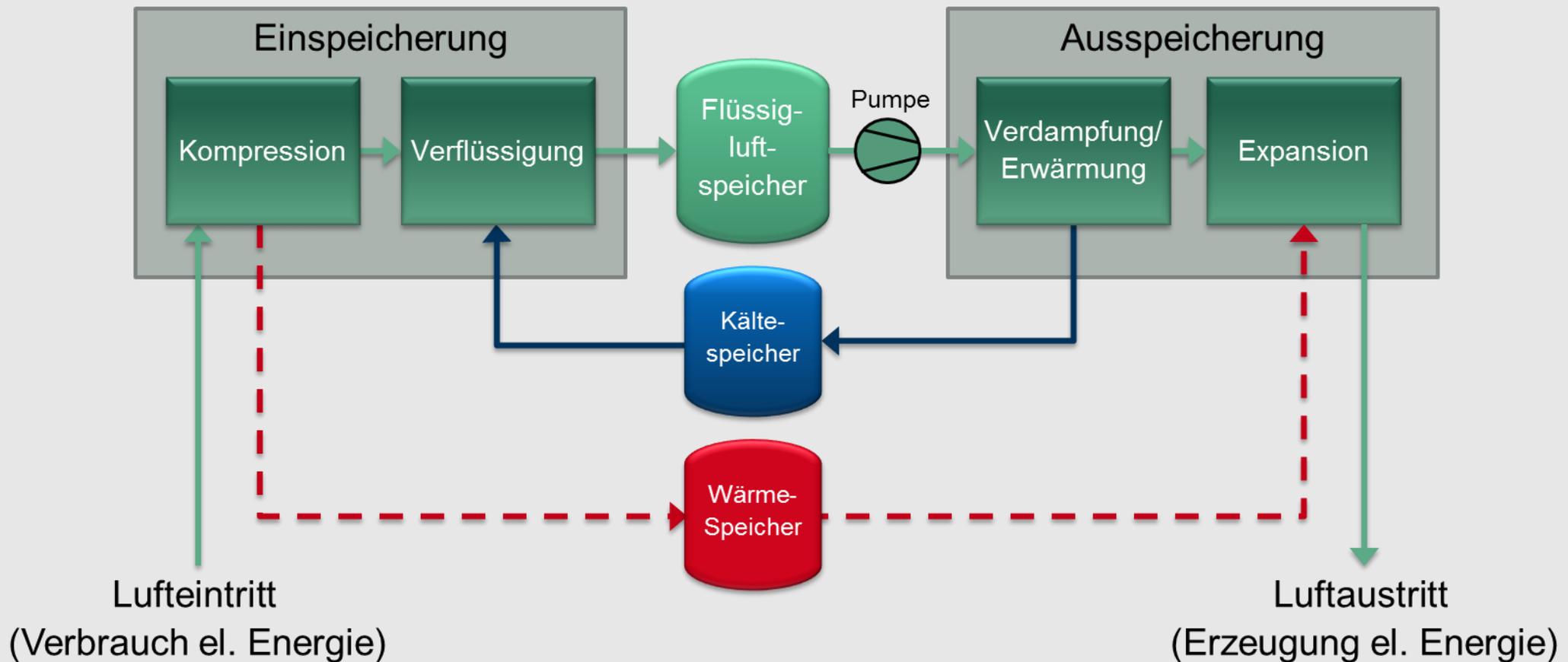
- Vergleich der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit erfolgt anhand von Stromgestehungskosten (LCOE).

- Am Markt tendenziell etablierte Systeme sind:
 - Solarthermische Kraftwerke mit thermischen Speichern (CSP mit TES)
 - Einachsig nachgeführte PV-Systeme mit Lithium-Ionen Batteriespeicher

- Hinweis: Teil des Verbundvorhaben Kryolens ‚Kryogene Luftspeicherung‘ (03ET7068F).

