



RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Ökonomische und Ökologische Betrachtung eines mit einem Steinkohlekraftwerk gekoppelten Flüssigluftenergiespeichers

16. Symposium Energieinnovation

Graz, Freitag, 14. Februar 2020

Julian Röder, Marc Fiebrandt, Nico Redemann, Hermann-Josef Wagner

Ökonomische und ökologische Betrachtung

Steinkohlekraftwerk mit gekoppeltem A-LAES

Einleitung

Methodik und Rahmenbedingungen

Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ökonomische und ökologische Betrachtung

Steinkohlekraftwerk mit gekoppeltem A-LAES

Einleitung

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

Methodik und Rahmenbedingungen

Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Einleitung

Motivation

- Konventionell gefeuerte Kraftwerke operieren zunehmend an technischen Grenzen, um Stabilität des Energiesystems zu gewährleisten.
- Erweiterung der technischen Leistungsgrenzen der Kraftwerke, um auf volatile erneuerbare Energieerzeugung und schwankende Strompreise reagieren zu können.
- Flexibilitätsoption erfordert großtechnische Tagesspeicher ohne Standortrestriktionen
Restriktionen sind z.B.:
 - unterirdische Kavernen (Druckluftspeicher)
 - oder Höhenunterschiede (Pumpspeicherkraftwerke)
- Anforderungen erfüllt durch:
 - Neuartigen adiabaten Flüssigluftenergiespeicher (A-LAES)
 - Kopplung des A-LAES mit einem Steinkohlekraftwerk

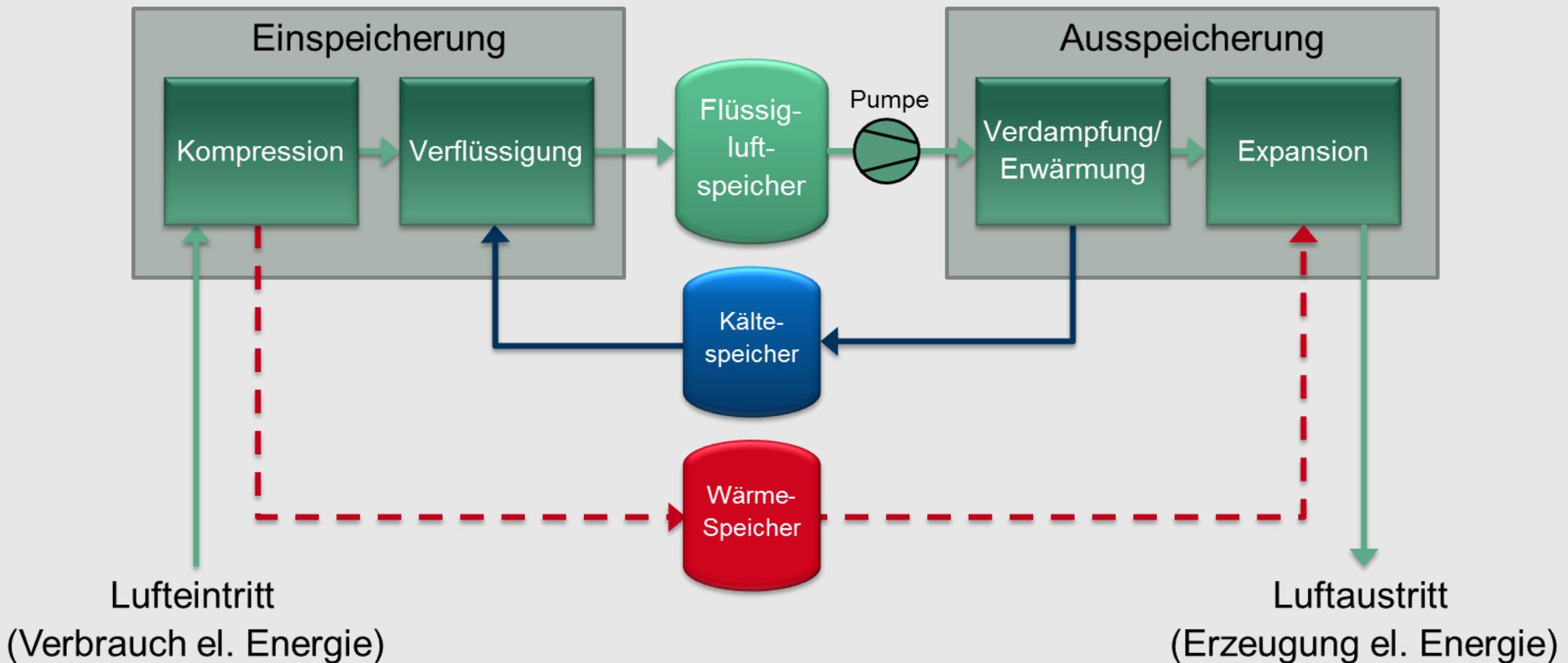
Einleitung

Zentrale Forschungsfrage

- Kann eine Kombination aus adiabatem Flüssigluftenergiespeicher (A-LAES) und Steinkohlekraftwerk eine technisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Erweiterung des Leistungsbereiches des Kraftwerkes erreichen?
- Entwicklung einer jährlichen Betriebssimulation der Anlagenkombination anhand realer Leistungsverläufe ausgewählter Kraftwerke für die Jahre 2016 bis 2018.
- Ökonomischer und ökologischer Mehrwert der Anlagenkombination wird anhand der Ergebnisse der jährlichen Betriebssimulation diskutiert.
- Simulierte Veräußerung des Stroms an den Spotmärkten „Day-Ahead“ und „Intraday“.
- Hinweis: Teil des Verbundvorhaben Kryolens ‚Kryogene Luftspeicherung‘ (03ET7068F).

Einleitung

Wie funktioniert ein adiabater Flüssigluftenergiespeicher?



Ökonomische und ökologische Betrachtung

Steinkohlekraftwerk mit gekoppeltem A-LAES

Einleitung

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

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Rahmenbedingungen der jährlichen Betriebssimulation

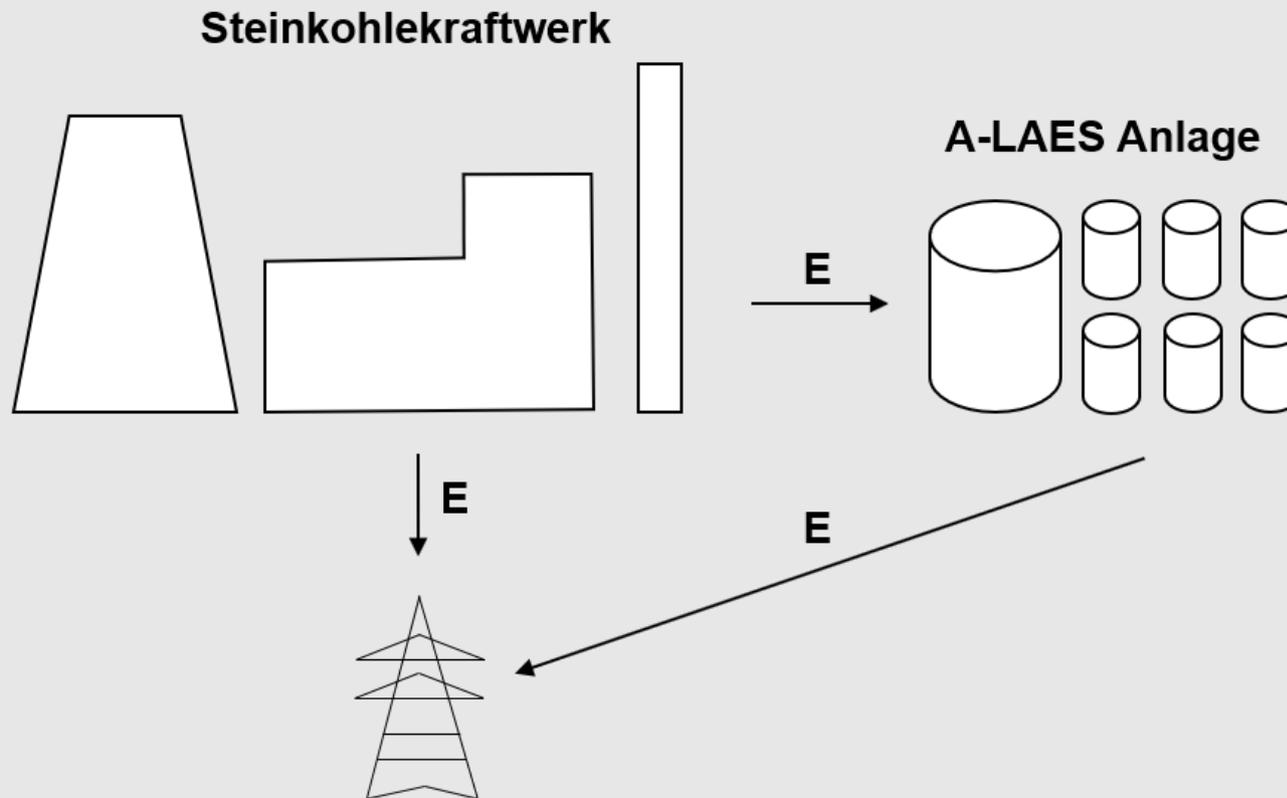
Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Energiefluss der Anlagenkombination



Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Betriebsweise der Anlagenkombination

- Stündlich aufgelöste Simulation der Betriebsweise der A-LAES in Abhängigkeit von stündlich aufgelösten Leistungsverläufen des Kraftwerks Westfalen (Block E).

