

# Verfahrensentwicklung für dezentrale adiabate Druckluftspeicherkraftwerke (Mini-CAES)

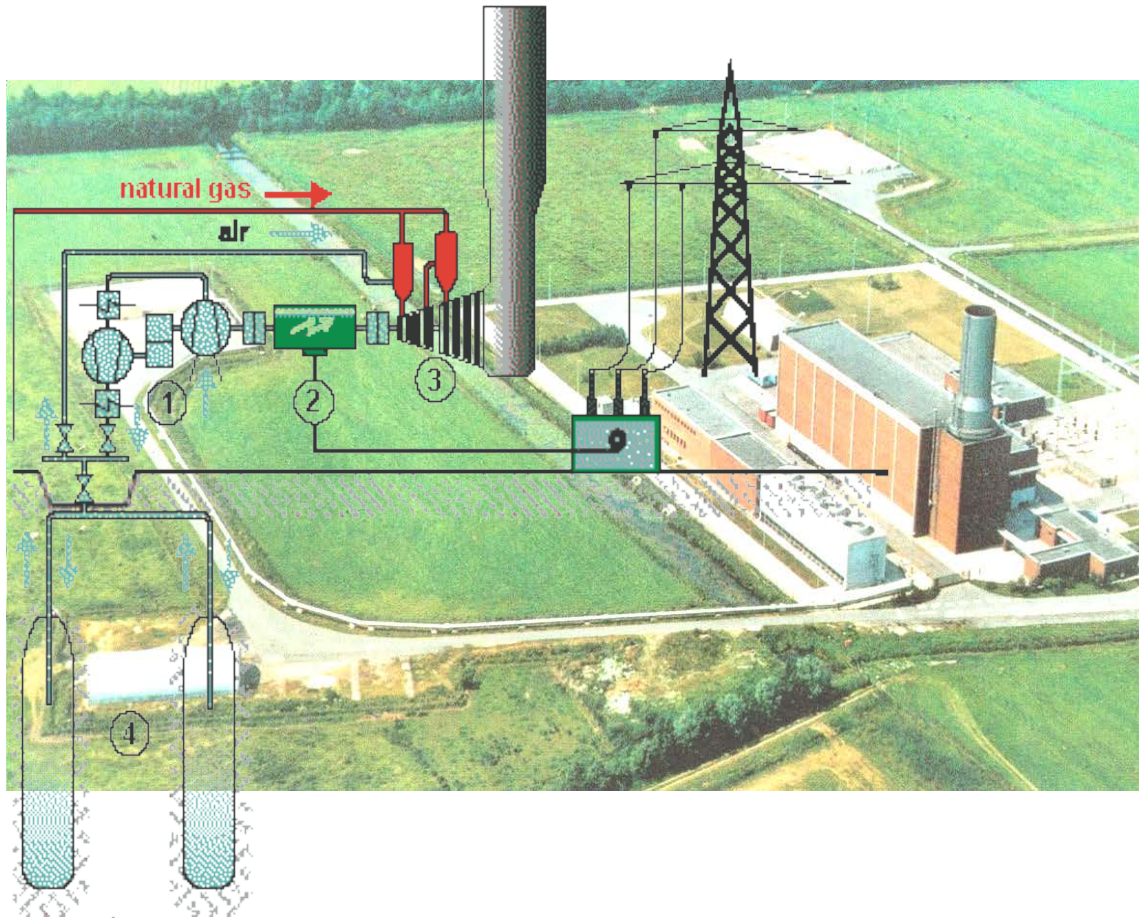
*Thermodynamik-Kolloquium 2014*

Dr.-Ing. Michael Krüger  
Marc Schwarzenbart  
Dr.-Ing. Stefan Zunft

Wissen für Morgen



# Einführung Diabatisches (“konventionelles“) CAES



- Huntorf, D (E.ON)
- 321 MW (2h)
- 310000 m<sup>3</sup>
- 46 – 66 bar
- In Betrieb seit 1978,  
Turbinenretrofit in 2007

## Diabatic CAES



- McIntosh, Alabama  
(AEC)
- 110 MW
- 570000 m<sup>3</sup>
- 45-75 bar
- Betrieb seit 1991