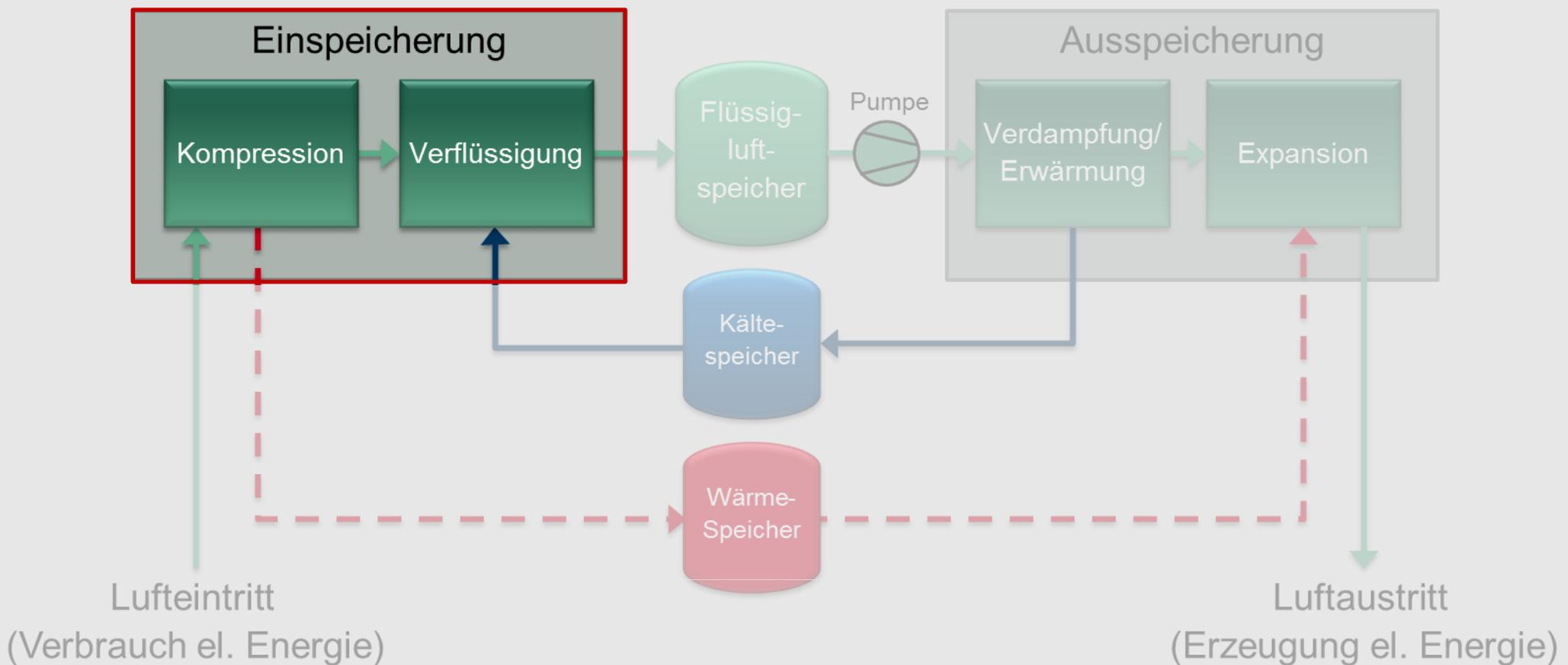
Einleitung

Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?



Einleitung

Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?



Annahme: Einspeicherung kann zwischen 1 bis 4 Verflüssigungsstränge variiert werden.

Techno-ökonomischer Benchmark

Standort Andasol 3

Einleitung

- Motivation
- Zentrale Forschungsfrage
- Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Techno-ökonomische Rahmenbedingungen

Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

- Stündlich aufgelöste Simulation für PV-System und A-LAES sowie für PV-System und BESS (kein Bezug von Energie für ESS aus Verbundnetz, PV speist ins Verbundnetz).
 - Äußere Parameter: Einstrahlung, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit
 - Die Speisung von Strom aus dem PV-System in die ESS erfolgt anhand ermittelter leistungsabhängiger Grenzen, ab derer der Strom als PV-Überschuss deklariert ist.
- Auslegung der ESS Kapazitäten berücksichtigt Anfahrverluste, Selbstentladeraten, Sicherheitsfaktoren (A-LAES), Überdimensionierung (Entladetiefe und Zelledegradation).
- Leistungs- bzw. kapazitätsabhängige Skaleneffekte für spezifische Installationskosten.
- Analyse realer Daten des CSP Andasol 3 (Spanien) liefert techno-ökonomische Kennzahlen für die Auslegung und das Betriebsverhalten der Simulation (Referenz).