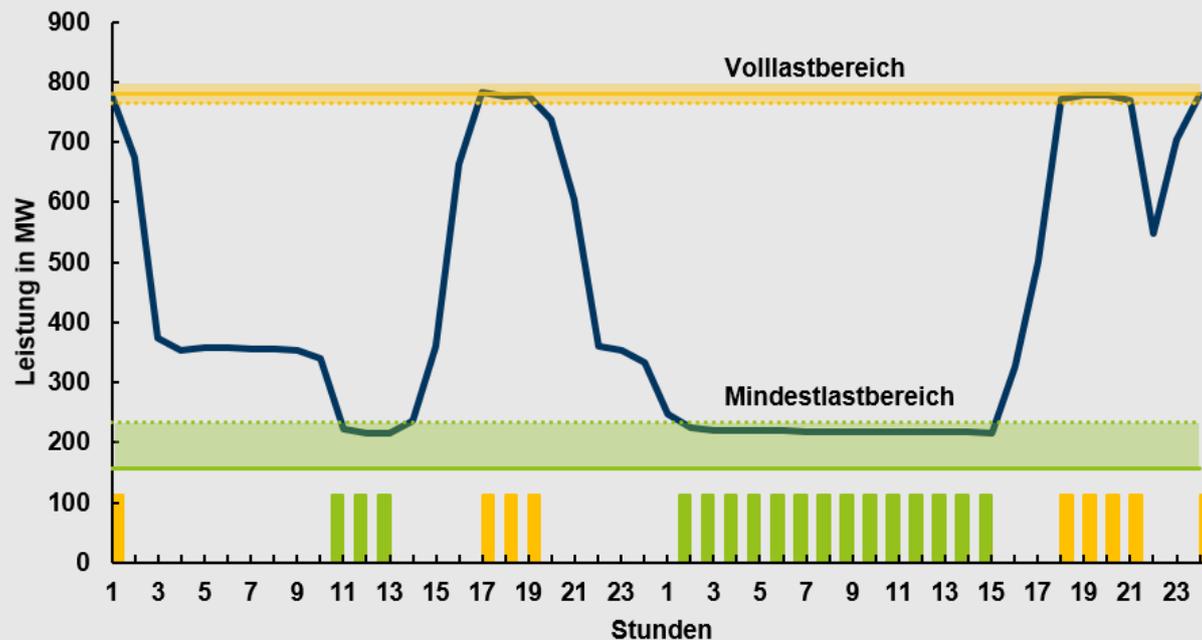
- Der A-LAES operiert während der Mindest- und Vollastphasen des Kraftwerks (KW)
 - Während der Mindestlastphasen des Kraftwerks wird ein Teil der Kraftwerksleistung genutzt um Energie im A-LAES zwischenzuspeichern (Einspeicherung A-LAES)
 - Während der Vollastphasen des Kraftwerks wird die im A-LAES gespeicherte Energie genutzt, um weitere Leistung zur Verfügung zu stellen (Auspeichern des A-LAES)

- Die Betriebssimulation des A-LAES berücksichtigt unter anderem:
 - Investitionen des A-LAES
 - Betriebskosten des KW
 - Stündliche Strompreise
 - Ökobilanzen des A-LAES und des Kraftwerks
 - Speicherfüllstand
 - Anfahrverluste und Stillstandsverluste

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Kraftwerks

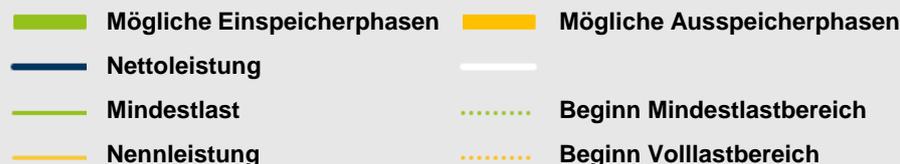
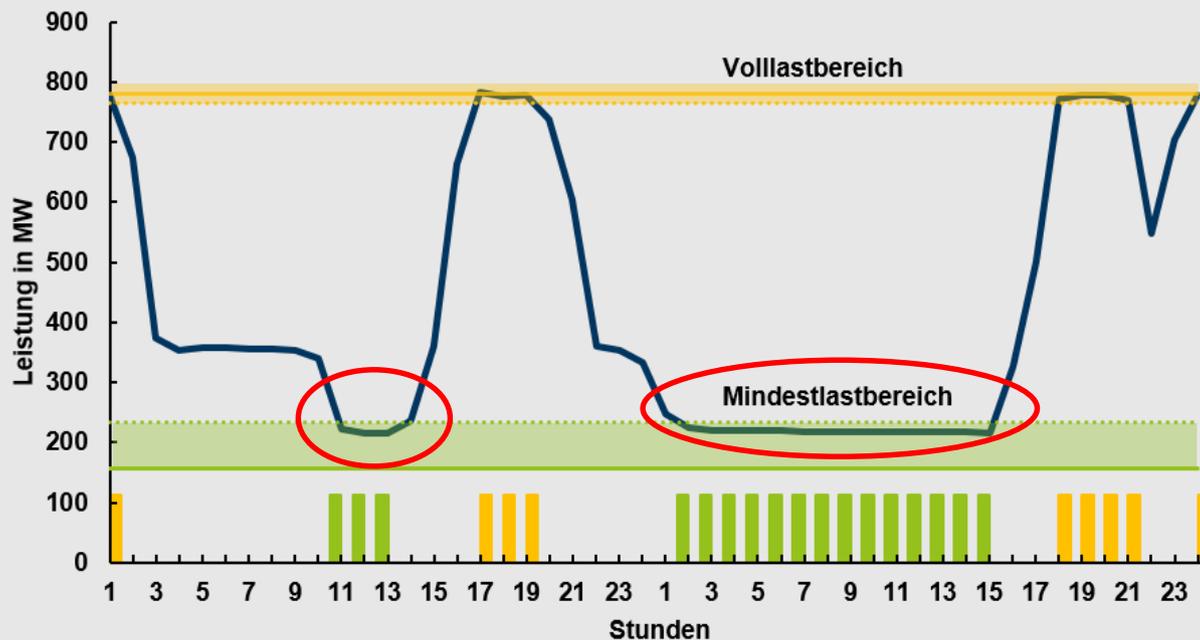


- Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Steinkohlekraftwerk Westfalen (Block E) für 2016 bis 2018

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Kraftwerks

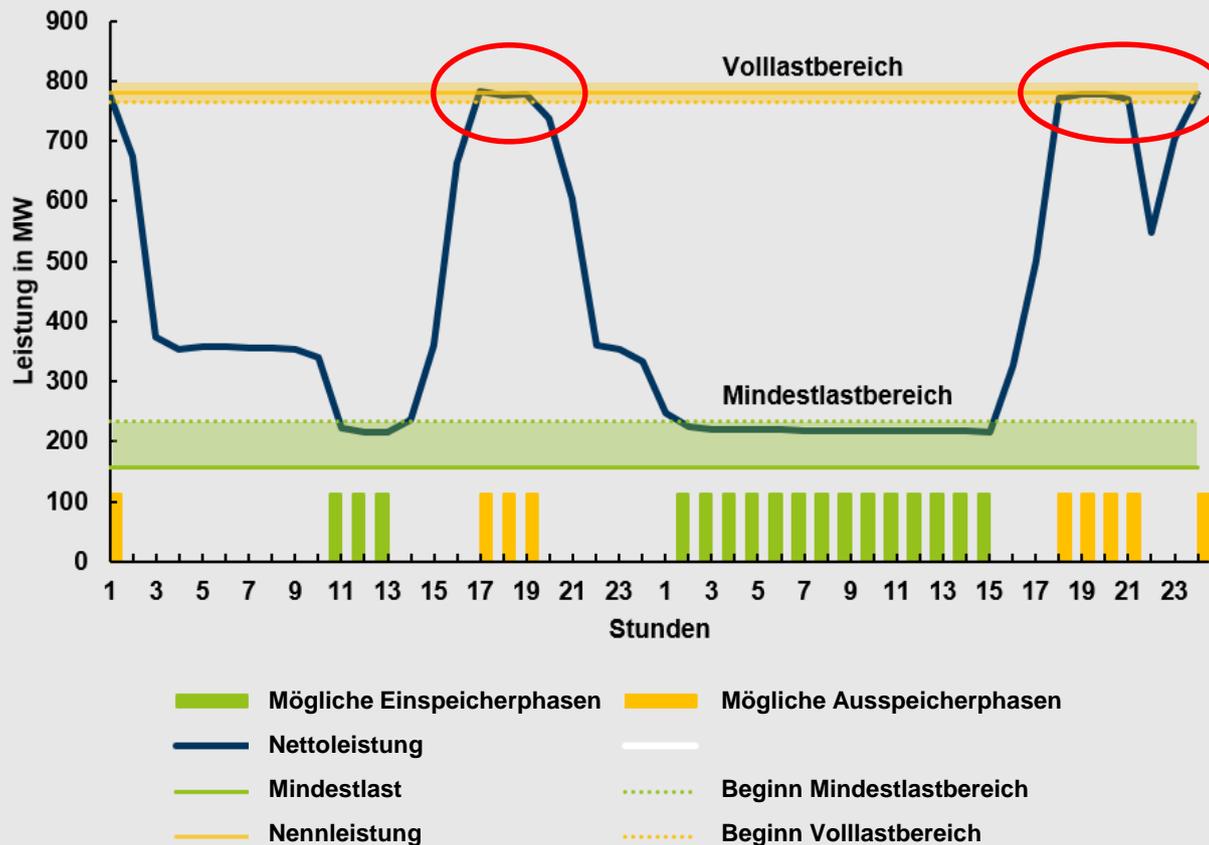


- Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Steinkohlekraftwerk Westfalen (Block E) für 2016 bis 2018
- Mindestlastphase des KW = mögliche Einspeicherphasen des A-LAES