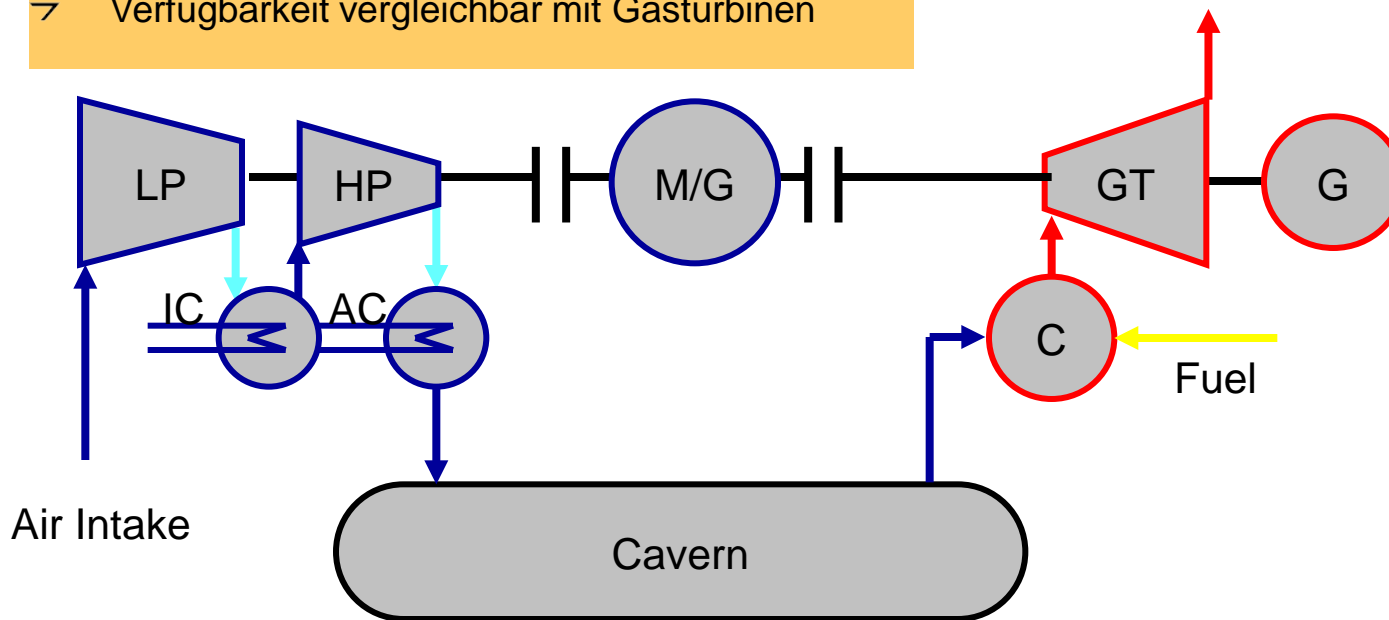


# Einführung

## Diabatisches (“konventionelles“) CAES

- einfache Bauweise, erprobte Komponenten
- Betriebserfahrung (300 MW) seit 1978
- Verfügbarkeit vergleichbar mit Gasturbinen

- ausschließlich Hybridbetrieb möglich
- Wirkungsgrad auf ca. 40 % beschränkt

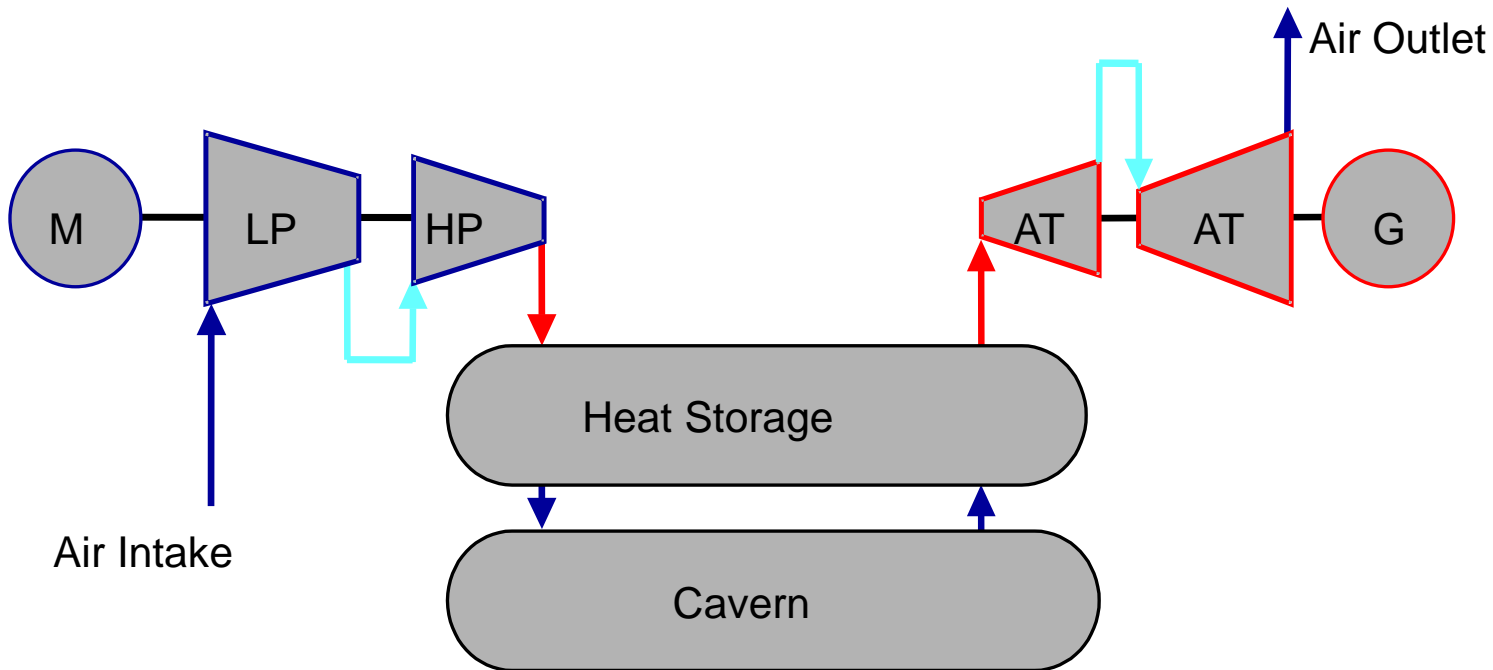


# Einführung

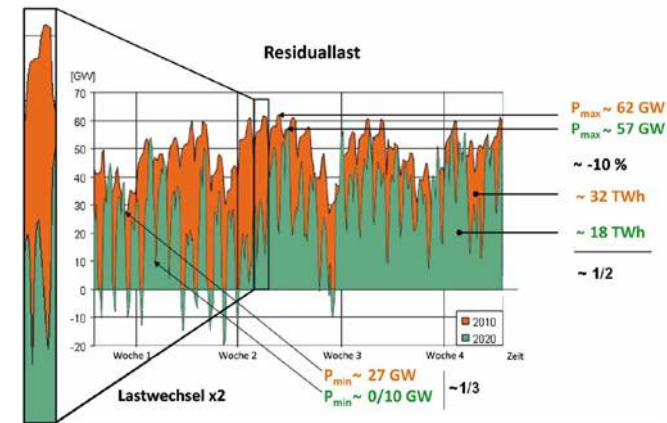
## Adiabatisches CAES

- reine Speichertechnologie, lokal emissionsfrei
- hohe Wirkungsgrade > 70 % erreichbar

- benötigt Wärmespeicher
- anspruchsvolle Randbedingungen für den Verdichter



# Motivation



## Gründe für Stromspeicher:

- Fluktuierende Stromproduktion durch die erneuerbaren Energien: Über- und Unterproduktion müssen in Einklang gebracht werden!
  - Stabilisierung der Netzfrequenz
  - Versorgungssicherheit
  - Maximierung des Anteils der erneuerbaren Energieträger
- „Stromveredelung“: Speicherung von Schwachlaststrom und Verkauf zu Spitzenlastzeiten

## Gründe für Neuentwicklungen von Stromspeichertechnologien:

- Vorhandene Kapazität deckt nicht den zukünftigen Bedarf
- Neubaukapazität herkömmlicher Stromspeicher (PSKW) begrenzt



# Motivation

## **Elektrizitätswirtschaft**

- Mögliche Geschäftsfelder: Spotmarkt, Intraday-Markt, Regelleistungsmärkte (Primär-, Sekundär-, Minutenreserve), Redispatch
- Gegenwärtig sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht gegeben, um große Stromspeicher zu installieren
- Mini-CAES als Einstieg bzw. Technologiedemonstration

## **Stadtwerke**

- Flexiblere Kraftwerkseinsatzplanung
- Teilnahme an o.g. Strommärkten

## **Industrie**

- Reduzierung des Leistungspreises
- Flexiblere Einsatzplanung großer Energieverbraucher
- Teilnahme an o.g. Strommärkten



## Zielgrößen für Mini-CAES

- Leistung: 10-30 MW<sub>el</sub>
- Anfahrzeiten Entladevorgang: je nach Geschäftsmodell  
(Regelenergiemarkt: 1 bis 15 Minuten, Intraday-Markt: > 45 Minuten)
- Belade-/Entladezeiten: 5 bis 6,5 / 4 bis 5,5 Stunden
- Kraftwerksnettowirkungsgrade: > 60 %
- Modulgröße: Containerbauweise für Industrie/Stadtwerke vorteilhaft
- Kosten: z.Zt. nicht im Fokus (Anwendungsmöglichkeiten vielseitig, energiepolitischen Rahmenbedingungen in Bearbeitung)



# Vorgehen

## Voruntersuchungen:

- Ziel: Systemvergleich hinsichtlich Prozessführung
- Ergebnis: Mehrstufige Prozesse wg. niedrigerem Temperaturniveau im Speicher bei vergleichbaren Wirkungsgrades vorteilhaft. Varianten mit elektrischem Booster lohnen sich energetisch nicht!

## Detailuntersuchungen:

- Ziel: Vergleichende Bewertung mehrstufiger Verschaltungsoptionen mit unterschiedlichen Speichertechnologien
- Vorgehen:
  - Komponentenauswahl
  - Konzeption von Varianten mit Schwerpunkt auf Anzahl der Druckstufen und Speichertechnologien
  - Modellerstellung und Systembetrachtungen mit EBSILON®*Professional*
  - Validierung anhand des Druckluftspeicherkraftwerks Hundedorf
  - Parameterstudien hinsichtlich wesentlicher Einflussgrößen
  - Systemsimulation mit optimierten Parametern





# Hauptkomponenten – Verdichter und Expander

## - **Kolbenmaschinen**

- Erzielbarer Druck und Massenstrom ausreichend
- Austrittstemperatur der Luft (bauartbedingt) auf 150 °C bis max. 220 °C begrenzt
- ungeeignet

## - **Strömungsmaschinen**

- Erzielbarer Druck und Massenstrom ausreichend
- Maximale Luftaustrittstemperatur unproblematisch
- geeignet



# Hauptkomponenten – Thermische Speicher

## Zweitankwärmespeicher

- Wärmespeicherfluid
  - VP-1 (synthetisches Öl)
    - Zersetzungstemperatur  $\sim 390\text{ °C}$
  - HITEC (Salzschmelze)
    - Erstarrungstemperatur  $\sim 150\text{ °C}$
    - Zersetzungstemperatur  $\sim 520\text{ °C}$
- Wärmeübertrager
  - Rohrbündelwärmeübertrager



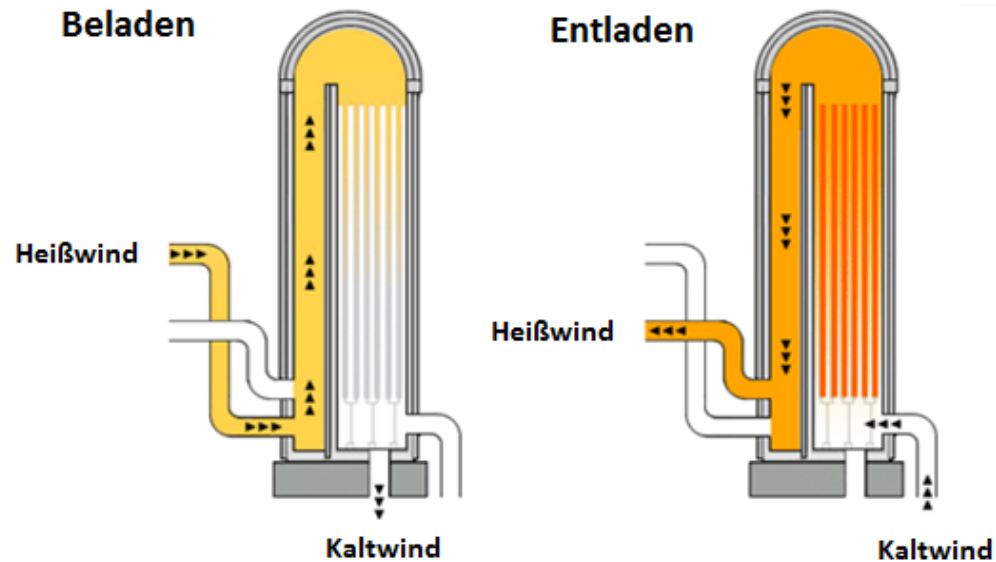
Quelle: Andasol



# Hauptkomponenten – Thermische Speicher

## Regeneratorspeicher

- Wärmespeicher (druckfest)
  - Vielseitige Wärmespeichermaterialien zur Auswahl  
Feuerfest, Feinkeramik, Natursteine, Ziegel, etc.
  - Schüttung / Formsteine
- Direkt durchströmt  
→ Kein Wärmeübertrager benötigt!



# Hauptkomponenten – Druckluftspeicher

- Realisierte Druckluftspeicherkraftwerke (Huntorf, McIntosh) sowie Großprojekte (ADELE-ING) sehen Salzkavernen vor  
→ für Mini-CAES ungeeignet
- Suche nach Alternativen im Bereich der Erdgaslagerung und dem Transport  
→ **Röhrenspeicher**



Quelle: [www.ewb.ch](http://www.ewb.ch)



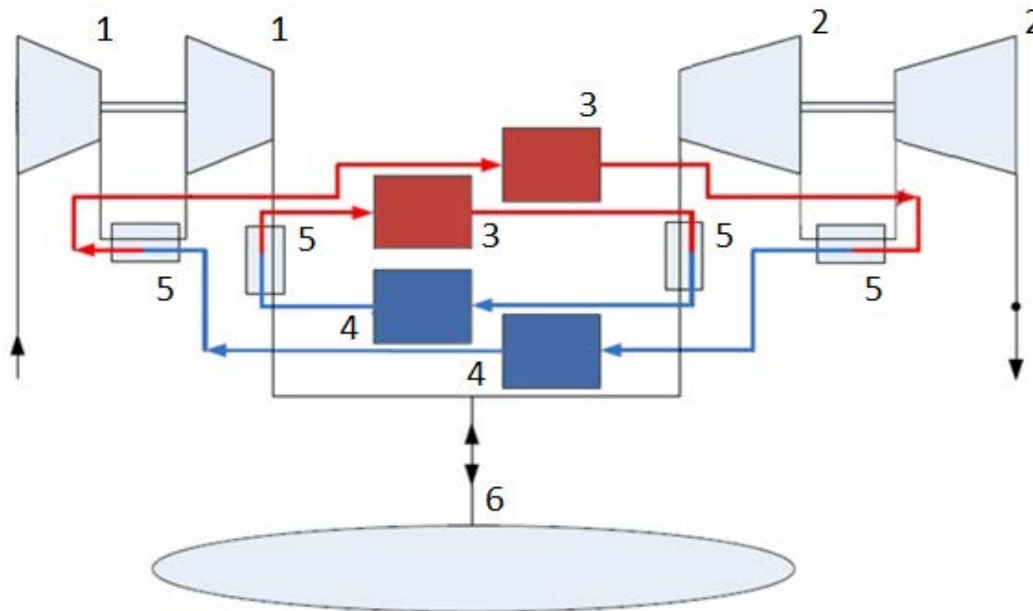
Quelle: [www.energie.de](http://www.energie.de)



# Kraftwerkskonzepte (Konzept 1)

## Zweistufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit Zweitankwärmespeichern

- Wärmespeicher:
  - synthetisches Öl (Therminol VP-1)
  - Salzschnmelze (HITEC)
- Verdichtung bis auf ~180 bar (5.000 m<sup>3</sup>) bzw. ~110 bar (10.000 m<sup>3</sup>)



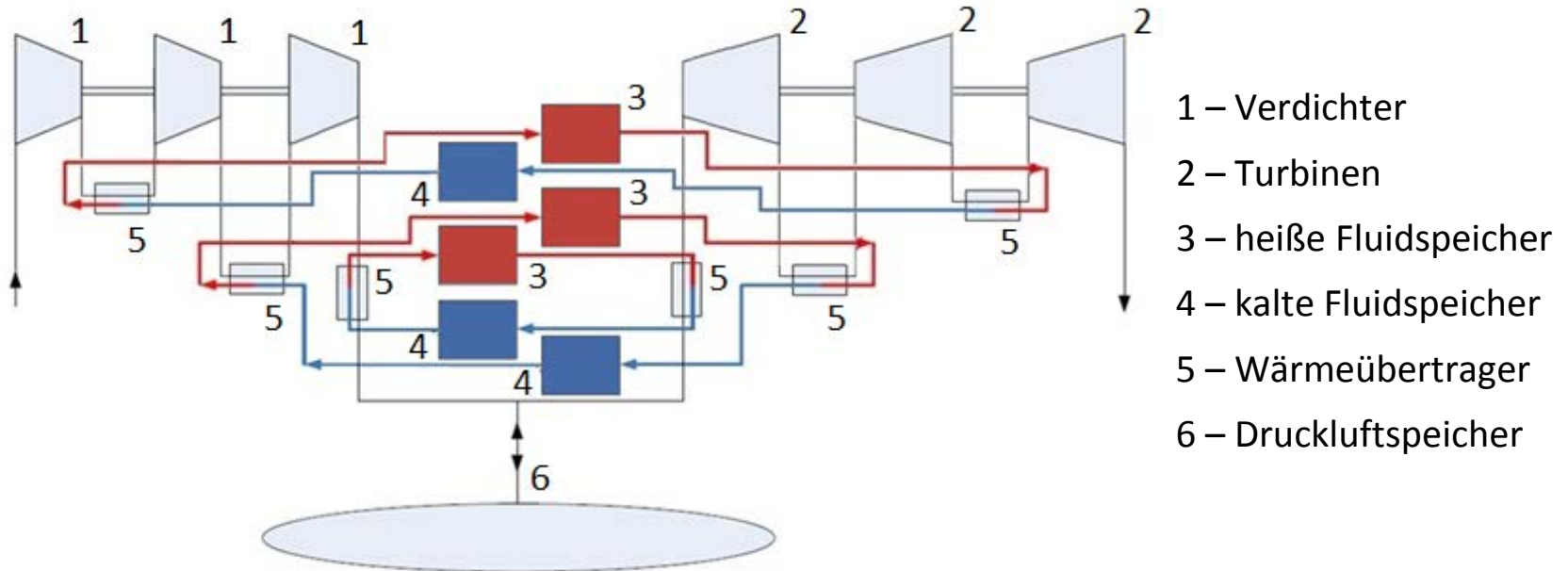
- 1 – Verdichter
- 2 – Turbinen
- 3 – heiße Fluidspeicher
- 4 – kalte Fluidspeicher
- 5 – Wärmeübertrager
- 6 – Druckluftspeicher



## Kraftwerkskonzepte (Konzept 2)

### Dreistufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit Zweitankwärmespeichern

- Wärmespeicher:
  - synthetisches Öl (Therminol VP-1)
  - Salzschnmelze (HITEC)
- Verdichtung bis auf ~180 bar (5.000 m<sup>3</sup>) bzw. ~110 bar (10.000 m<sup>3</sup>)





# Parameterstudien: Übersicht

## Konzept 1 u .2 (reine Fluidwärmespeicherkonzepte)

- Variation der Druckverhältnisse
- isentrope Wirkungsgrad der Verdichtung und der Expansion
- Grädigkeit der Wärmeübertrager
- minimale/maximale Fluidtemperatur des Wärmespeichermaterials
- Kühlung der Fluide durch Kühlaggregate
- Druckabfall im Wärmeübertrager

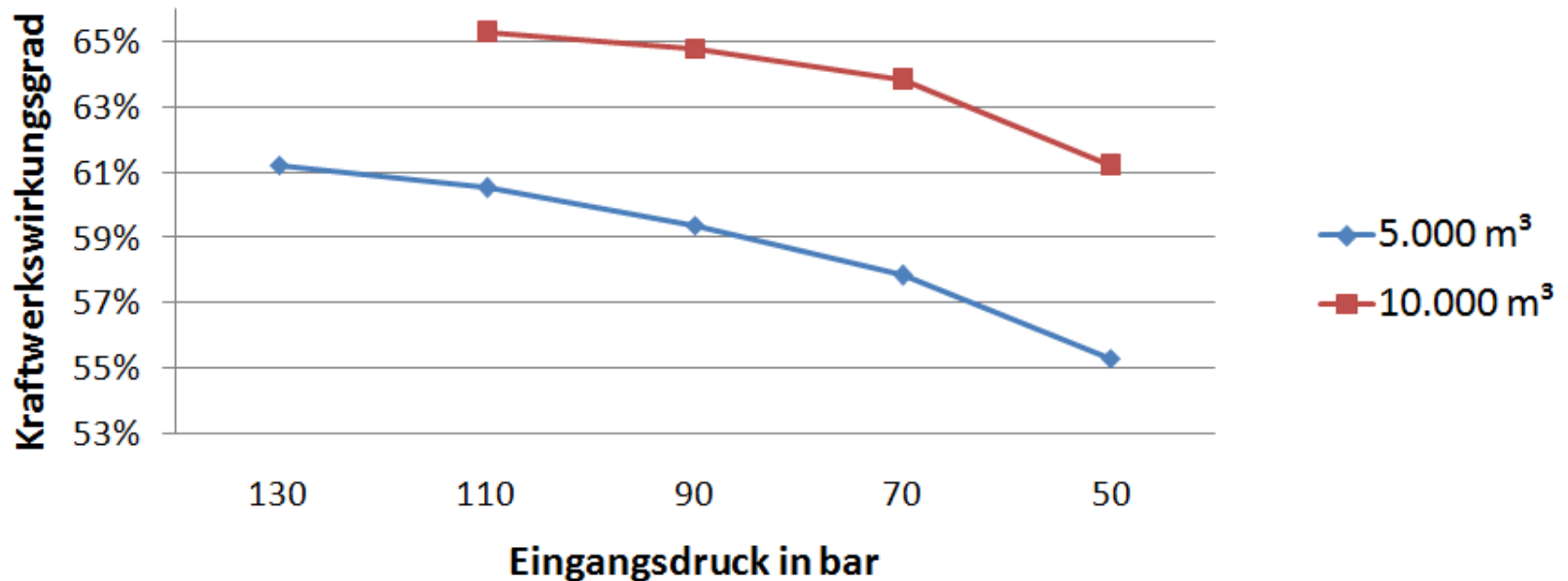




# Parameterstudien: Ergebnisse

## Eintrittsdruck der HD-Turbine

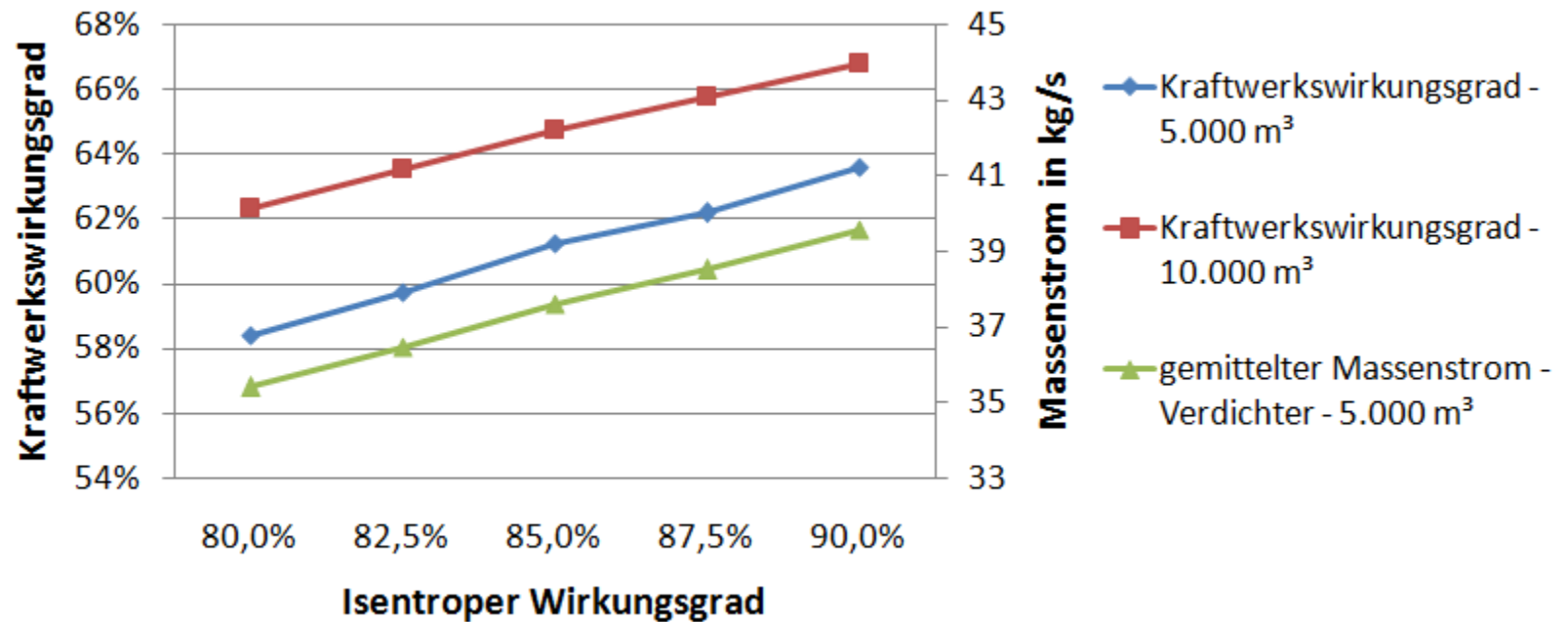
**Konzept 1:** Zweistufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit Zweitankwärmespeichern (VP-1)



# Parameterstudien: Ergebnisse

## Isentroper Wirkungsgrad des Verdichters

**Konzept 1:** Zweistufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit Zweitankwärmespeichern (VP-1)



# Parameterstudien: Übersicht

## Konzept 3 (mit Regenerator)

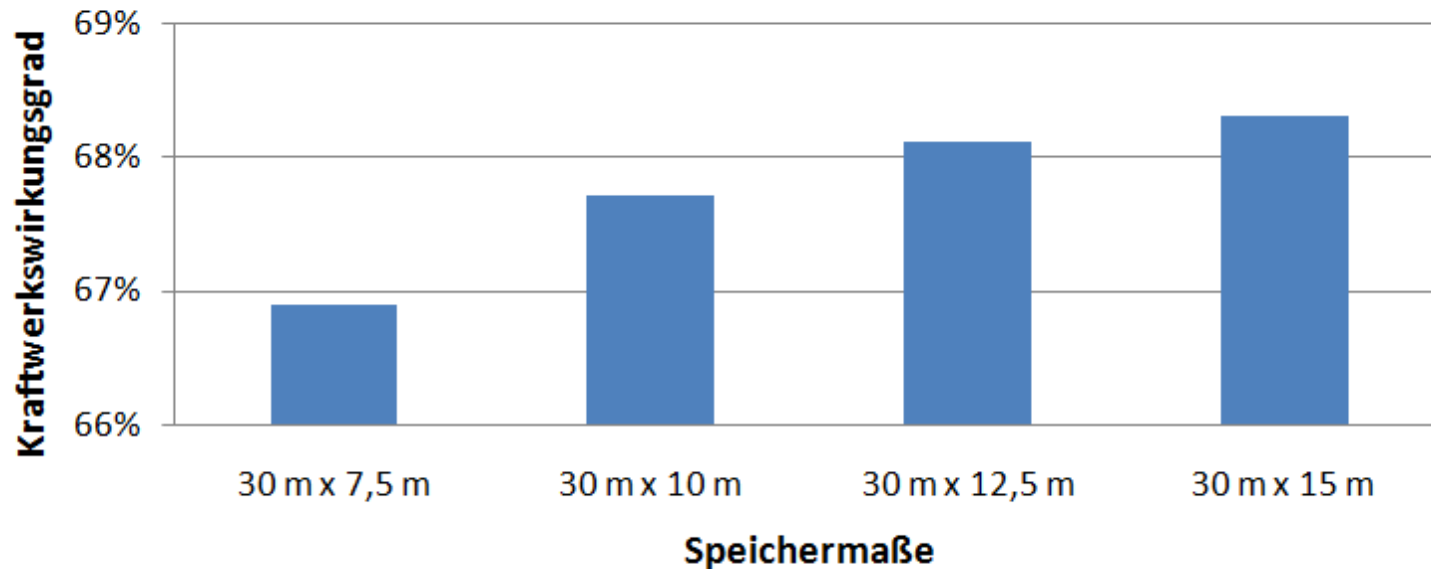
- Dimensionen des Regeneratorspeichers (Durchmesser und Höhe)
- Eintrittstemperatur in den HD-Verdichter
- ND-Druckbereich
- Auslegungstemperatur der ND-Turbine



# Parameterstudien: Ergebnisse

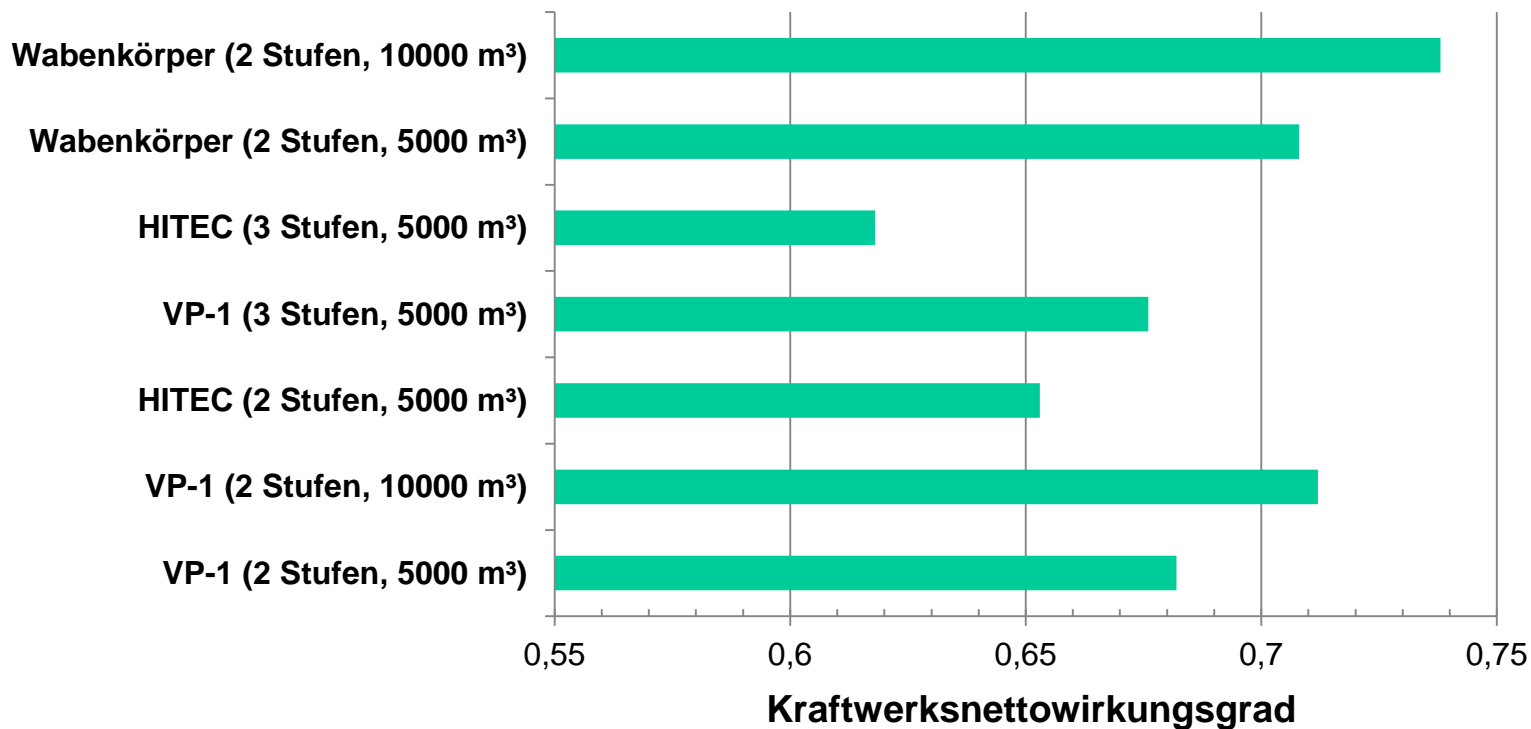
## Regeneratorspeicherdurchmesser

**Konzept 3:** Zweistufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit Zweitank- (VP-1) und Regeneratorwärmespeicher (keramische Kugeln)



# Parameterstudien: Ergebnisse

## Systemsimulation mit optimierten Parameter



# Zusammenfassung und Ausblick

## Mini-CAES aussichtsreiche Technologie

- zum Einstieg in die Demonstration für große EVU
- zur Spitzenlastdeckung für die Industrie
- Verbesserung der wirtschaftlichen Erlössituation von Stadtwerken

## Wesentliche Ergebnisse aus den Detailuntersuchungen

- 2-stufige Verdichtung ist einer 3-stufigen vorzuziehen
- Das synthetische Öl VP-1 erwies sich als leistungsfähiger als die Salzschmelze HITEC.
- Ein Regeneratorspeicher im ND-Bereich ist energetisch von Vorteil.
- **Favorisierte Leitkonzept:**  
2-stufiges Druckluftspeicherkraftwerk mit 2-Tank-HD-Speicher (Öl) und ND-Regeneratorspeicher:  
→ Wirkungsgrade > 70 % schon bei 5000 m<sup>3</sup> Druckluftspeichervolumen

## Ausblick

- Investitionskosten ermitteln