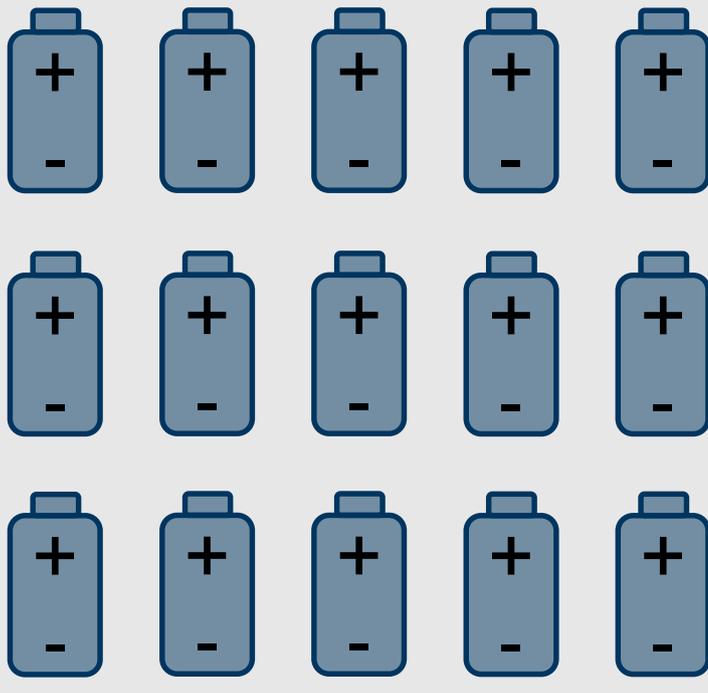
Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Überdimensionierung der BESS Kapazität

Auslegungskapazität

Zusätzliche Kapazität



Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Überdimensionierung der BESS Kapazität

Auslegungskapazität



Zusätzliche Kapazität



- Erweiterung der Kapazität aufgrund:
 - Entladetiefe 90 %

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Überdimensionierung der BESS Kapazität

Auslegungskapazität



Zusätzliche Kapazität



- Erweiterung der Kapazität aufgrund:
 - Entladetiefe 90 %
 - Variable Zellegradation über Lebenszeit von 15 Jahren

- Auswirkungen auf Investitionen und Betriebskosten

Methodik und Rahmenbedingungen

Techno-ökonomische Rahmenbedingungen

| Kennzahl | Einheit | CSP Referenz | PV + A-LAES | PV + BESS |
|-----------------------------------|----------------------|---------------|-------------|--|
| Ø Umgebungstemperatur | °C | 12,9 | | 12,9 |
| PV-Neigungswinkel | Grad (°) | | | 36 |
| Datengrundlage | | | | Ø 2006 – 2015 |
| Inv _{CSP} (max. – min.) | Mio. Euro | 315,0 – 200,0 | | |
| LCOE _{CSP} (max. – min.) | ct/kWh | 27,1 – 10,1 | | |
| WACC | % | | | 2,94; 2,00 / 6,00 / 10,00 |
| Spez. Kosten PV, 1-achsig | Euro/kW _p | | | 864 (50 MW _p) bis 777 (100 MW _p) |
| Spez. Kosten A-LAES * | Euro/kWh | | | 1.622 bis 466 |
| Spez. Kosten BESS ** | Euro/kWh | | | 814 bis 639 |

* Bezogen auf Speicherkapazitäten von 3,0 h bis 24,0 h für 4 Verflüssigungsstränge, inkl. zusätzlicher Kapazitäten

** Bezogen auf Speicherkapazitäten von 3,0 h bis 24,0 h, inkl. zusätzlicher Kapazitäten

Methodik und Rahmenbedingungen

Techno-ökonomische Rahmenbedingungen

| Kennzahl | Einheit | CSP Referenz | PV + A-LAES | PV + BESS |
|---------------------------|------------------|--------------|--------------------|--------------------|
| Einspeicherleistung | MW _{el} | | 99,00 (AC) | 54,61 (DC) |
| Ausspeicherleistung | MW _{el} | | 50,00 (AC, η: 50%) | 50,00 (AC, η: 95%) |
| Überschussleistung PV | MW _{el} | | ab 35,00 (AC) | ab 35,00 (AC) |
| Nennleistung | MW _{el} | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| Kapazität ESS | h / MWh | 7,5 / 375 | 7,5 / 375 | 7,5 / 375 |
| Netzeinspeisung | MWh / a | 175.000 | 175.000 | 175.000 |
| Teillast Einspeicherung * | % | | 70 bis 100 | 0 bis 100 |
| Teillast Ausspeicherung | % | | 40 bis 100 | 0 bis 100 |
| Betrachtungszeitraum | a | | 30 | 30 |

* Bei 1 Verflüssigungsstrang ist eine Einspeicherleistung von 69,00 MW (70,00 %) bis 99,00 MW (100,00%) möglich.

Bei 4 Verflüssigungssträngen ist eine Einspeicherleistung von vier mal 17,35 MW (70,00 %) bis 24,75 MW (100,00 %) möglich.