Methodik und Rahmenbedingungen

Methodik

Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Kraftwerks



- Stündlich aufgelöster Leistungsverlauf des Steinkohlekraftwerk Westfalen (Block E) für 2016 bis 2018
- Mindestlastphase des KW = mögliche Einspeicherphasen des A-LAES
- Volllastphase des KW = mögliche Ausspeicherphase des A-LAES

Methodik und Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung der jährlichen Betriebssimulation

Lastverläufe, Normierung und Szenarien

- Normierung des realen Lastverlaufs des KW Westfalen auf das Referenzkraftwerk NRW
 - Realer Verlauf bleibt erhalten und wird anhand der Nennleistung normiert
 - Normierung ermöglicht detailliertere Bestimmung von erforderlichen Kennzahlen (z. B.: Steinkohleverbrauch, CO₂-Emissionen)

- Erstellung und Betrachtung eines weiteren, auf den A-LAES abgestimmten Ideallastgangs als Best-Case Szenario der Speicherintegration.
 - Täglich: 7 mögliche Einspeicherstunden; 16 mögliche Ausspeicherstunden

- Zusätzliche Berücksichtigung von Preissteigerungen an den Absatzmärkten von 36,7 %
 - Unterscheidung der Preissteigerungen in Baseload (alle Tagesstunden) und Peakload (Tagesstunden 9 bis 20)

Methodik und Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung der jährlichen Betriebssimulation

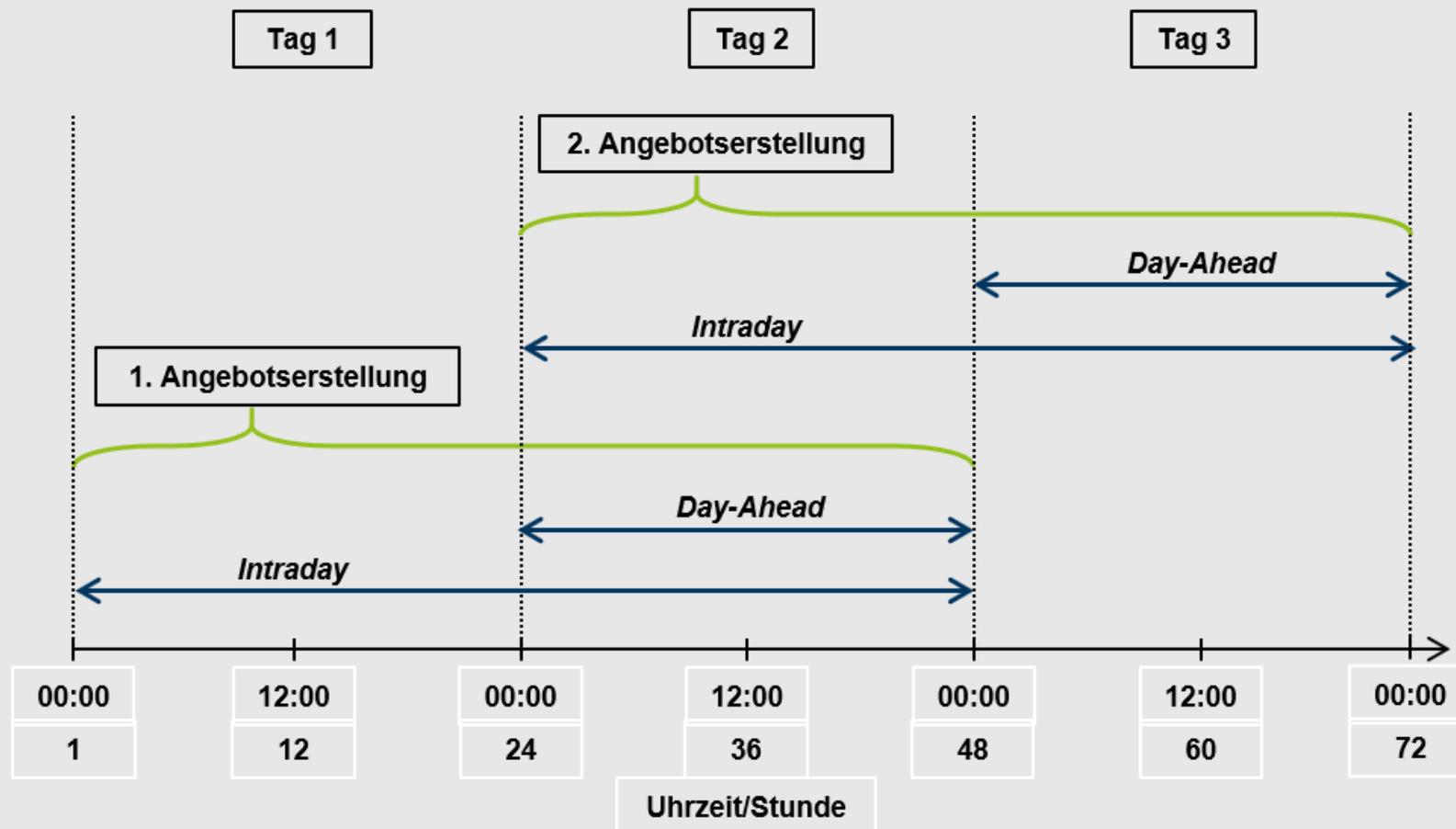
Technische Kennwerte

Kennwert	Einheit	KW Westfalen	RKW-NRW	A-LAES
Nennleistung	MW _{el}	780	555,5 ($\eta = 0,459$)	-
Beginn Volllastbereich	MW _{el}	764,4	544,4	-
Mindestlast	MW _{el}	156	111,1 ($\eta = 0,365$)	-
Beginn Mindestlastbereich	MW _{el}	234	166,7	-
Einspeicherleistung	MW _{el}	-	-	99,15
Ausspeicherleistung	MW _{el}	-	-	50
Wirkungsgrad	%	-	-	50,43
Speicherkapazität	MWh	-	-	350
Ein-/Ausspeicherdauer	h	-	-	8 / 7
Investitionen	Mio. €	-	-	252,18

Methodik und Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung der jährlichen Betriebssimulation

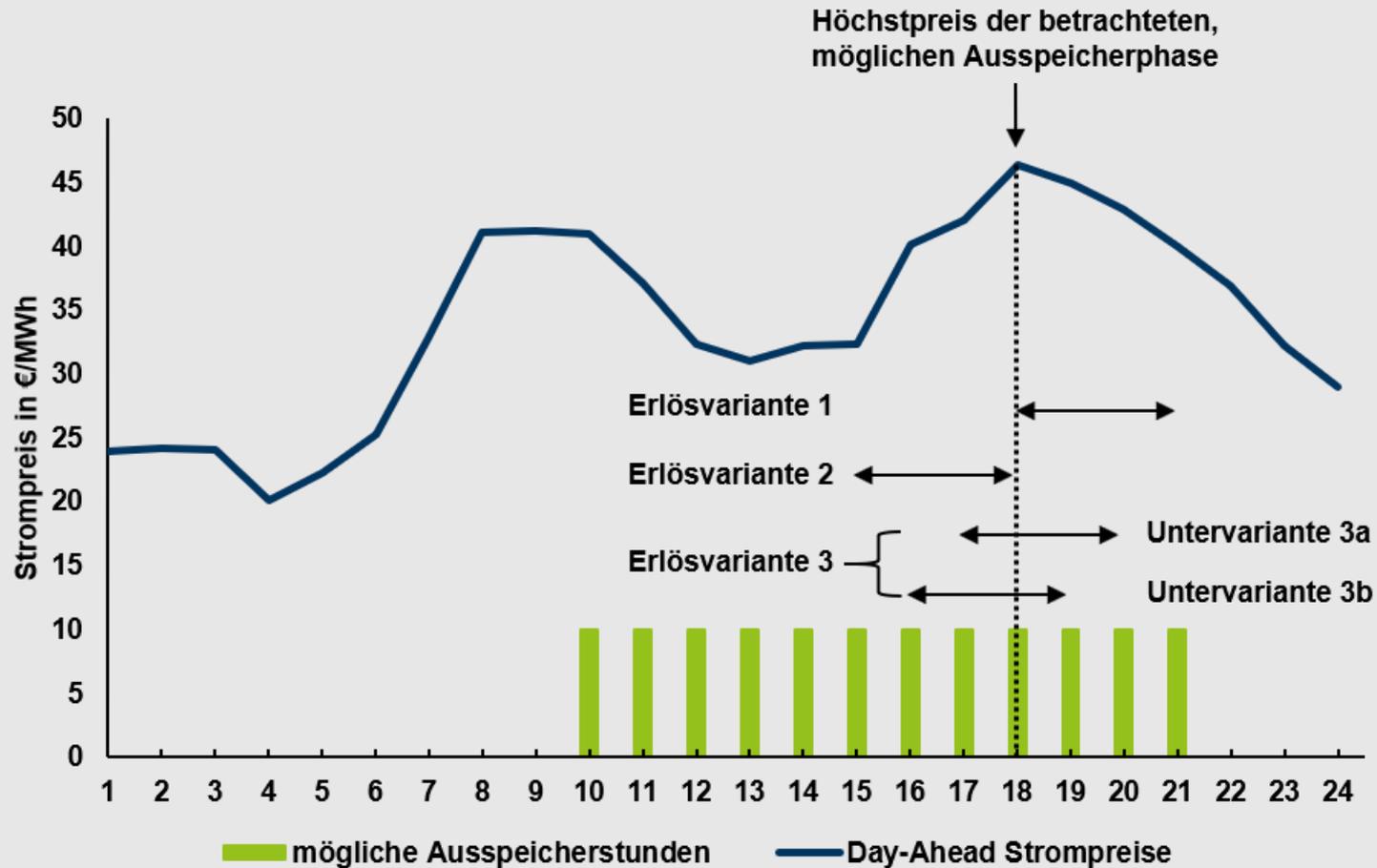
Iterative Angebotserstellung des A-LAES



Methodik und Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung der jährlichen Betriebssimulation

Berechnung der Erlösvarianten



Ökonomische und ökologische Betrachtung

Steinkohlekraftwerk mit gekoppeltem A-LAES

Einleitung

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

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Rahmenbedingungen der jährlichen Betriebssimulation

Ergebnisse

- Ökonomische Betrachtung des Flüssigluftenergiespeichers
- Ökologische Betrachtung des Flüssigluftenergiespeichers

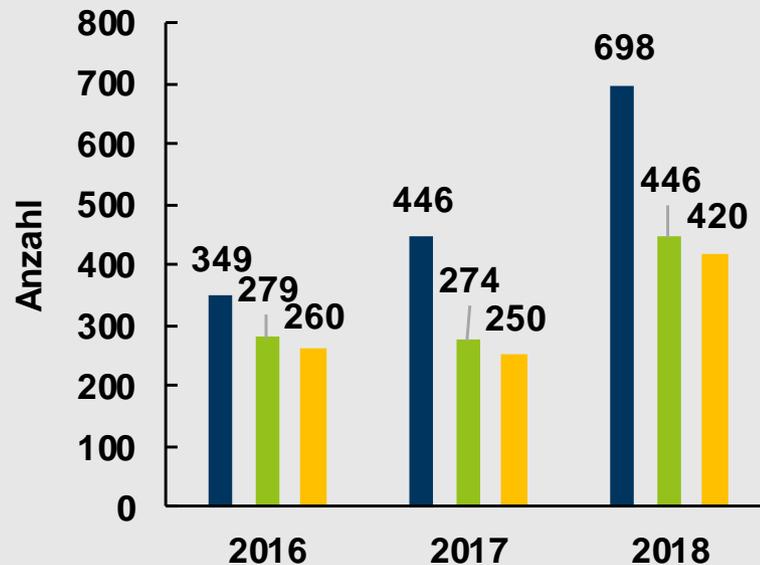
Schlussfolgerungen und Ausblick

Ergebnisse

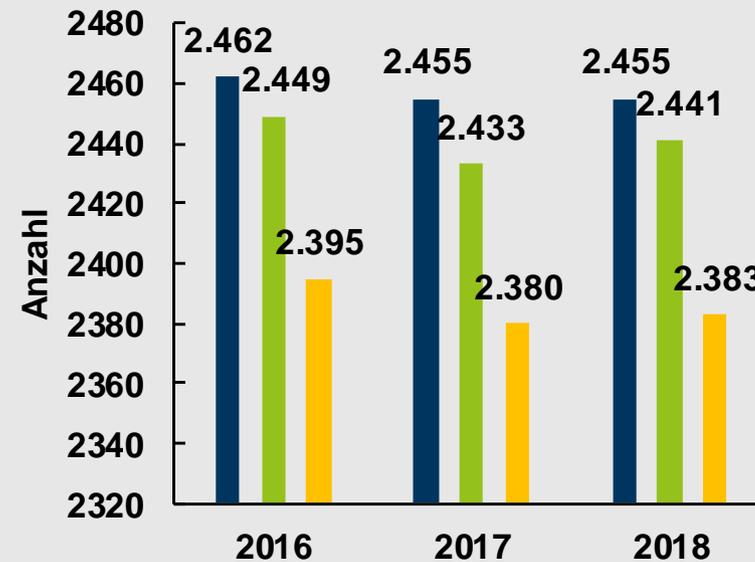
Ökonomische Betrachtung

Betriebsstunden des A-LAES

Basis KW Westfalen



Ideallastgang



Legende

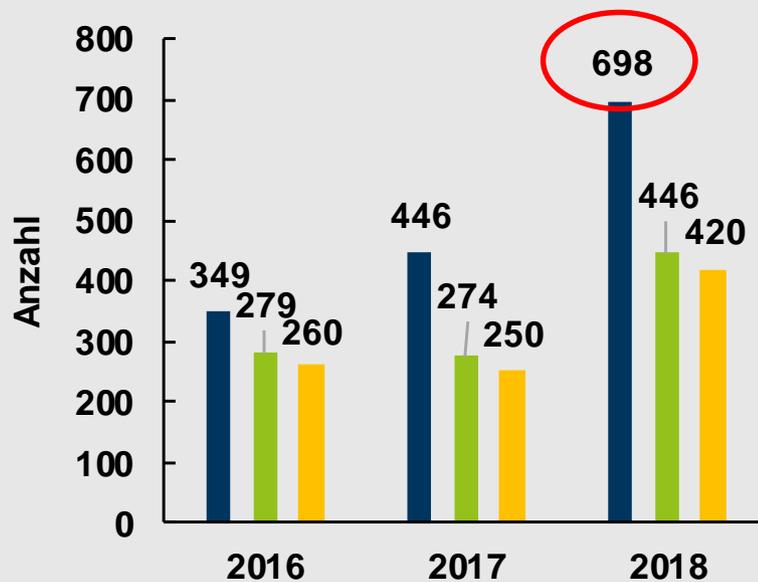
- Mögliche Einspeicherstunden
- Genutzte Einspeicherstunden
- Genutzte Ausspeicherstunden