Techno-ökonomischer Benchmark

Standort Andasol 3

Einleitung

- Motivation
- Zentrale Forschungsfrage
- Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Techno-ökonomische Rahmenbedingungen

Ergebnisse

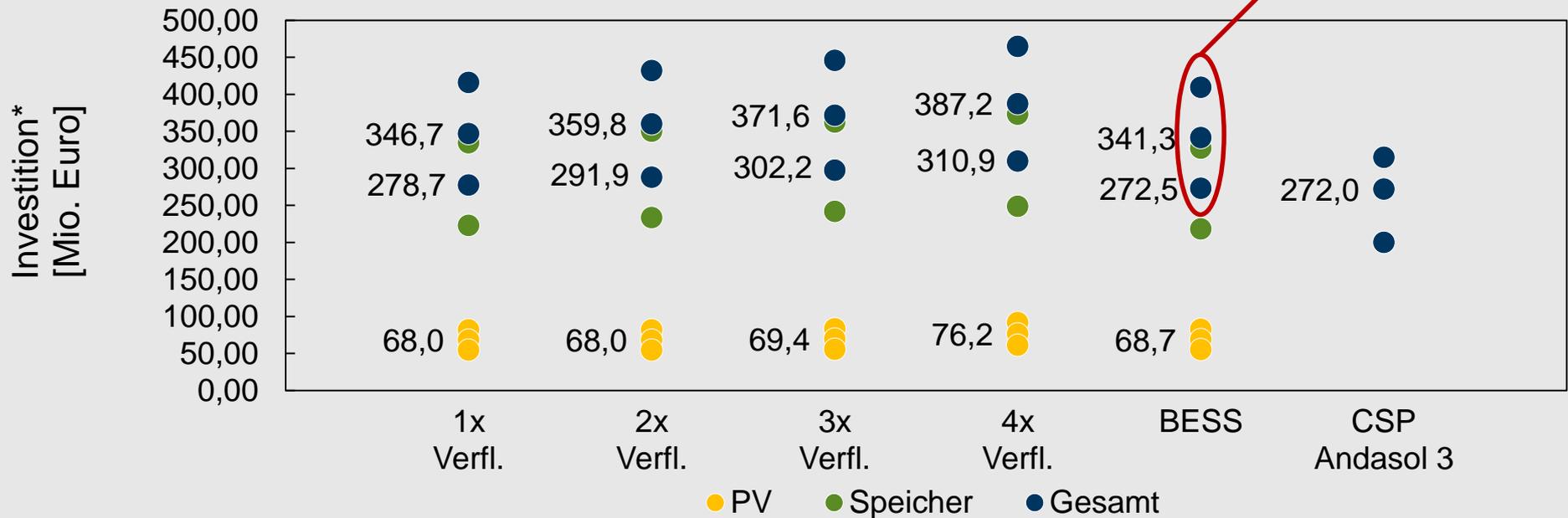
- Techno-ökonomische Kennzahlen
- Sensitivitätsanalysen

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ergebnisse

Techno-ökonomische Kennzahlen Investitionen*

Darstellung eines Unsicherheitsbereichs von $\pm 20,00\%$. Nicht gültig für CSP, da diese auf Literaturwerte basieren.