Ergebnisse

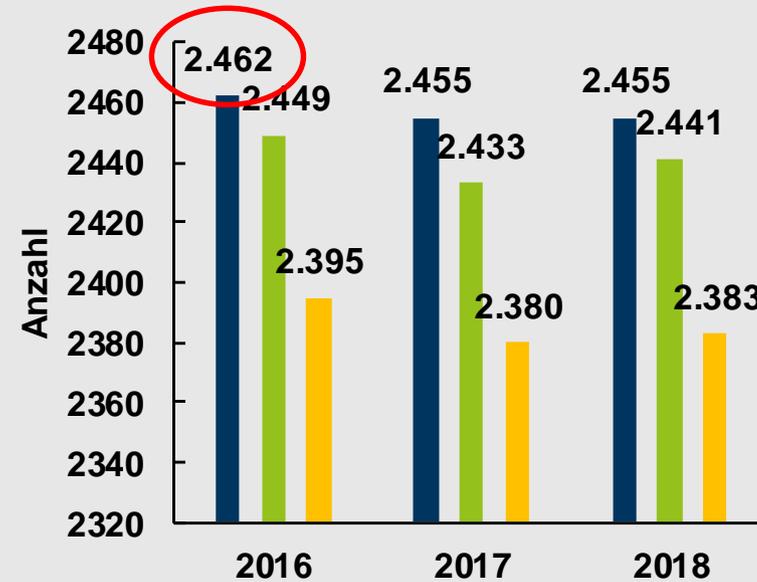
Ökonomische Betrachtung

Betriebsstunden des A-LAES

Basis KW Westfalen



Ideallastgang



Legende

- Mögliche Einspeicherstunden
- Genutzte Ausspeicherstunden

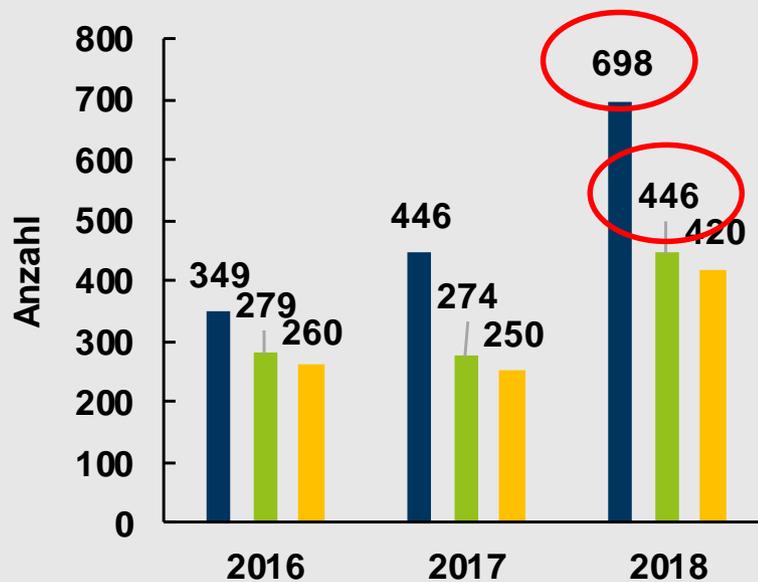
- Genutzte Einspeicherstunden

Ergebnisse

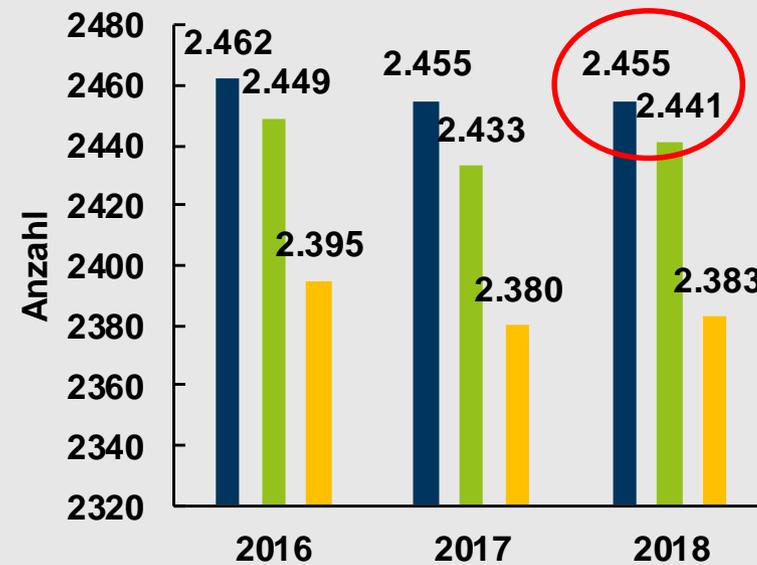
Ökonomische Betrachtung

Betriebsstunden des A-LAES

Basis KW Westfalen



Ideallastgang



Legende

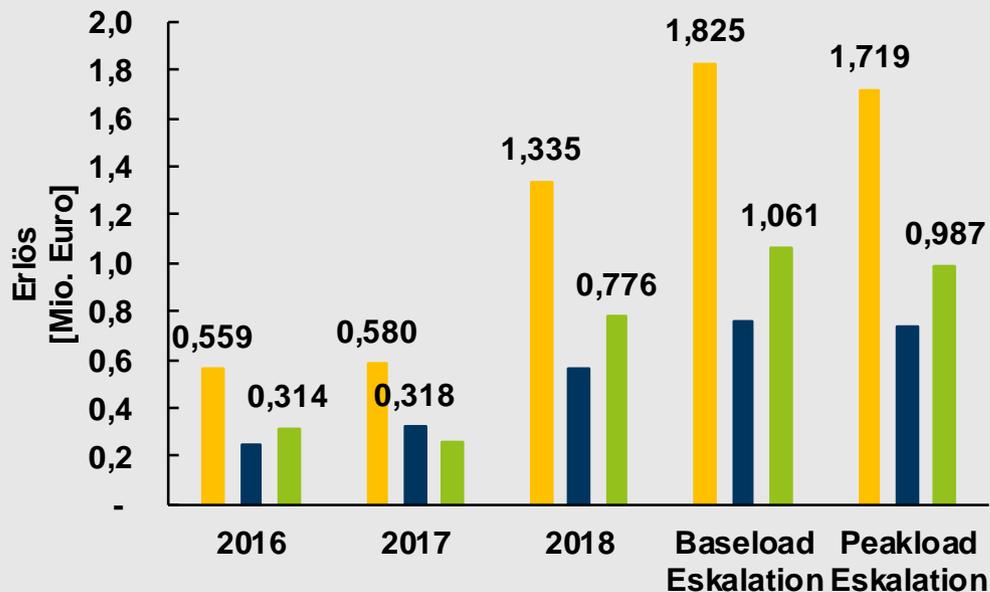
- Mögliche Einspeicherstunden
- Genutzte Einspeicherstunden
- Genutzte Ausspeicherstunden

Ergebnisse

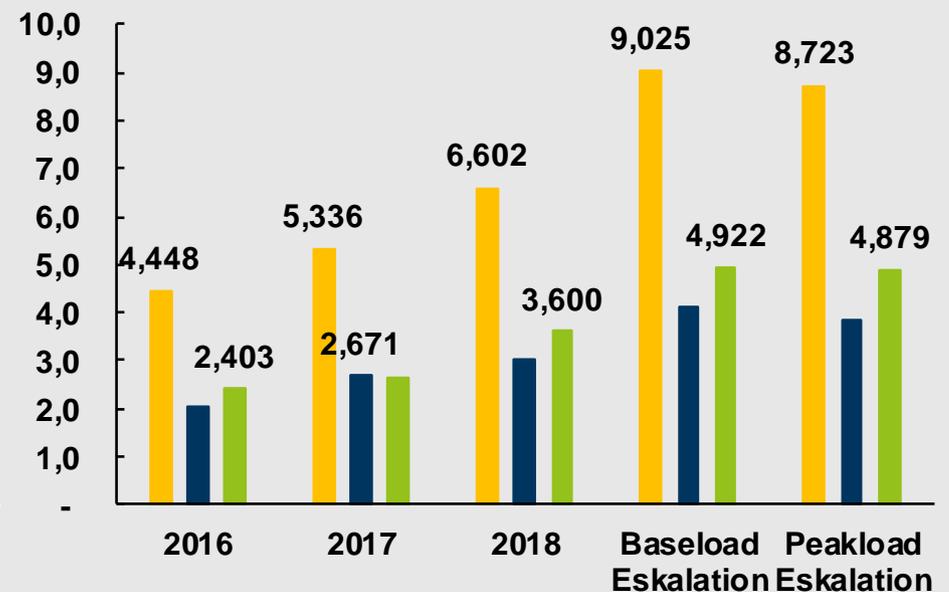
Ökonomische Betrachtung

Erzielte Erlöse des A-LAES an den Spotmärkten

Basis KW Westfalen



Ideallastgang



Legende

■ Erzielter Gesamterlös

■ Erlös Day-Ahead Spotmarkt

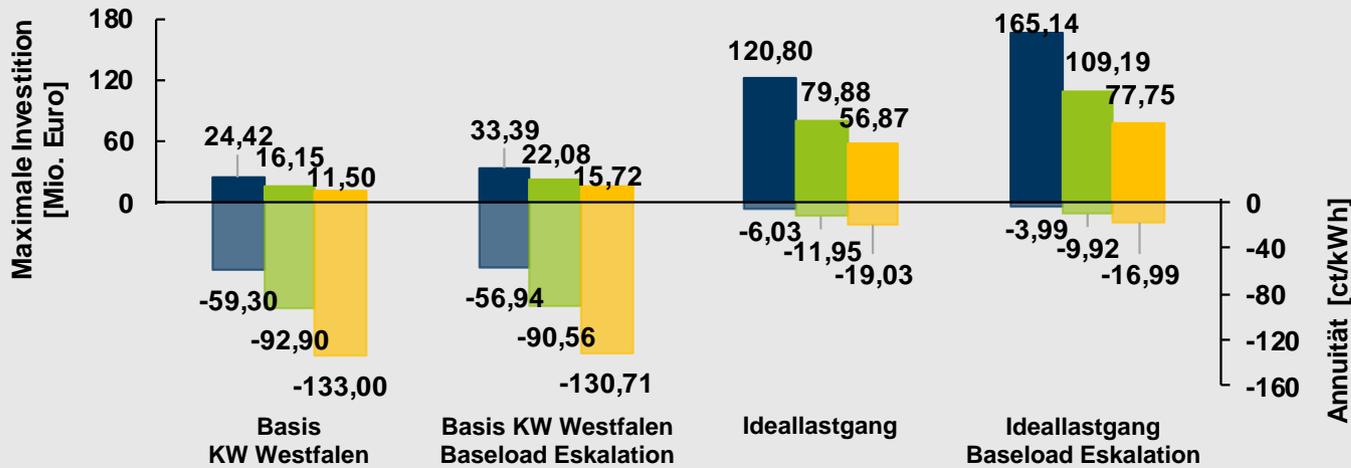
■ Erlös Intraday Spotmarkt

Ergebnisse

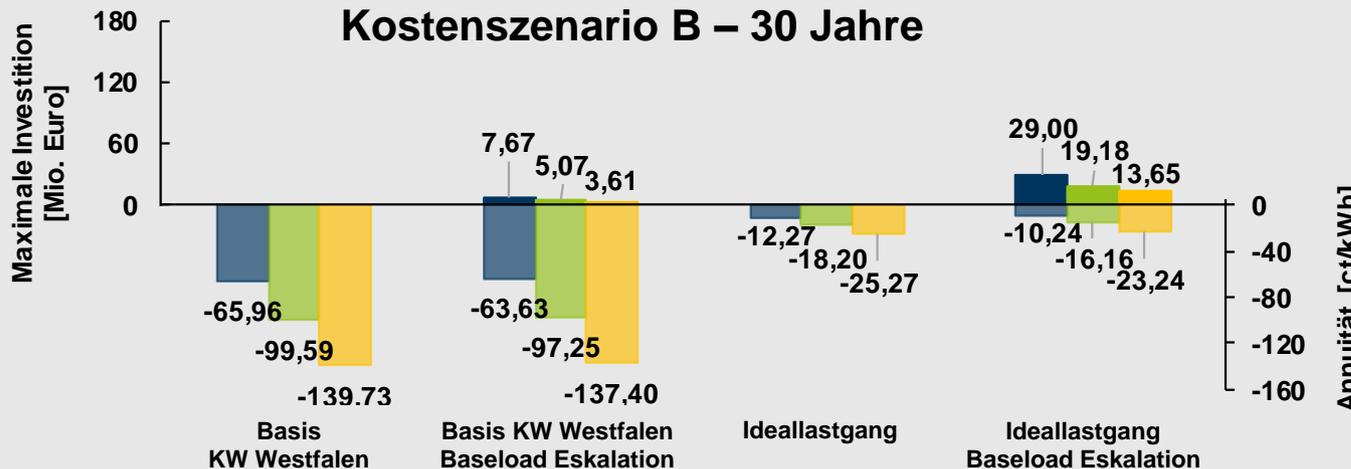
Ökonomische Betrachtung

Berechnete Annuitäten und maximale Investitionen

Kostenszenario A – 30 Jahre



Kostenszenario B – 30 Jahre



Legende

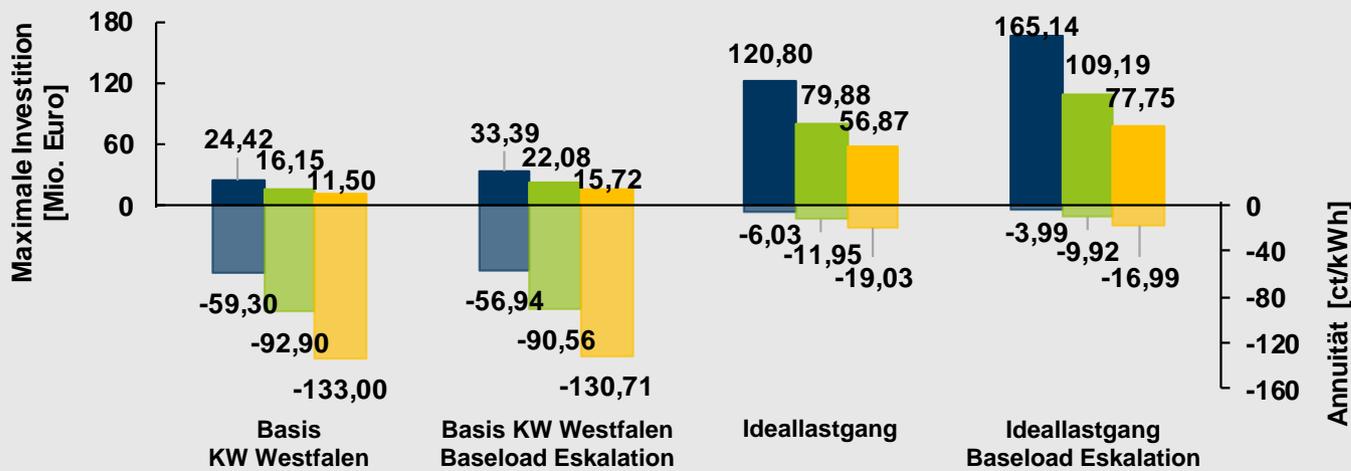
- Zinssatz 2 %
- Zinssatz 6 %
- Zinssatz 10 %

Ergebnisse

Ökonomische Betrachtung

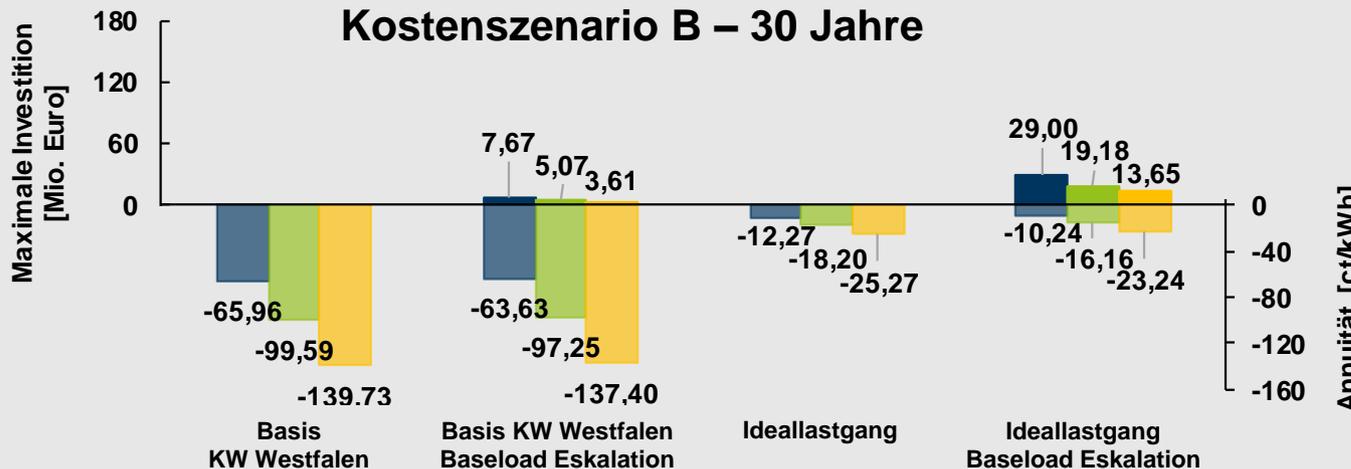
Berechnete Annuitäten und maximale Investitionen

Kostenszenario A – 30 Jahre



Kostenszenario A:
Keine Berücksichtigung von Kosten für die Strom-einspeisung des A-LAES

Kostenszenario B – 30 Jahre



Legende

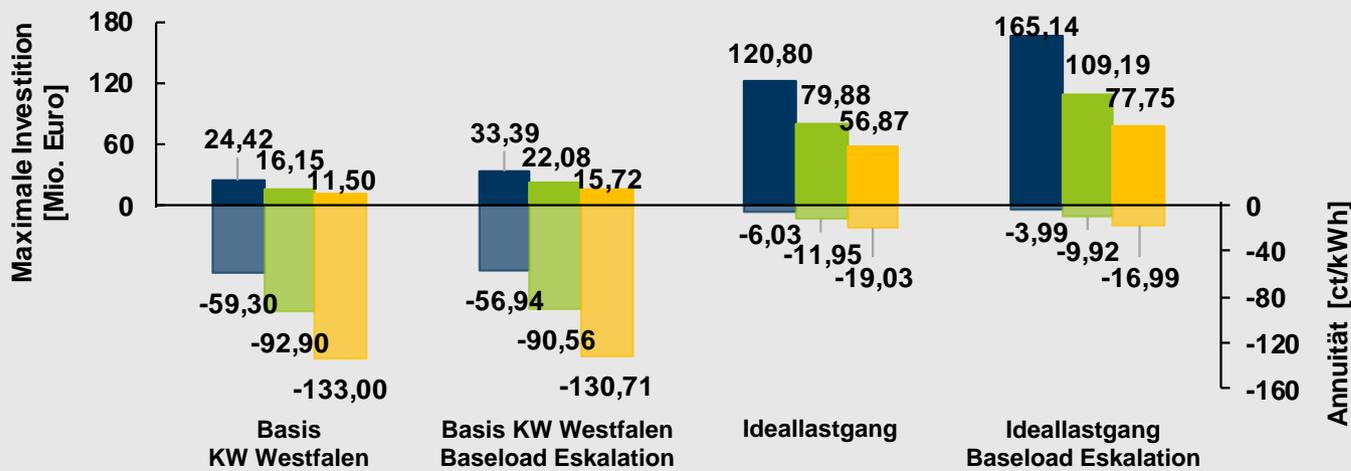
- Zinssatz 2 %
- Zinssatz 6 %
- Zinssatz 10 %

Ergebnisse

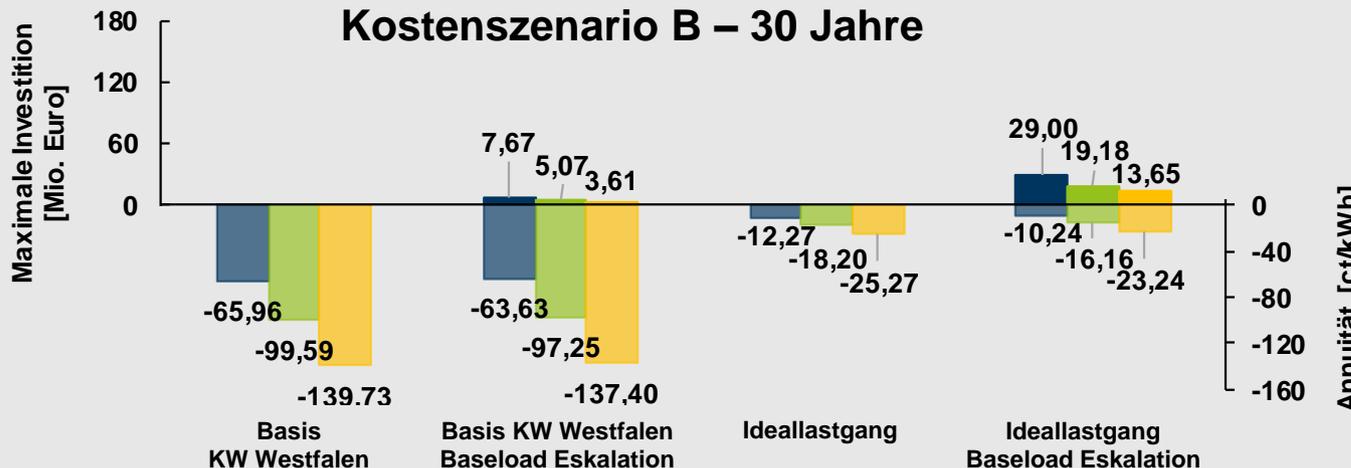
Ökonomische Betrachtung

Berechnete Annuitäten und maximale Investitionen

Kostenszenario A – 30 Jahre



Kostenszenario B – 30 Jahre



Kostenszenario A:
Keine Berücksichtigung von Kosten für die Strom-einspeisung des A-LAES

Kostenszenario B:
Berücksichtigung anteiliger Betriebskosten des KW für die Strom-einspeisung des A-LAES