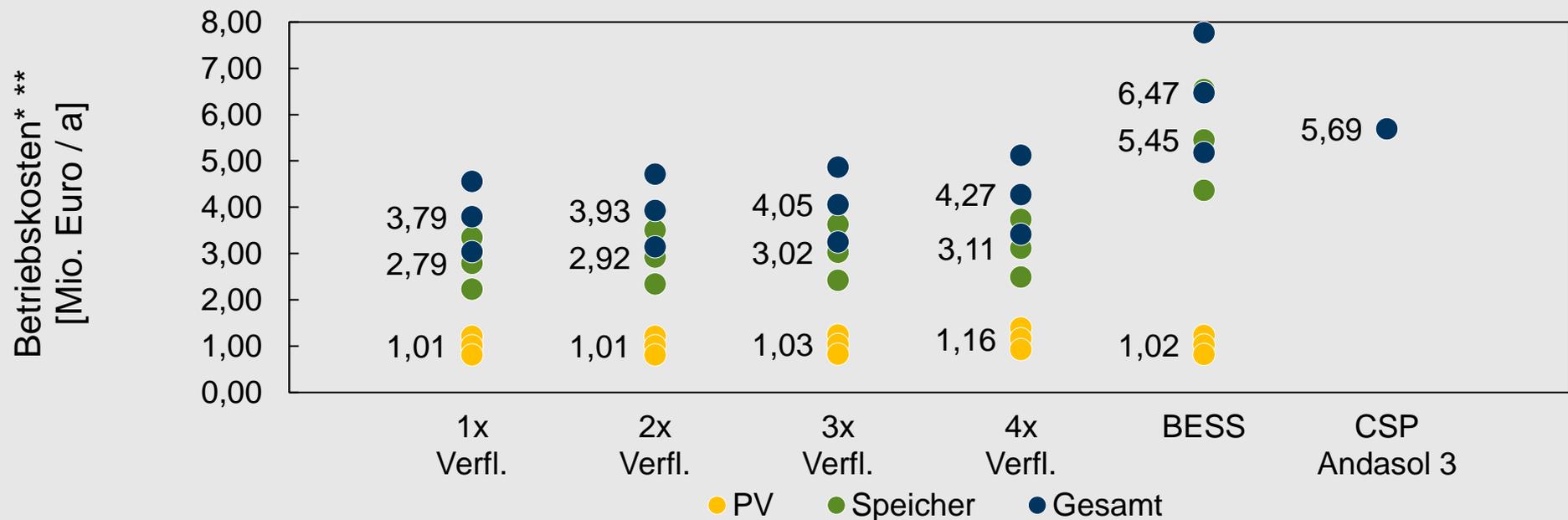
| Kennzahl | Einheit | 1x Verfl. | 2x Verfl. | 3x Verfl. | 4x Verfl. | BESS |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| PV-Peakleistung | MW _p | 84,90 | 84,90 | 87,10 | 97,64 | 86,09 |

* Inklusive zusätzlicher Kapazitäten

Ergebnisse

Techno-ökonomische Kennzahlen

Betriebskosten* **



| Kennzahl | Einheit | 1x Verfl. | 2x Verfl. | 3x Verfl. | 4x Verfl. | BESS |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| PV-Peakleistung | MW _p | 84,90 | 84,90 | 87,10 | 97,64 | 86,09 |

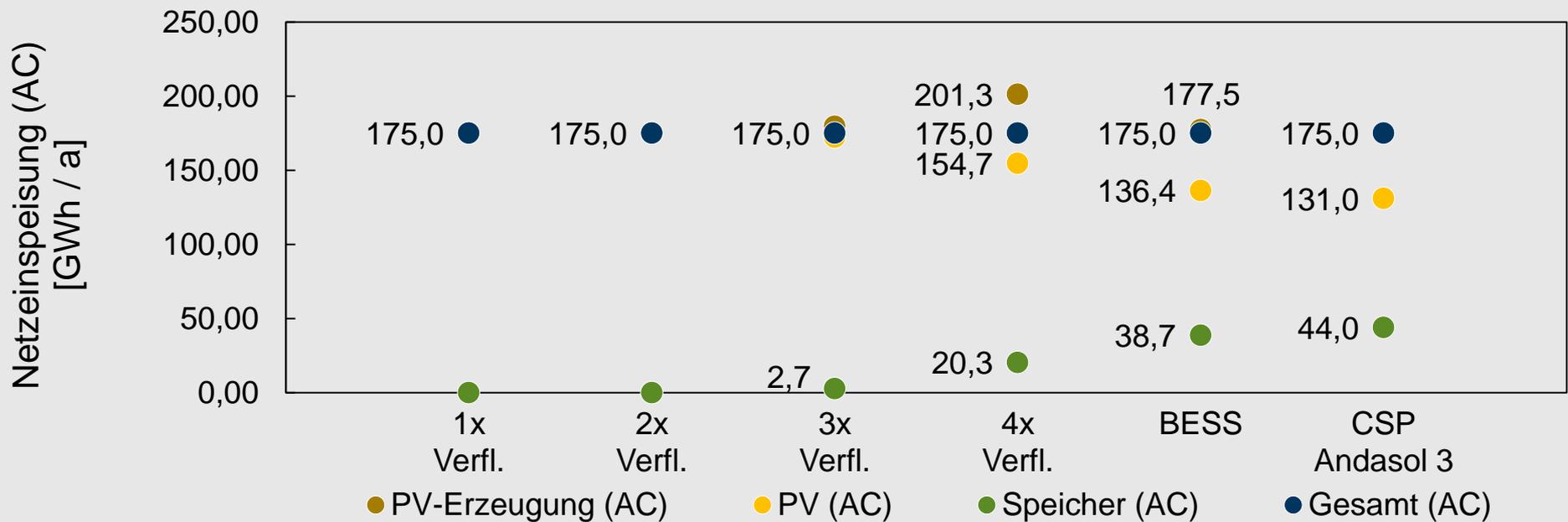
* Inklusive zusätzlicher Kapazitäten

** Entspricht 1 % (A-LAES) bzw. 2 % (BESS) der ESS Investition. Basiert für CSP auf Literaturwerten.

Ergebnisse

Techno-ökonomische Kennzahlen

Netzeinspeisung (AC)