Legende

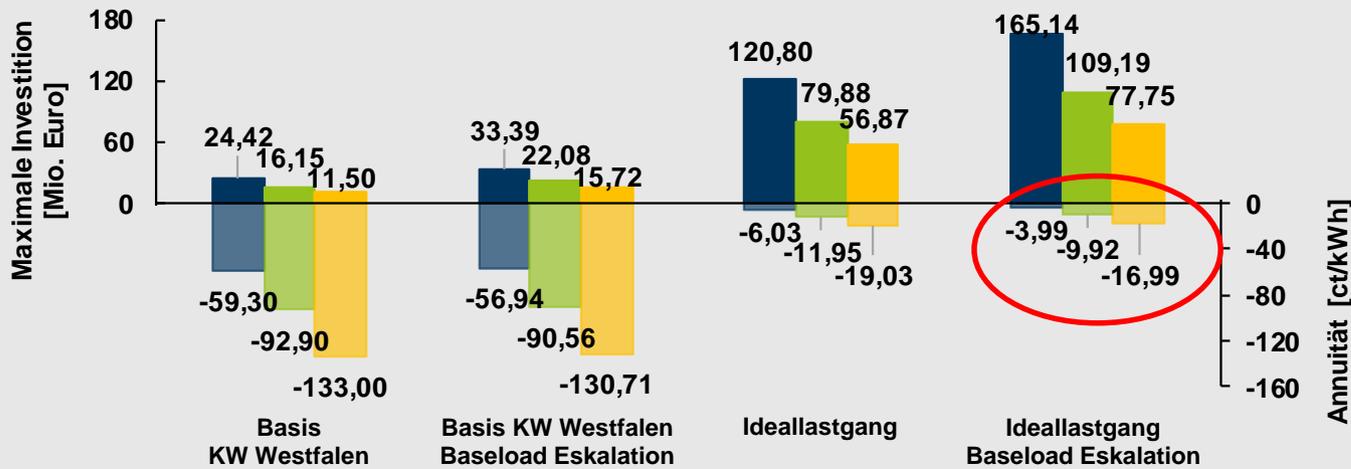
- Zinssatz 2 %
- Zinssatz 6 %
- Zinssatz 10 %

Ergebnisse

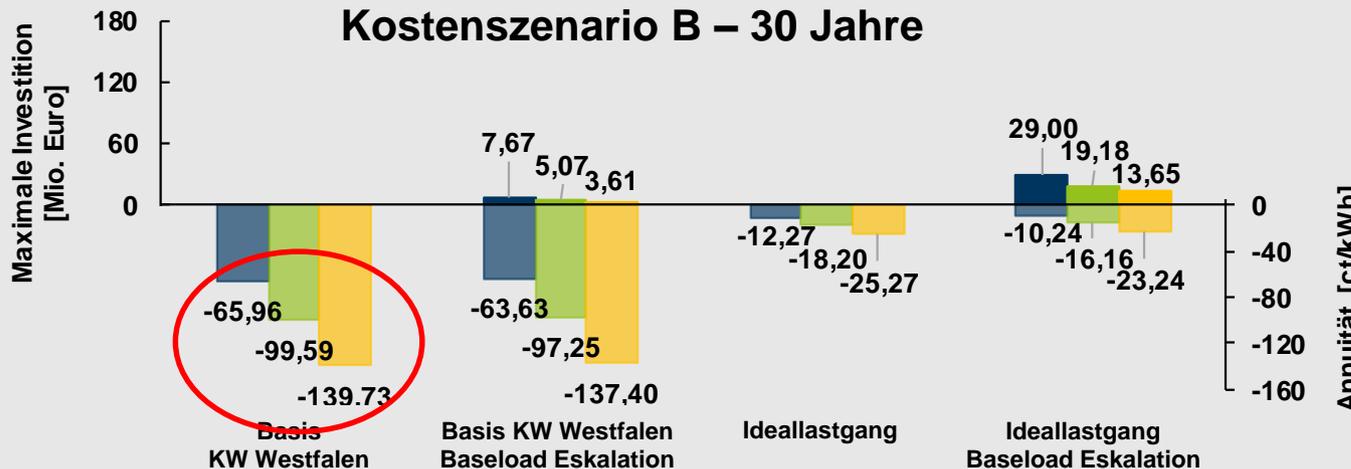
Ökonomische Betrachtung

Berechnete Annuitäten und maximale Investitionen

Kostenszenario A – 30 Jahre



Kostenszenario B – 30 Jahre



Kostenszenario A:
Keine Berücksichtigung von Kosten für die Strom-einspeisung des A-LAES

Kostenszenario B:
Berücksichtigung anteiliger Betriebskosten des KW für die Strom-einspeisung des A-LAES

Legende

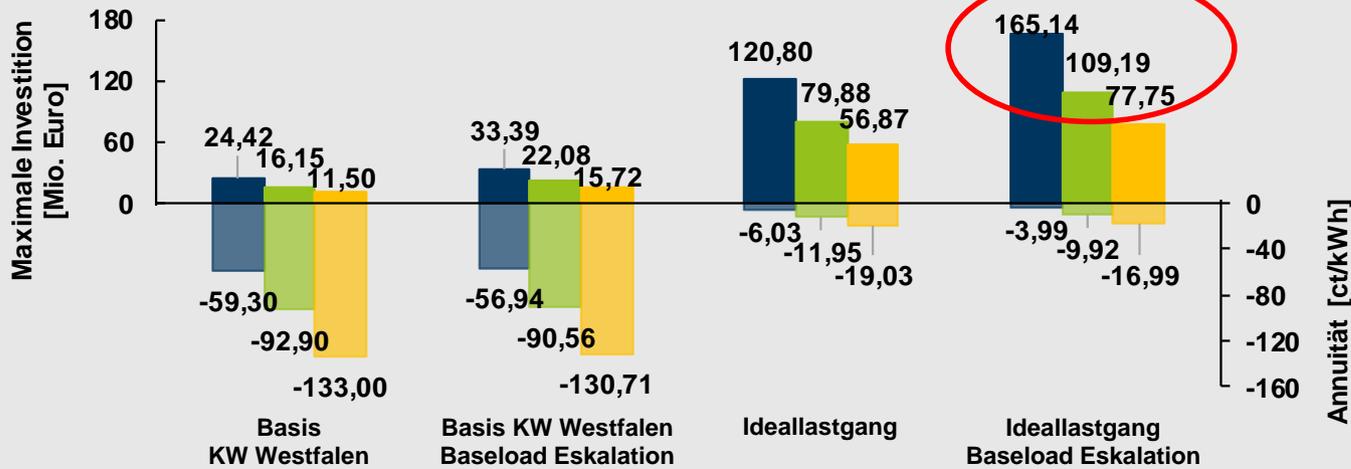
- Zinssatz 2 %
- Zinssatz 6 %
- Zinssatz 10 %

Ergebnisse

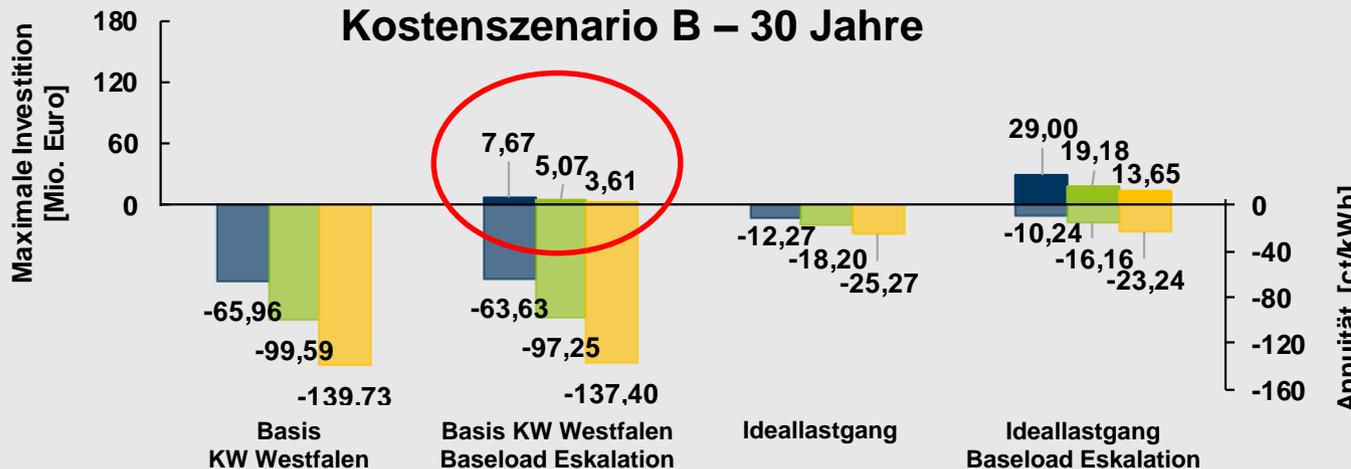
Ökonomische Betrachtung

Berechnete Annuitäten und maximale Investitionen

Kostenszenario A – 30 Jahre



Kostenszenario B – 30 Jahre



■ Kostenszenario A:

Keine Berücksichtigung von Kosten für die Strom-einspeisung des A-LAES

■ Kostenszenario B:

Berücksichtigung anteiliger Betriebskosten des KW für die Strom-einspeisung des A-LAES