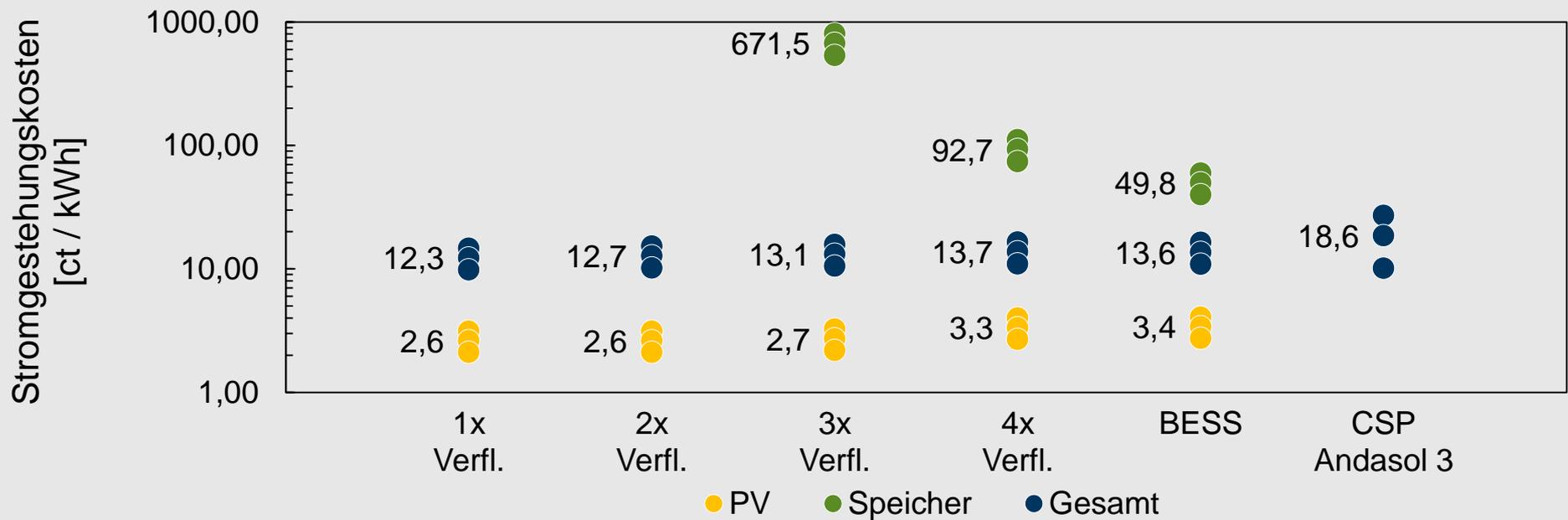


| Kennzahl | Einheit | 1x Verfl. | 2x Verfl. | 3x Verfl. | 4x Verfl. | BESS |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| PV-Peakleistung | MW _p | 84,90 | 84,90 | 87,10 | 97,64 | 86,09 |

Ergebnisse

Techno-ökonomische Kennzahlen

Stromgestehungskosten (LCOE)

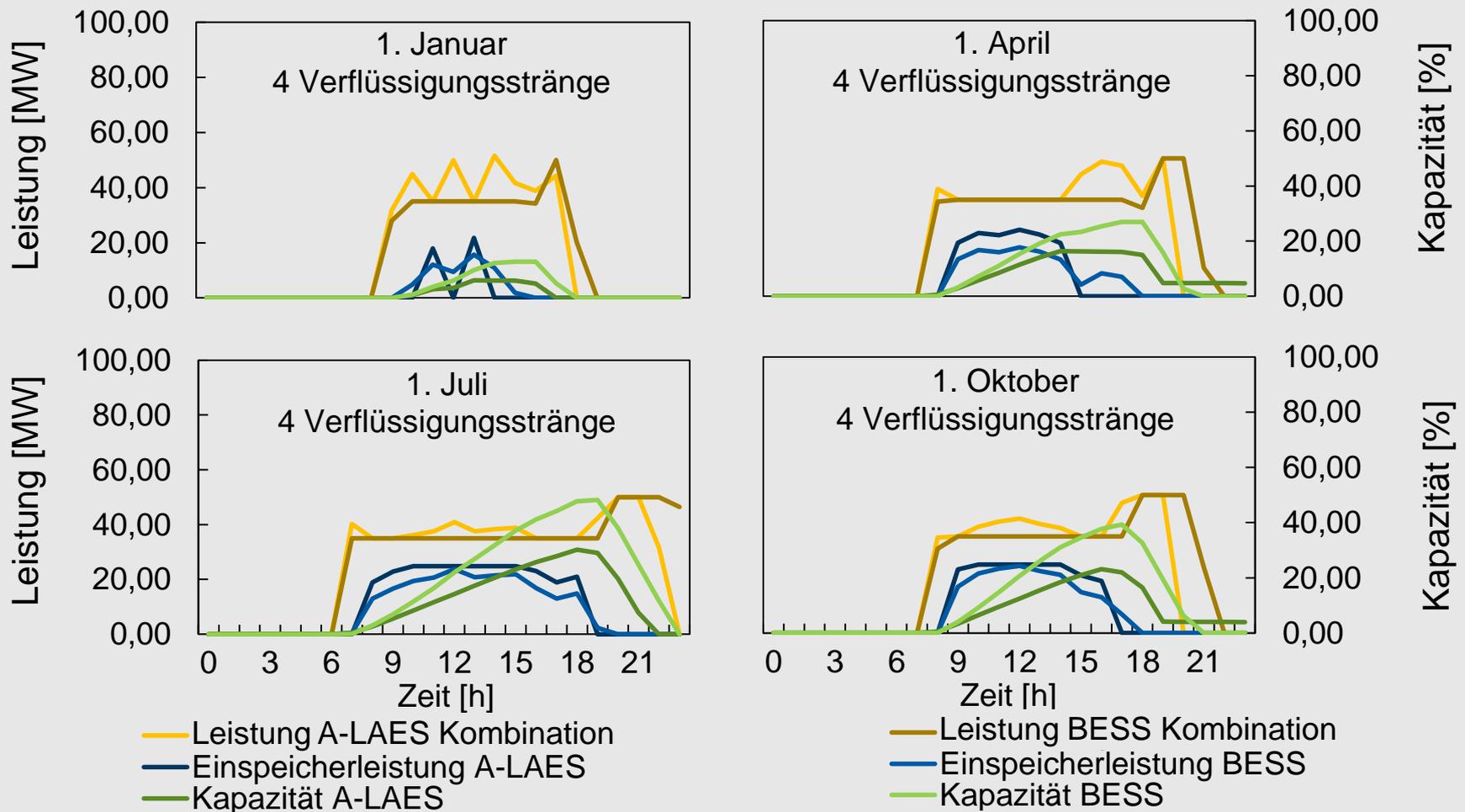


| Kennzahl | Einheit | 1x Verfl. | 2x Verfl. | 3x Verfl. | 4x Verfl. | BESS |
|--------------------|-----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PV-Peakleistung | MW _p | 84,90 | 84,90 | 87,10 | 97,64 | 86,09 |
| LCOE (max. – min.) | ct/kWh | 14,7 – 9,8 | 15,3 – 10,2 | 15,8 – 10,5 | 16,4 – 11,0 | 16,4 – 10,9 |

Ergebnisse

Techno-ökonomische Kennzahlen

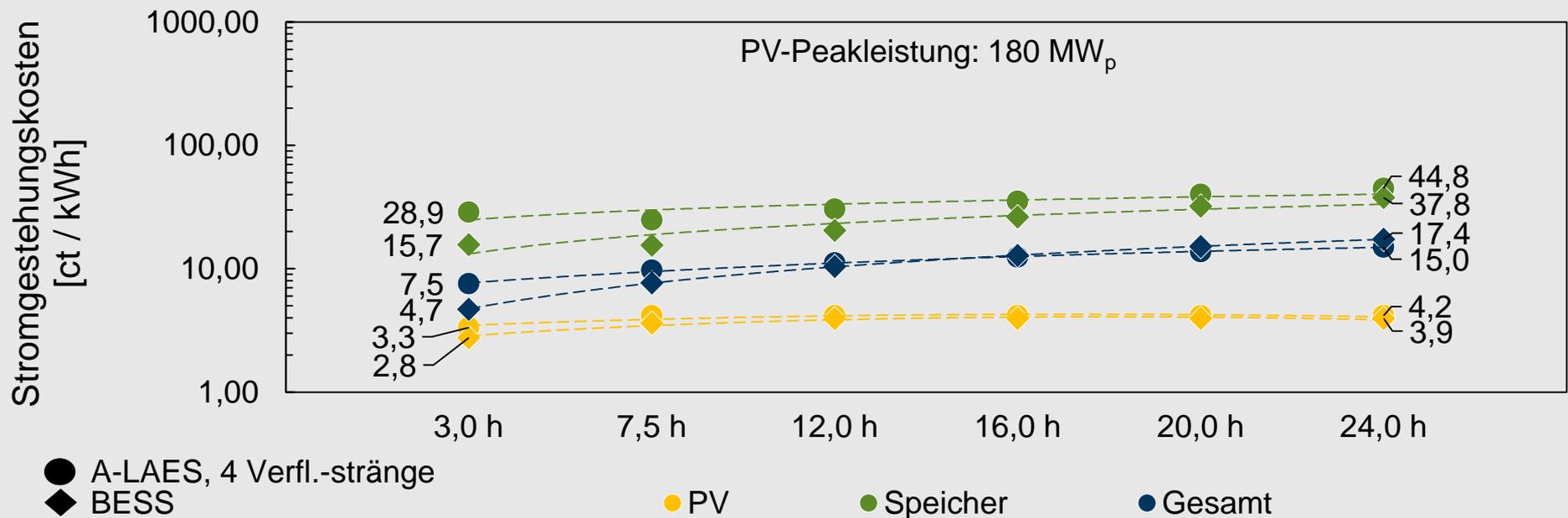
Einspeicherleistungs- und Kapazitätsverläufe



Ergebnisse

Sensitivitätsanalysen

Stromgestehungskosten (LCOE), Variation der Speicherkapazität



| Kennzahl | Einheit | 4x – 3,0 h | 4x – 24,0 h | BESS – 3,0 h | BESS – 24,0 h |
|-----------------------|----------|------------|-------------|--------------|---------------|
| Spez. Installationsk. | Euro/kWh | 1.622 | 466 | 814 | 639 |

- Ökonomische Vorteile der BESS Kombination bei Kapazitäten von unter 3,0 bis 12,0 h
- Ökonomische Vorteile der A-LAES Kombination bei Kapazitäten größer als 12,0 h

Techno-ökonomischer Benchmark

Standort Andasol 3

Einleitung

- Motivation
- Zentrale Forschungsfrage
- Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Techno-ökonomische Rahmenbedingungen

Ergebnisse

- Techno-ökonomische Kennzahlen
- Sensitivitätsanalysen

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

- Investitionsbereiche der Anlagenkombinationen und CSP überschneiden sich.
- Jährliche Betriebskosten der A-LAES Kombination sind geringer als die der BESS Kombination infolge des notwendigen Zellaustauschs und der Überdimensionierung. Die BESS Kombination weist die höchsten Betriebskosten auf.
- Verstetigte Fahrweise und zeitliche Verschiebung von Energie mit der A-LAES Kombination infolge des eingeschränkten Teillastverhaltens nur bedingt möglich.
- A-LAES hat infolge der Wirkungsgradverluste energetische Nachteile. Ausschließliche Nutzung der PV-Überschussleistung erscheint nicht zielführend.
- LCOE der Kombinationen konkurrenzfähig gegenüber CSP, wobei die geringere ESS-Nutzung und die resultierende höhere PV-Netzeinspeisung die LCOE begünstigen.
- A-LAES Kombination bietet ökonomische Vorteile ab Kapazitäten größer als 12,0 h, und die BESS Kombination bei Speicherkapazitäten unter 3,0 h bis 12,0 h.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausblick

- Kombination aus PV-System und sich parallel ergänzenden A-LAES (kapazitätsskaliert) und BESS (leistungsskaliert) erscheint zur Verstetigung und zeitlichen Verschiebung von Energiemengen unter synergetischer Ausnutzung der jeweiligen techno-ökonomischen Vorteile zielführend.
- Die kapazitätsabhängige Kostenstruktur sollte um eine leistungsabhängige Skalierung ergänzt werden, um die zu erwartenden Investitionen und Betriebskosten der Energiespeicher anwendungsspezifischer darstellen zu können.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontaktpersonen

- Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft
Prof. Dr. Valentin Bertsch
Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner

- Wirtschaftlichkeitsanalyse
Marc Fiebrandt
fiebrandt@ee.rub.de
0234 / 32 - 26378

- Ökobilanzielle Bewertung
Dr.-Ing. Julian Röder
roeder@ee.rub.de
0234 / 32 - 25984