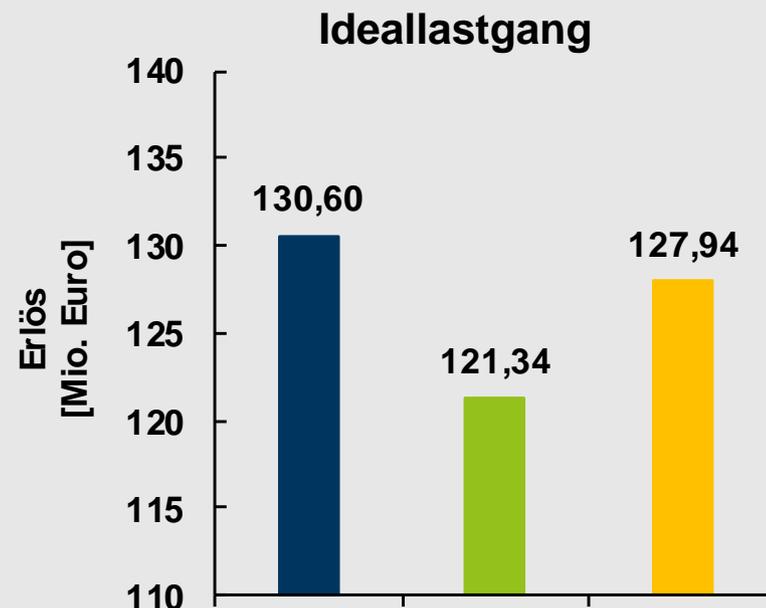
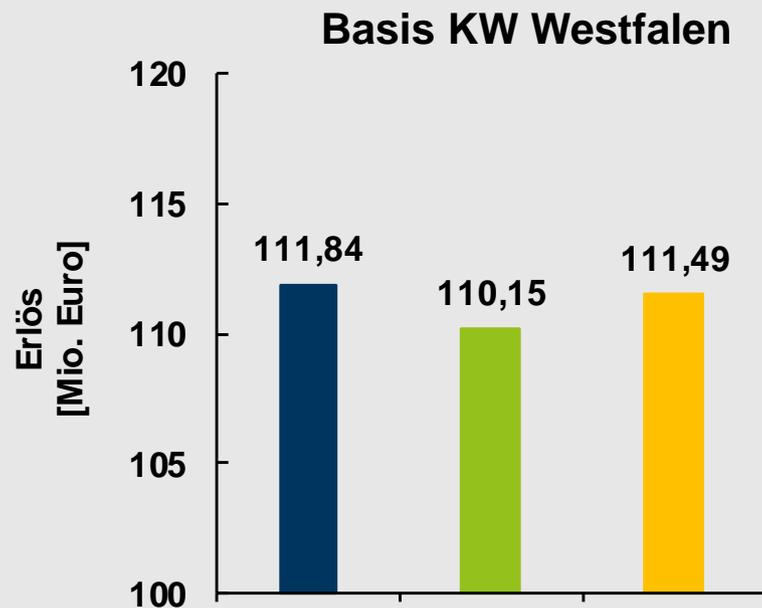
Legende

- Zinssatz 2 %
- Zinssatz 6 %
- Zinssatz 10 %

Ergebnisse

Ökonomische Betrachtung

Jährliche Erlöse nach Betriebsart im Jahr 2018



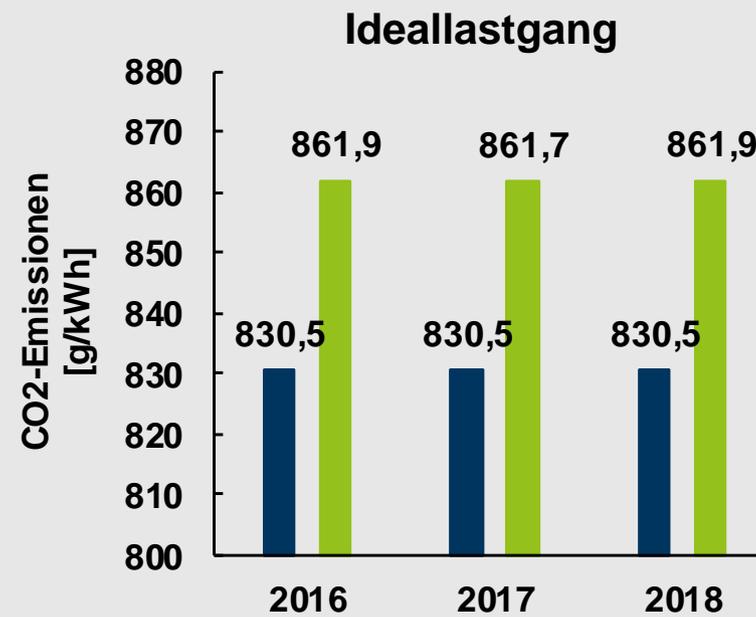
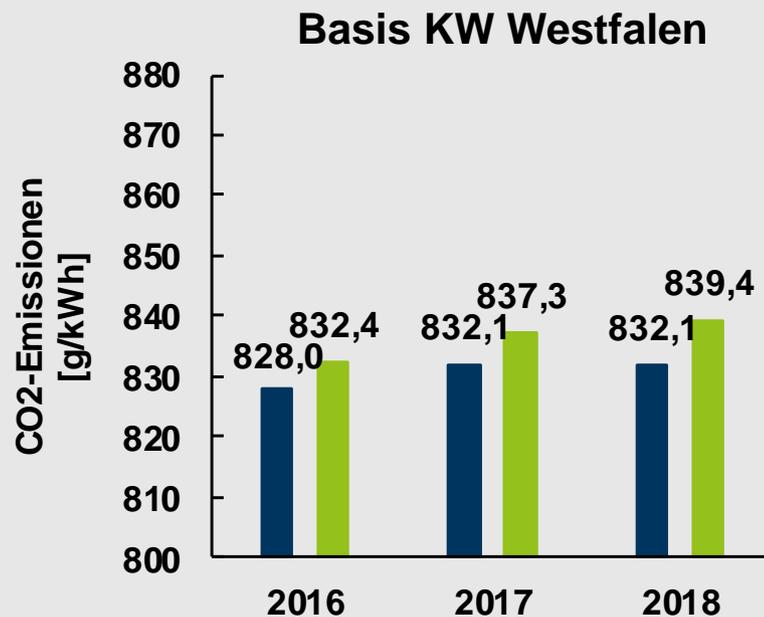
Legende

- Erlöse KW bei alleinigem Betrieb
- Erlöse KW abzgl. Elektrischer Energie der Einspeicherung
- Erlöse Kombination KW und A-LAES

Ergebnisse

Ökologische Betrachtung

CO₂-Emissionen bei Betrachtung KW und A-LAES



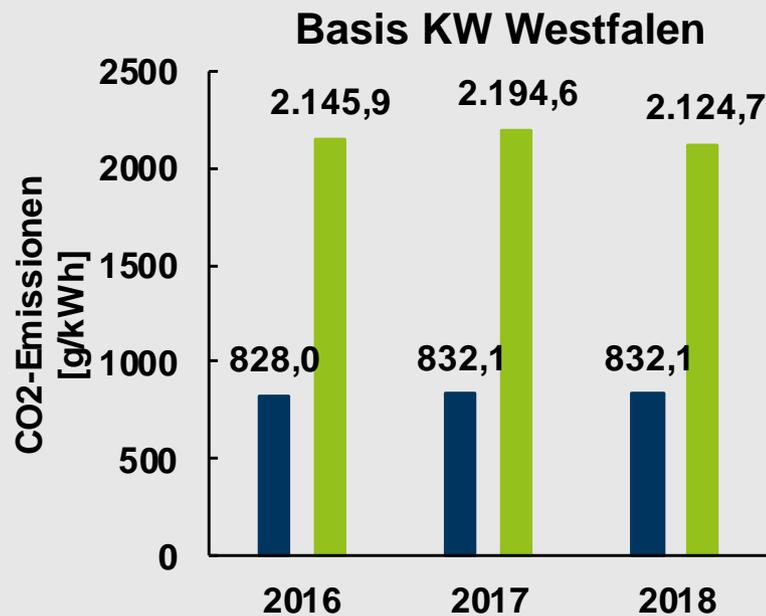
Legende

- Durchschnittliche CO₂-Emissionen des alleinigen Kraftwerksbetriebs
- Durchschnittliche CO₂-Emissionen des kombinierten Betriebs Kraftwerk + Speicher

Ergebnisse

Ökologische Betrachtung

CO₂-Emissionen bei Betrachtung A-LAES



Legende

- Durchschnittliche CO₂-Emissionen des alleinigen Kraftwerksbetriebs
- Durchschnittliche CO₂-Emissionen des alleinigen Speicherbetriebs

Ökonomische und ökologische Betrachtung

Steinkohlekraftwerk mit gekoppeltem A-LAES

Einleitung

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

Methodik und Rahmenbedingungen

- Methodik
- Rahmenbedingungen der jährlichen Betriebssimulation

Ergebnisse

- Ökonomische Betrachtung des Flüssigluftenergiespeichers
- Ökologische Betrachtung des Flüssigluftenergiespeichers

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

- Anlagenkombination aus Steinkohlekraftwerk und A-LAES generiert geringeren jährlichen Erlös als alleiniger Betrieb des Steinkohlekraftwerkes.
- Wirkungsgrad des A-LAES bedingt einen höheren Bedarf an Strompreisunterschieden an den Spotmärkten.
- In keinem Szenario können die hohen Investitionen des A-LAES durch dessen Erlöse dargestellt werden.
- Festlegung des Untersuchungssystems für Bewertung der CO₂-Emissionen entscheidend.
- Bei gemeinsamer Betrachtung des Kraftwerks und des A-LAES ist der Einfluss des zusätzlichen Speicherbetriebs auf die CO₂-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde gering. Dies ist auf die geringere Leistung des A-LAES (50 MW) im Vergleich zum RKW-NRW (555 MW) zurückzuführen.
- Bei alleiniger Betrachtung des A-LAES führt der Wirkungsgrad (50,43 %) zu einem deutlichen Anstieg der CO₂-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausblick

- Durch eine Senkung der Investitionen und eine Erhöhung des Wirkungsgrades, könnten sich positiv zu bewertende Anwendungsmöglichkeiten des A-LAES ergeben.
- Für Kombinationen des A-LAES mit erneuerbaren Energieerzeugungstechnologien sind dessen ökonomischer und vor allem ökologischer Mehrwert zu untersuchen.
- Die entwickelte jährliche Betriebssimulation kann durch Anpassungen für weitere Kombinationen aus Erzeugungs- und Speichertechnologie zur Durchführung von realitätsnahen ökonomischen und ökologischen Bewertungen verwendet werden.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages