

Vortragsreihe am Energiecampus Nürnberg, 8. Februar 2023

Carnot-Batterien als flexible Energiespeicherlösung der Zukunft?

Stand der Forschung und mögliche Anwendungen

Maximilian Weitzer

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg

Tel: +49 (0) 911 5302 99022

E-Mail: maximilian.weitzer@fau.de



Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik

- Seit 2011 auf dem AEG Gelände in Nürnberg
- Rund 25 Mitarbeiter/innen

Forschungsschwerpunkte



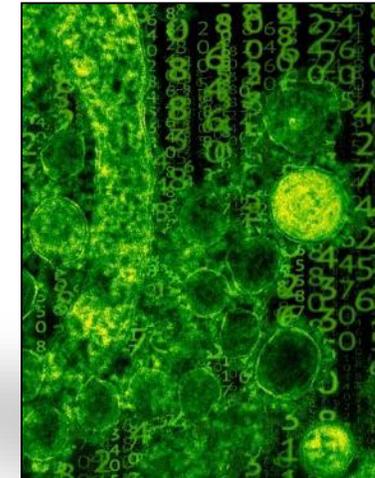
Biomass Combustion
and Gasification 



Second Generation Fuels
and Fuel Cells



Energy Systems and
Economy



Bioelectrocatalysis and
Future Energy Systems

Agenda

- I. Warum brauchen wir Energiespeicher?
- II. Wie funktionieren Carnot-Batterien?
- III. Aktueller Stand der Forschung
- IV. Anwendungen für Carnot-Batterien
- V. Fallstudie im Rahmen des EnCN-Projekts

... und warum Carnot-Batterien?

Speicher in Zeiten der Energiekrise

Energiespeicher

Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

Presse

Inflationsrate im Jahr 2022 bei +7,9 %

Inflationsrate schwächt sich im Dezember 2022 ab, bleibt aber mit +8,6 % auf hohem Stand

Die **Energieprodukte** verteuerten sich 2022 [...] um **34,7 %**, [...] kräftige Preiserhöhungen bei der Haushaltsenergie (**+39,1 %**) [...] leichtes Heizöl (**+87,0 %**) und Erdgas (**+64,8 %**) [...] Strom **20,1 %** [...] Kraftstoffe verteuerten sich im Jahresdurchschnitt um **26,8 %**

Statistisches Bundesamt, 17.01.2023

ENERGIEKRISE

Drohender Engpass – Region in Deutschland muss Strom sparen

Nordkurier, 15.01.2023

Bier-Gipfel mit dem Kanzler
Brauerei-Chef fürchtet bis zu 7,50 Euro für halben Liter Bier

Focus, 01.02.2023

Explodierende Strom- und Gaspreise: Energiekrise bedroht deutsche Unternehmen

Merkur, 6.10.2021

STROMSPEICHER

Grosse Batterien sind gefragt

Handelszeitung.ch, 27.01.2023

ENERGIEWENDE

Erleben Pumpspeicherkraftwerke jetzt ihren Durchbruch?

Handelsblatt, 26.01.2023

- Entwicklungen: Ausbau Erneuerbarer, Kohle- und Atomausstieg, Gekürzte Gaslieferungen
- Selbstverständlichkeit der Energieversorgung
- Speicher können nicht alle Probleme lösen

Von Dunkelflauten zu Blackouts

Energiespeicher

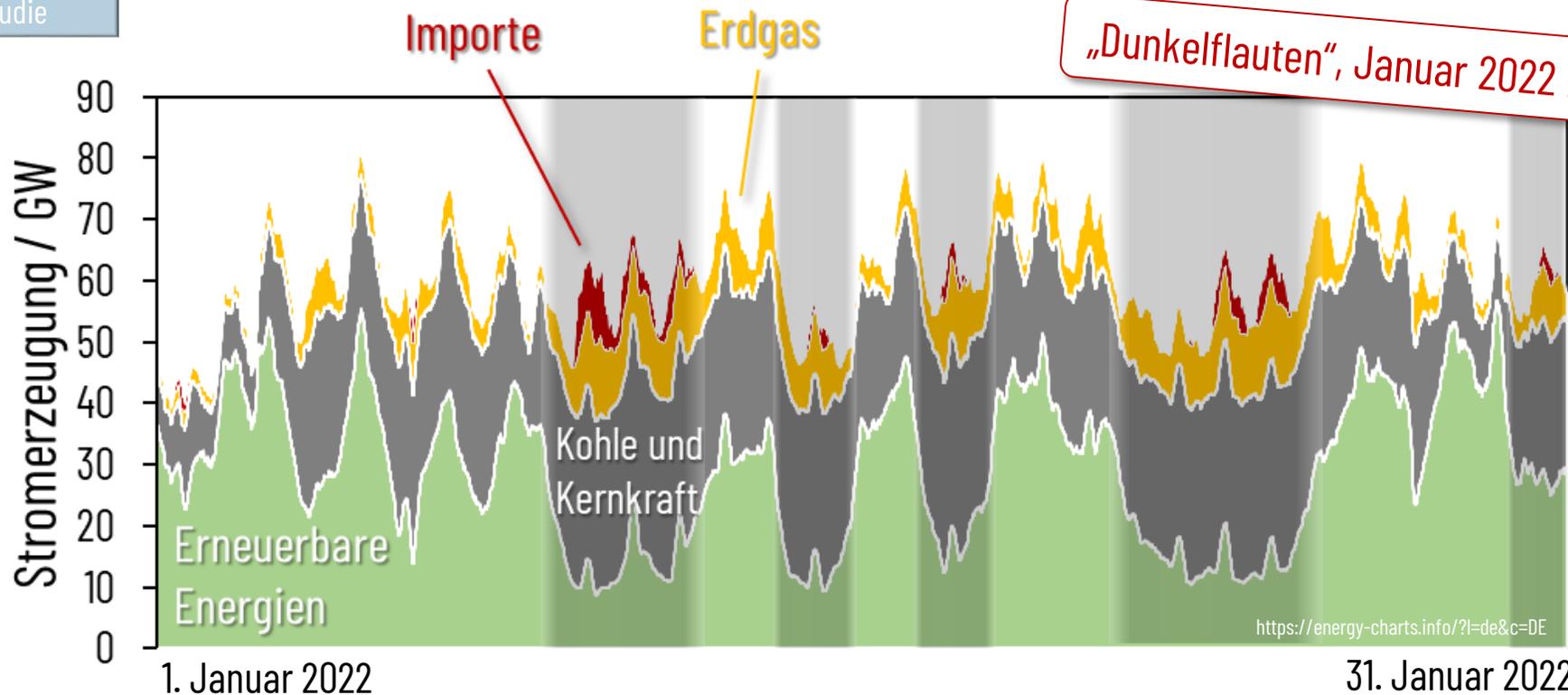
Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

- **Fluktuierende Stromerzeugung** aus Erneuerbaren Energien benötigt Speicherlösungen
- Derzeitige Situation auf den Energiemärkten (*Gasknappheit, geplanter Atom- und Kohleausstieg*) verschärft Relevanz netzdienlicher Energiespeichern
- Ohne Gegenmaßnahmen können **Dunkelflauten** zu **Blackouts** führen

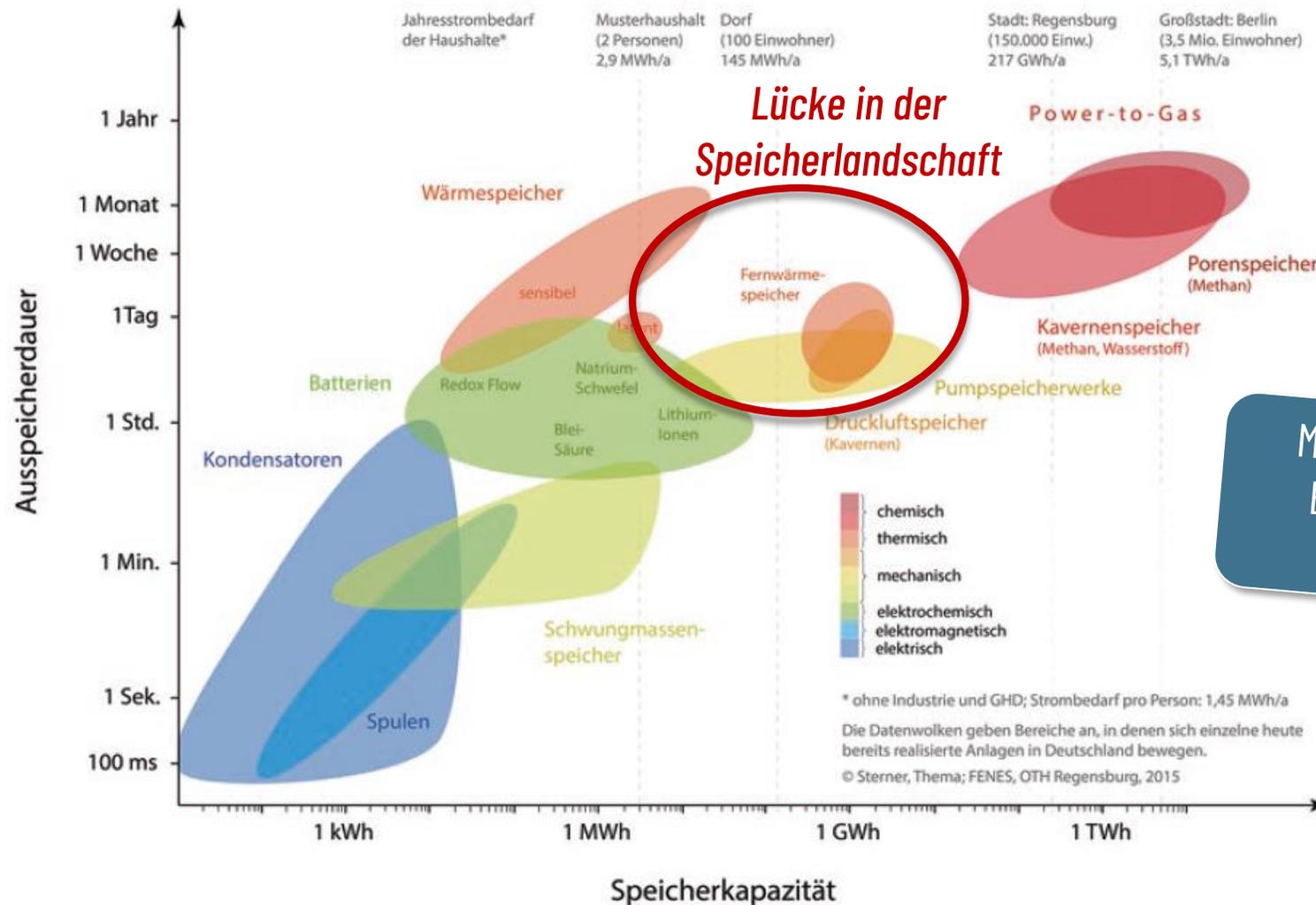


„Dunkelflauten“, Januar 2022 in Deutschland

Dunkelflaute:
Mehrtägige Phase mit geringer Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien

... aber welcher Speicher ist der Richtige?

- Energiespeicher
- Funktionsprinzip
- Aktuelle Forschung
- Anwendungen
- Fallstudie



Mit dem Ausbau Erneuerbarer steigt Bedarf an Speicherkapazität UND Speicherdauer

Wir brauchen einen Speichertechnologie-Mix für verschiedene Speicheraufgaben

Verschiedene Speicheraufgaben

... erfordern verschiedene Speichertechnologien

Energiespeicher

Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

Grundlastfähige Speicher

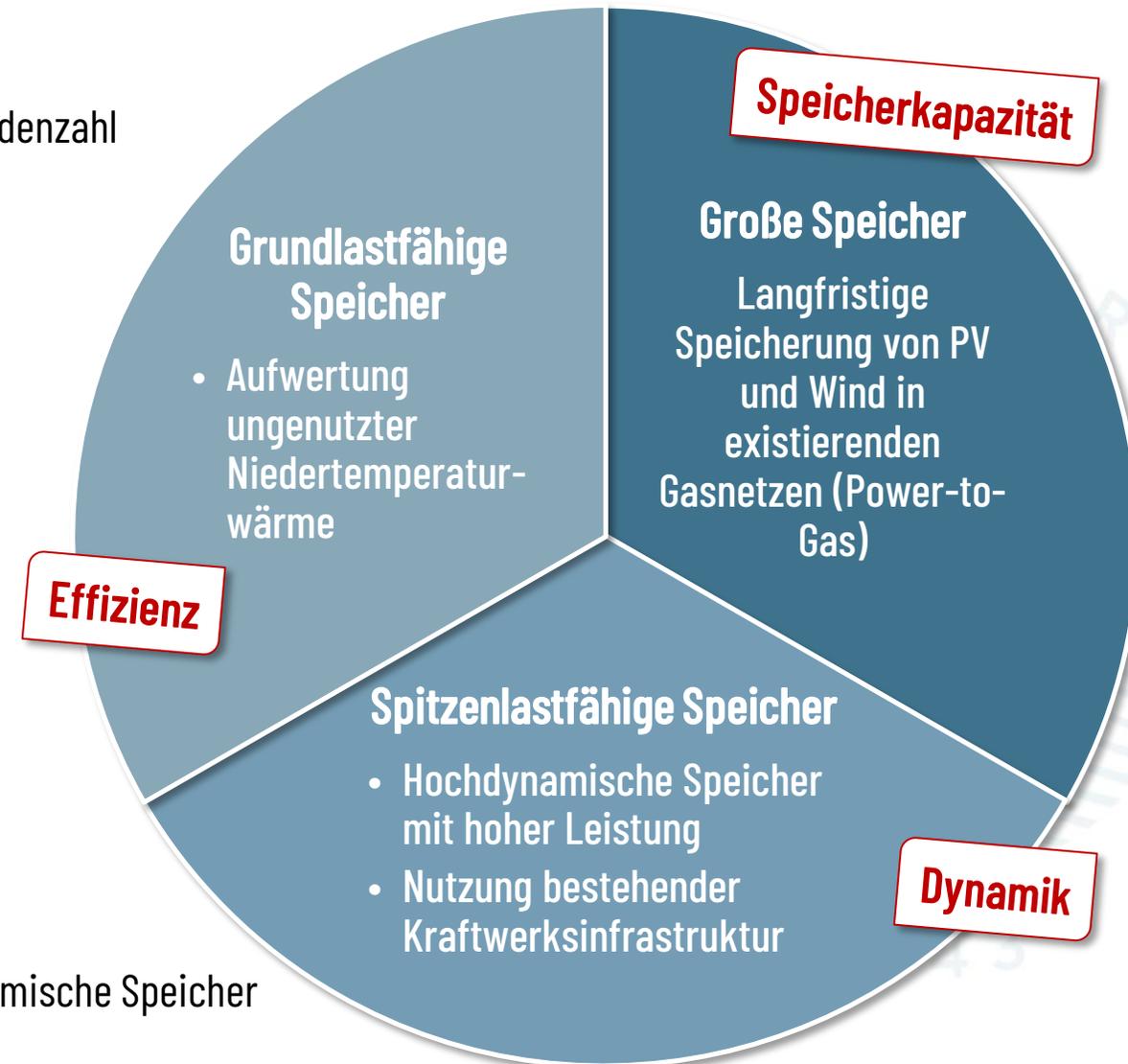
- Kurzzeitspeicher (Tag-Nacht-Shift) mit hoher Betriebsstundenzahl
- State-of-the-art:
 - Pumpspeicherkraftwerke
 - Druckluftspeicher
 - Lithium-Batterien

Spitzenlastfähige Speicher

- Starke Lastgradienten erfordern hohe Ein- und Ausspeicherleistungen
- z.B. Hochtemperaturspeicher (Carbonatspeicher)

Systeme mit großen Speicherkapazitäten

- Längere Phasen ohne Wind/Sonne („Dunkelflaute“)
- Von **Carnot-Batterien** bis zu Second Generation Fuels /chemische Speicher



Funktionsprinzip Carnot-Batterie

Energiespeicher

Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

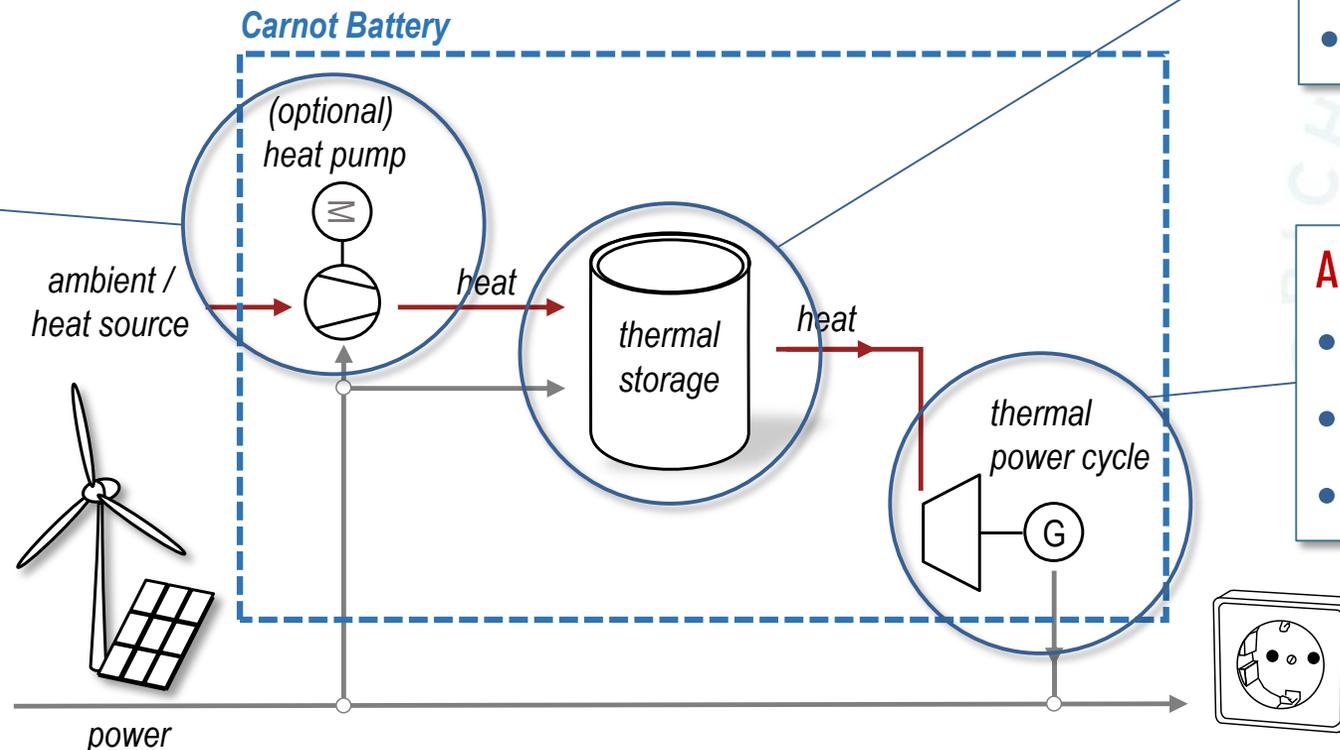
- Speicherung von **erneuerbarem Überschussstrom** in Form von **Wärme**
- Rückverstromung durch **Wärme kraftprozess**
- Reversibler Prozess ermöglicht Verwendung der gleichen Komponenten
- Optional: Integration von (industrieller) Abwärme zur Erhöhung der Effizienz

Speicher

- Heißwasser
- Gestein
- Salzschnmelze

Einspeichern

- Elektrisch Heizen
- Wärmepumpe



Ausspeichern

- Dampfkraftprozess
- Organic Rankine Cycle
- Gasturbinenprozess

Carnot-Wirkungsgrad

Energiespeicher

Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

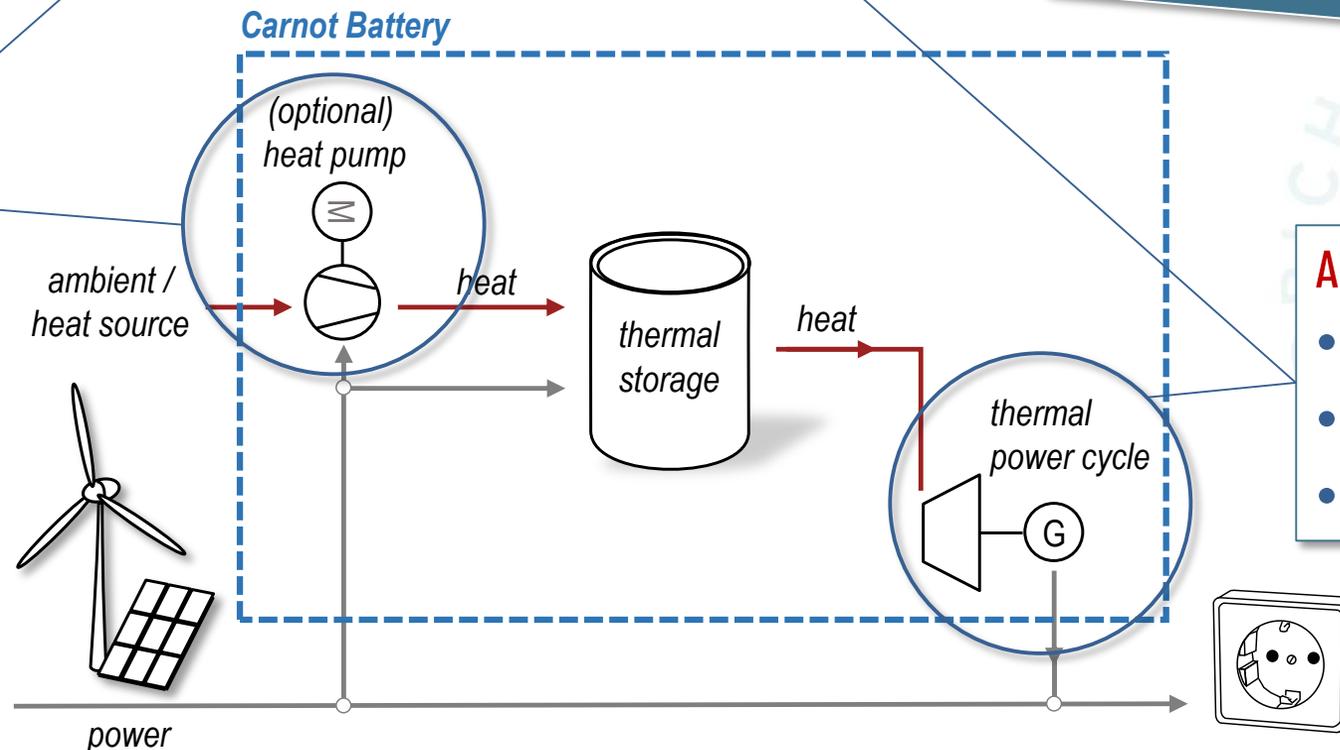
- Carnot-Wirkungsgrad = **theoretisch maximal möglicher Wirkungsgrad** von thermischen Kreisprozessen
- Optional: Integration von (industrieller) Abwärme zur Erhöhung der Effizienz

$$\eta_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{speicher}}}{T_{\text{speicher}} - T_{\text{umgebung}}} \cdot \frac{T_{\text{speicher}} - T_{\text{umgebung}}}{T_{\text{speicher}}} = 100\%$$

... wenn die Verluste nicht wären

Einspeichern

- Elektrisch Heizen
- Wärmepumpe



Ausspeichern

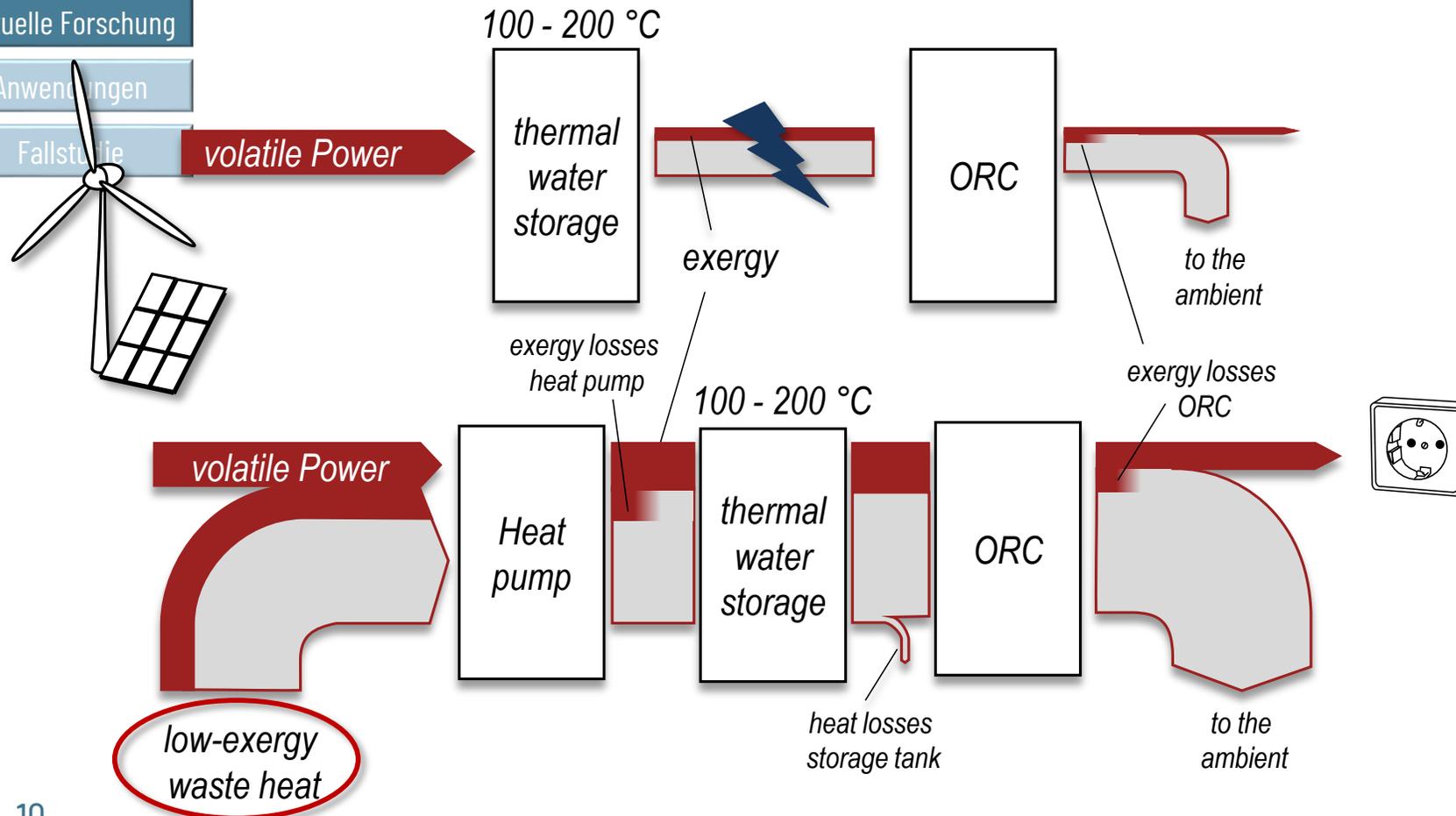
- Dampfkraftprozess
- Organic Rankine Cycle
- Gasturbinenprozess

Aktuelle Forschungsarbeiten

Energiespeicher
Funktionsprinzip
Aktuelle Forschung
Anwendungen
Fallstudie

Carnot-Batterie am Energiecampus Nürnberg:

Reversible Wärmepumpen-ORC-Anlage mit Heißwasserspeicher



Vorteile

- Günstiger Speicher-Upscale
- Komponentenverfügbarkeit
- Geographisch unabhängig
- Sektorenkopplung möglich (Strom, Wärme, Kälte)

Thermische Integration von Niedertemperaturwärme ($< 100^{\circ}\text{C}$) ermöglicht konkurrenzfähige Wirkungsgrade

Aktuelle Forschungsarbeiten

Energiespeicher

Funktionsprinzip

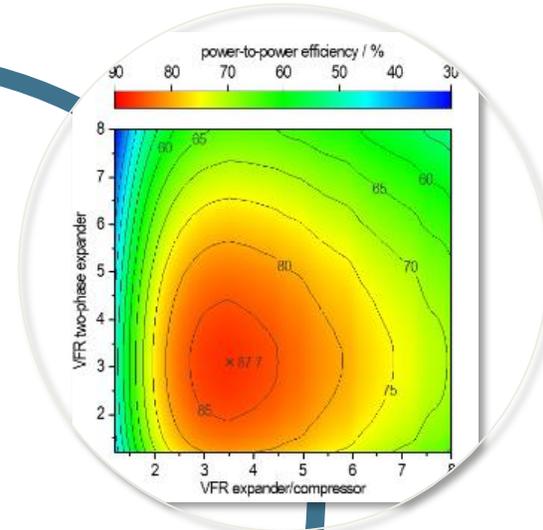
Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie



Carnot-Batterien



Prozesssimulation und -optimierung

- Kreisprozesssimulation
- Optimierung von Prozessparametern
- Auslegung von Carnot-Batterien

Energiemarkt und Speicherintegration

- Energiemarktprognosen
- Simulation des Speicherbedarfs
- Ermittlung optimaler Speicherintegration



Experimentelle Untersuchung und Optimierung

- Validierung der Simulationen
- Optimierung auf Prozess- und Komponentenebene
- Ermittlung geeigneter Betriebs- und Regelungsstrategien

Carnot-Batterie Pilotanlage

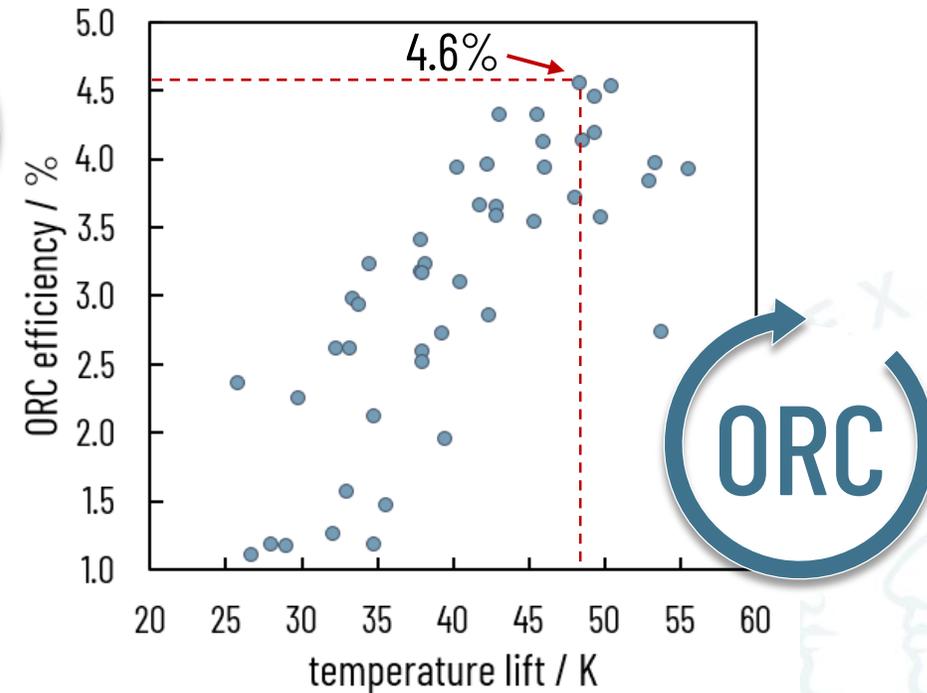
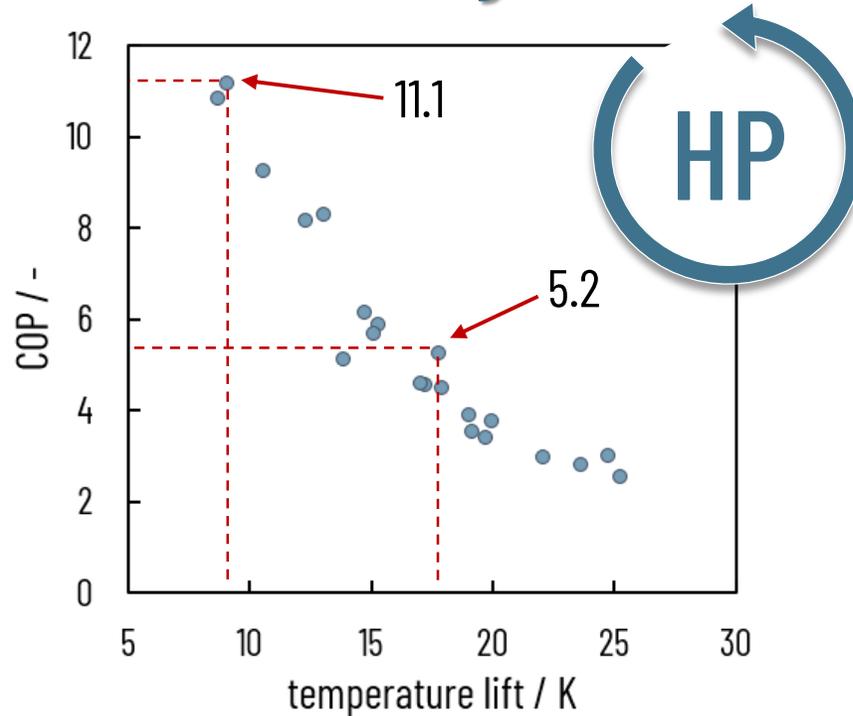


Spezifikationen

- Einspeichern max. **15 kW_{el}** (Wärmepumpe)
- Ausspeichern max. **9 kW_{el}** (ORC-Betrieb)
- Kältemittel: **R1233zd(E)**
- 2x 4m³ Heißwasserspeicher (**~270 kWh_{th}**)
- Speichertemperatur: 120 °C
- **Reversibler Betrieb** möglich
- Inbetriebnahme Mai 2021

Erste Versuchsergebnisse

- Energiespeicher
- Funktionsprinzip
- Aktuelle Forschung
- Anwendungen
- Fallstudie



Ergebnisse

- Wärmepumpe profitiert von (industrieller) Abwärme und wird mit geringem Temperaturhub effizienter
- ORC-Wirkungsgrad steigt bei hohen Speichertemperaturen
- Effizienz: max. COP = 11.1 (bei 9°C Temperaturhub), max. ORC-Wirkungsgrad 4.6% (bei 48°C Temperaturhub)

Lessons learned

1. Gegenläufige Trends bei Wärmepumpe und ORC-Prozess
2. **Max. Gesamtwirkungsgrad 51%** (wenn Abwärme "kostenlos")

Stand der Forschung

Energiespeicher

Funktionsprinzip

Nicht nur in Nürnberg wird geforscht ...



Siemens Gamesa, ETES

Dampfkraftprozess mit Vulkansteinspeicher

25-40%

MAN / ABB, ETES

CO₂ Rankine Cycle mit Heißwasserspeicher

~45%

Malta (Google), PHES

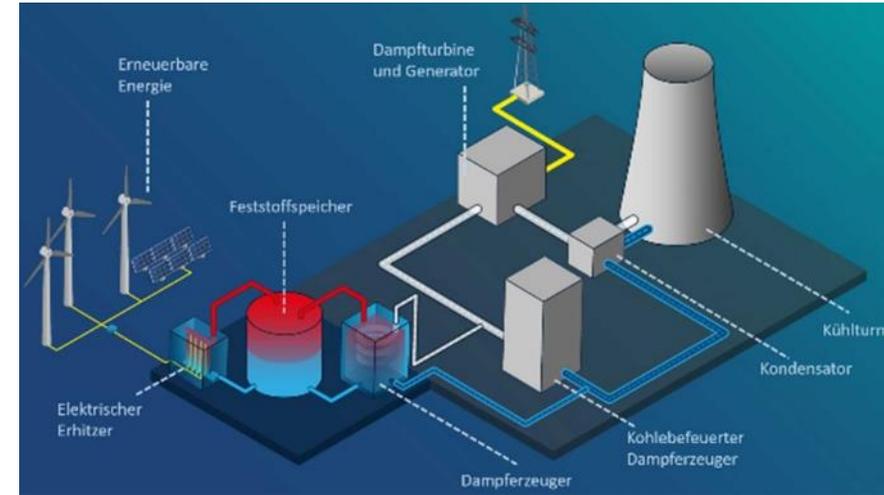
Gasturbinenprozess mit Salzschnmelzen-Speicher

n.a.

GE, AMSESS

Dampfkraftprozess mit Salzschnmelzen-Speicher

42-62%



www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/batteriespeicher-projekte/waermespeicherkraftwerk-storetopower/

RWE, StoreToPower

Dampfkraftprozess mit Salzschnmelzen-Speicher

~40%

Climeon

HP-ORC-Prozess mit Heißwasserspeicher

25-60%

Anwendung I: Aufwertung (industrieller) Abwärme

Energiespeicher

Funktionsprinzip

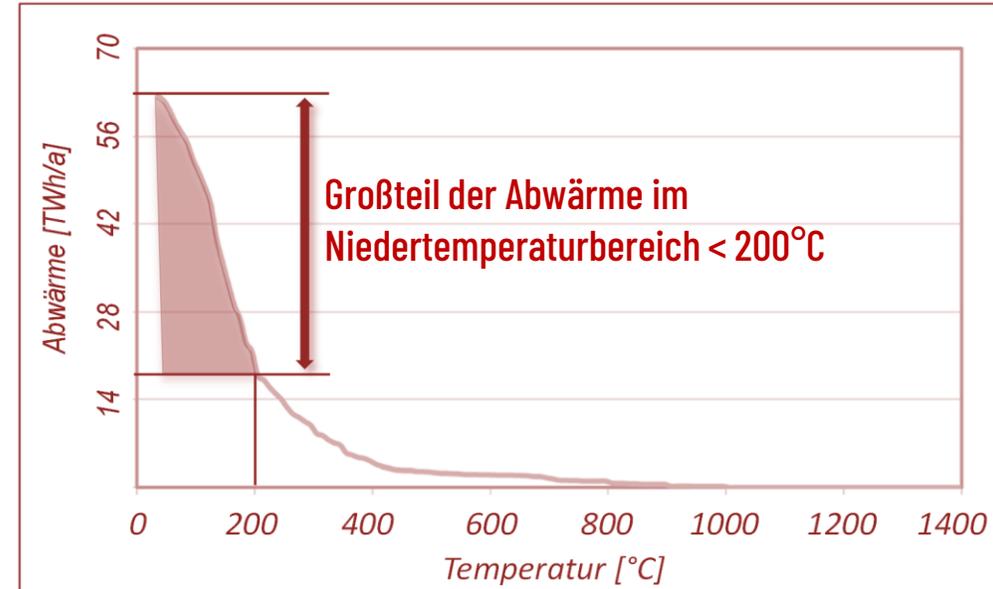
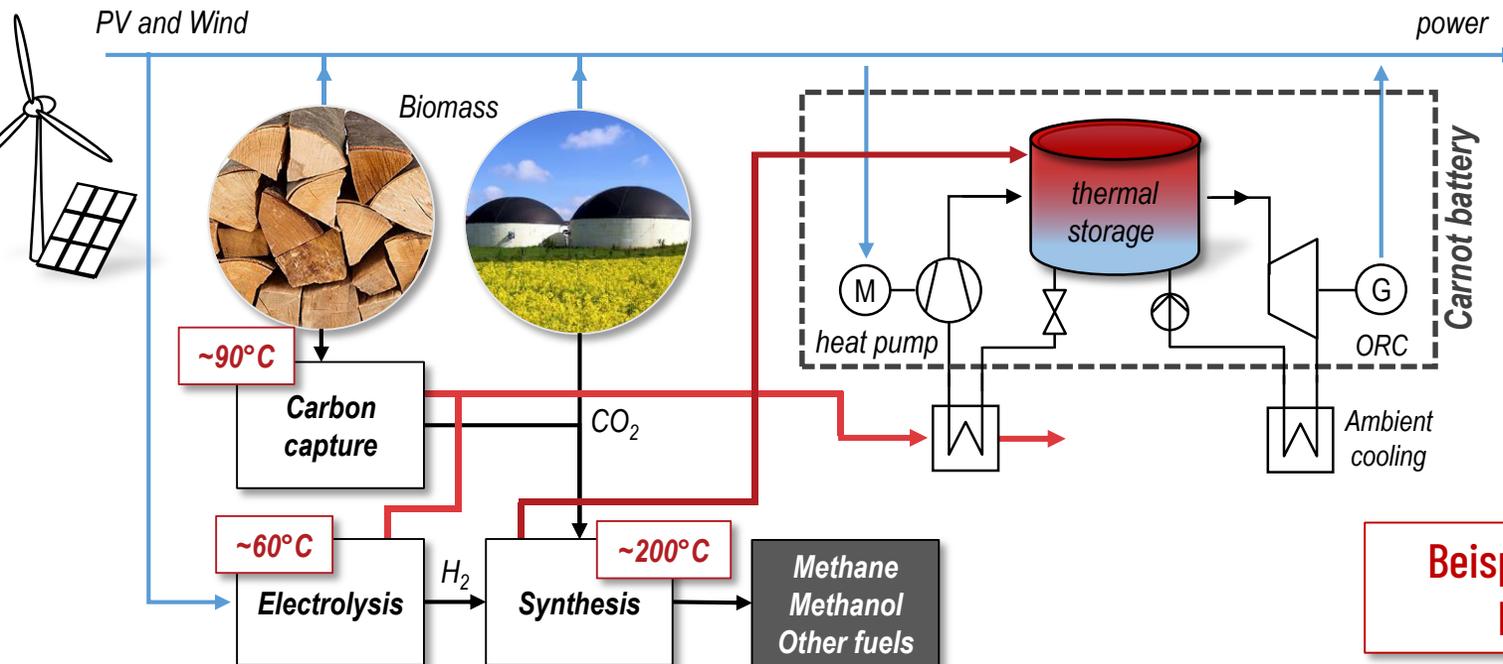
Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

Potential industrieller Abwärme

- EU: 300-800 TWh/a
- Deutschland: 60-160 TWh/a
- v.a. Stahl-, Zement- und Glasindustrie, Lebensmitteltechnik, Papierindustrie, Chemische Industrie



Brückner et al., Industrial waste heat potential in Germany, 2017

**Beispiel: Nutzung der Abwärme in
Power-to-Fuel Prozessen**

Anwendung II: Integration in Wärmenetze

Energiespeicher

Funktionsprinzip

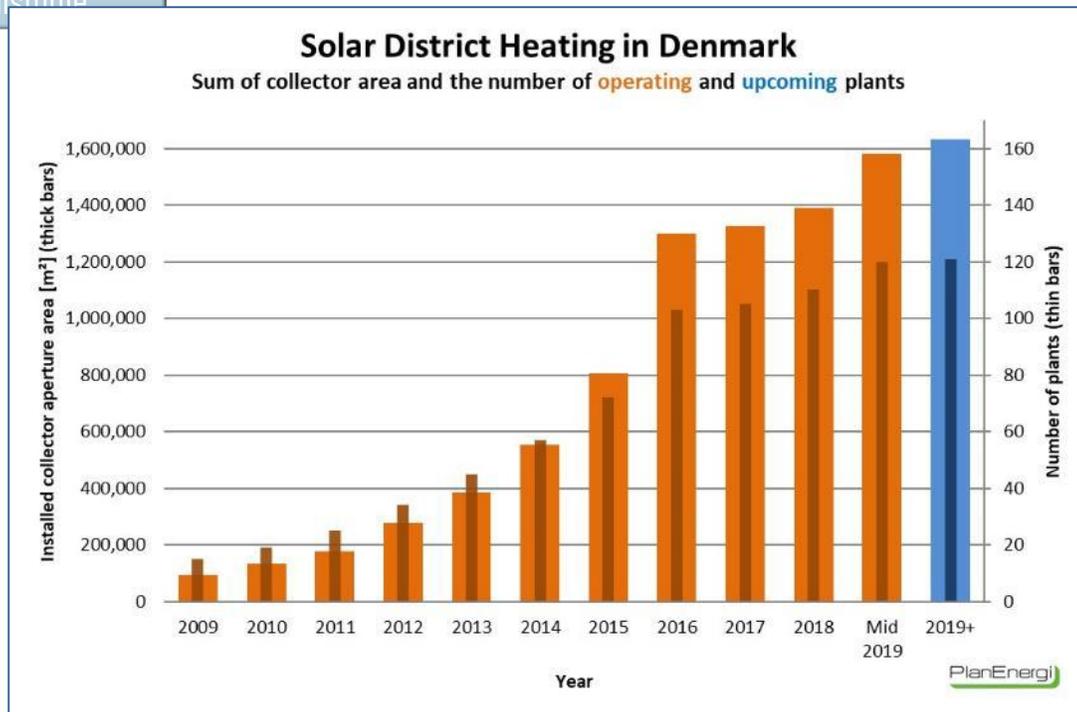
Aktuelle Forschung

Anwendungen

Fallstudie

Situation in Deutschland

- Anteil EE im deutschen Wärmesektor nur 12,9% (Platz 22 in EU)
- Kaum große, saisonale Wärmespeicher (Flexibilisierung KWK-Anlagen)
- Förderprogramme für Wärmenetze 4.0



Musterbeispiel Dänemark

- 100% EE bei Strom und Wärme bis 2035
- „Solar district heating“ und Großwärmepumpen
- > 64% der Haushalte an Wärmenetze angeschlossen (62% aus EE)

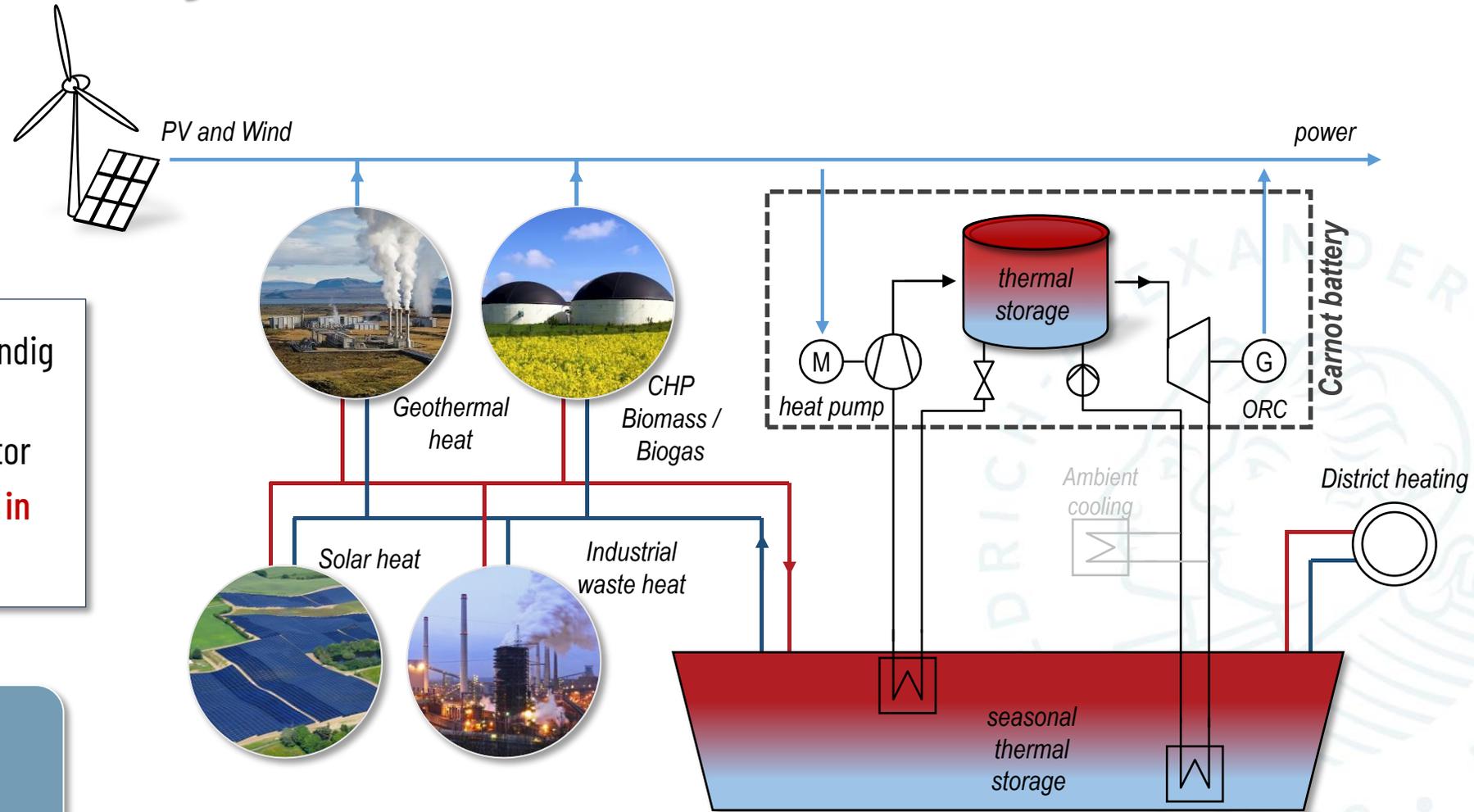
Carnot-Batterien ermöglichen Sektorenkopplung
Saisonale Wärmespeicher notwendig

Anwendung II: Integration in Wärmenetze

- Energiespeicher
- Funktionsprinzip
- Aktuelle Forschung
- Anwendungen
- Falls

- Saisonale Wärmespeicher notwendig
- Carnot-Batterien als Bindeglied zwischen Strom- und Wärmesektor
- **Flexible Umwandlung von Strom in Wärme und umgekehrt**

Hohe Jahresauslastung
Double Income Situation



Anwendung III: Gebäudeenergiesysteme

EU-Projekt SolBio-Rev

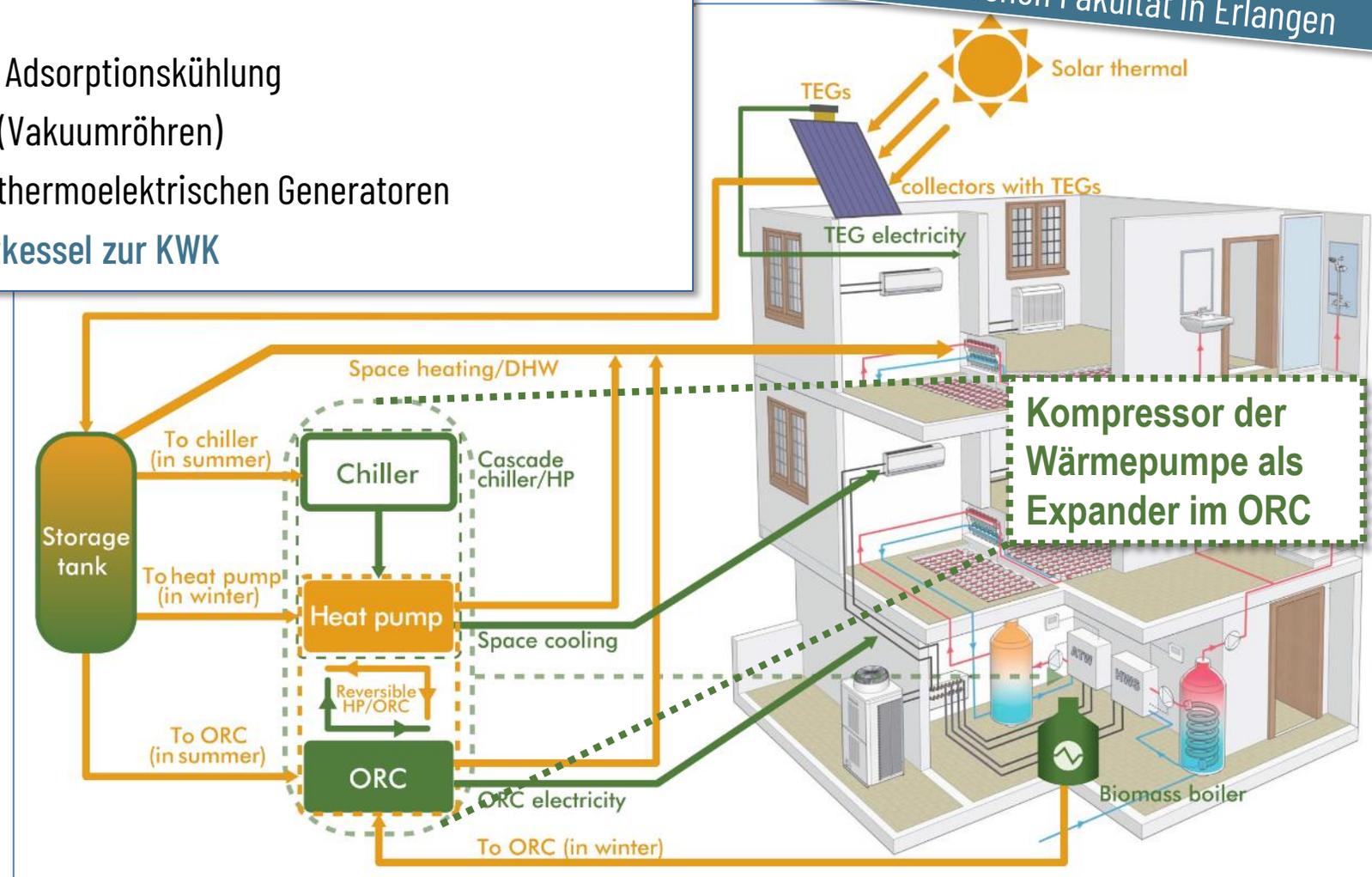
- Reversibles HP-ORC System gekoppelt mit Adsorptionskühlung
- Wärmeversorgung durch Solarkollektoren (Vakuumröhren)
- Nutzung überschüssiger solarer Wärme in thermoelektrischen Generatoren
- Zusätzliche Wärmeversorgung durch Pelletkessel zur KWK

Feldtest ab Sommer 2023 an der
Technischen Fakultät in Erlangen



Energiequellen:
Solarenergie und
Holzpellets

Deckung von bis zu 70% des
Energieverbrauchs von Gebäuden



Fallstudie – Carnot-Batterie in Grafing

Energiespeicher

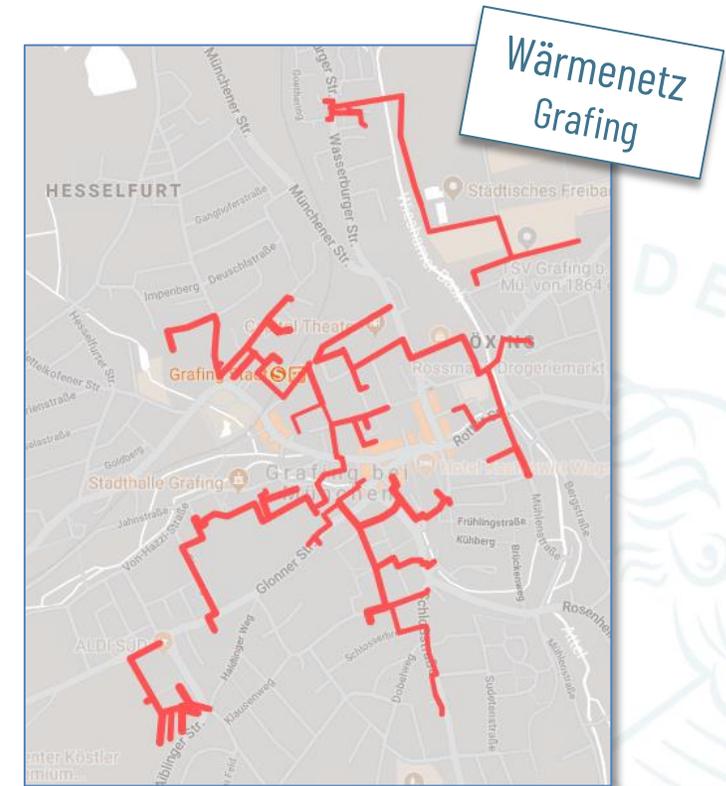
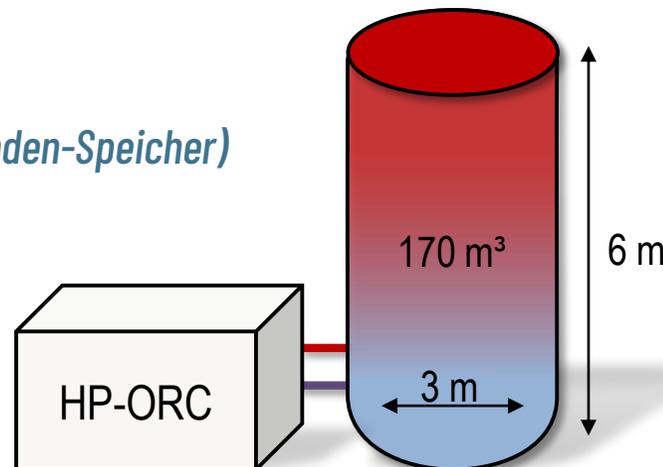
Funktionsprinzip

Aktuelle Forschung

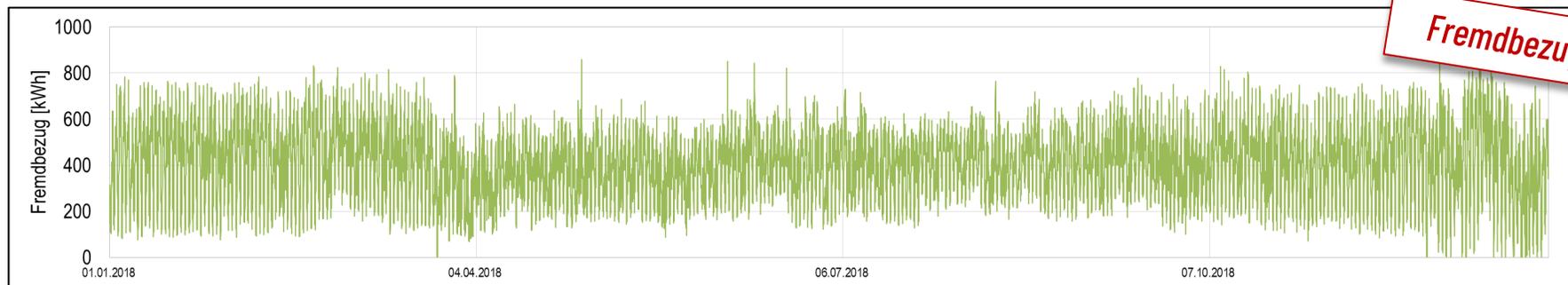
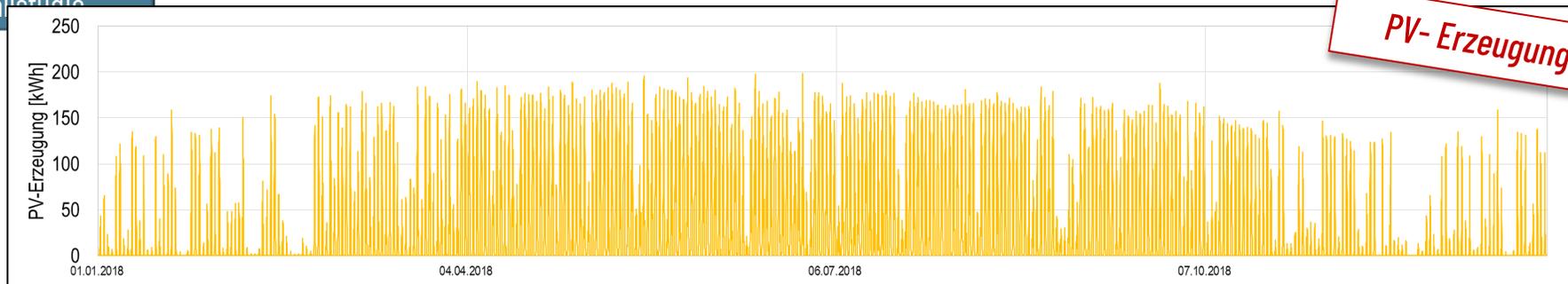
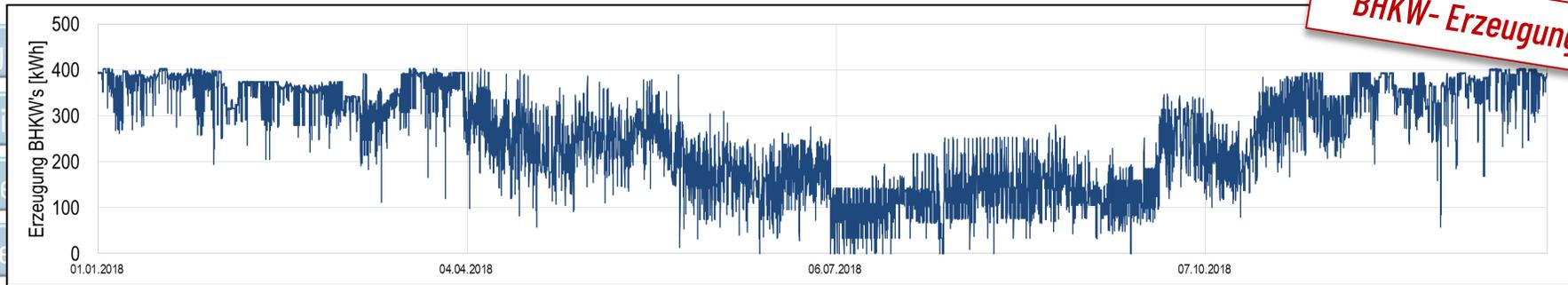
Anwendungen

Fallstudie

- Lastgangdaten 2018 der lokalen Stadtwerke in Grafing bei München
- 10 km Wärmenetz (> 200 Haushalte)
- Mittel- und Niederspannungsnetz mit > 5.000 Anschlüssen
- Stromerzeugung mit wärmegeführten Erdgas und Biogas BHKWs
- Stromerzeugung aus PV-Anlagen (ca. 9% der Eigenerzeugung)
- Zusätzlich benötigter Strom bezogen von anderem Netzbetreiber
- 100 kW_{el} HP-ORC System
- 4 MWh_{th} Heißwasserspeicher (5 Stunden-Speicher)



Fallstudie – Lastgangdaten 2018



Randbedingungen HP-ORC

- Speichertemperaturen: 90°C / 110°C
- HP T_{evap} : 80°C
- HP: $P_{\text{el}} = 100 \text{ kW}$, COP = 7,71
- ORC: $P_{\text{el}} = 63,8 \text{ kW}$ $\eta_{\text{el}} = 9,75 \%$
- PTP Wirkungsgrad: 75,2 %

Randbedingungen Wirtschaftlichkeit

- Abschreibungsdauer 20 Jahre
- Zinssatz 3%
- Invest Speicher: 10.000 €/MWh
- Invest HP-ORC: 500 €/kW_{el}

Szenario 1: Börsenstrom

Energiespeicher

Funktionsprinzip

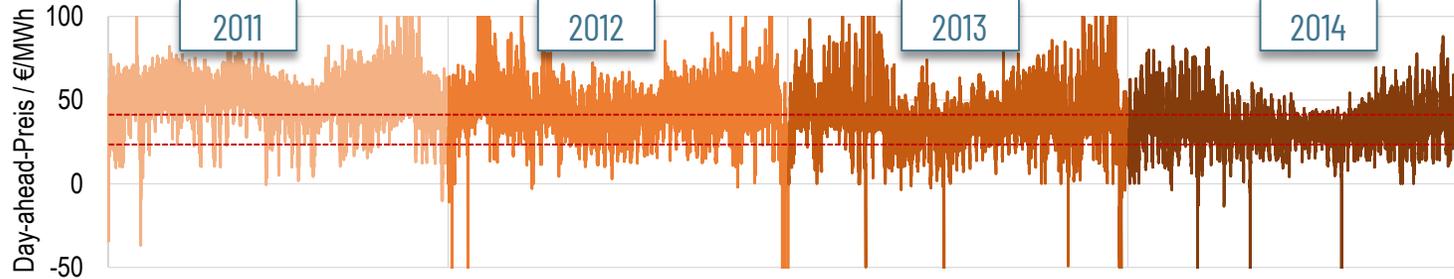
Aktuelle Forschung

Anwendungen

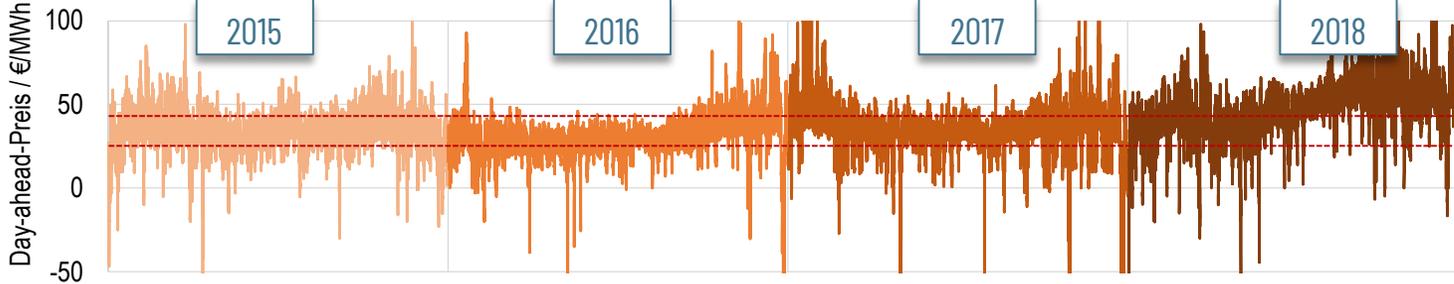
*„Wenn Börsenpreis unter bestimmten Grenzwert fällt, wird Carnot-Batterie geladen,
sobald bestimmter Grenzwert übertroffen wird, wird Strom wieder verkauft“*

Einkaufspreis: 20 €/MWh
Verkaufspreis: 40 €/MWh

Strompreise 2011-2014



Strompreise 2015-2018



Entscheidende Variablen:

Grenzpreise und Speichergroße



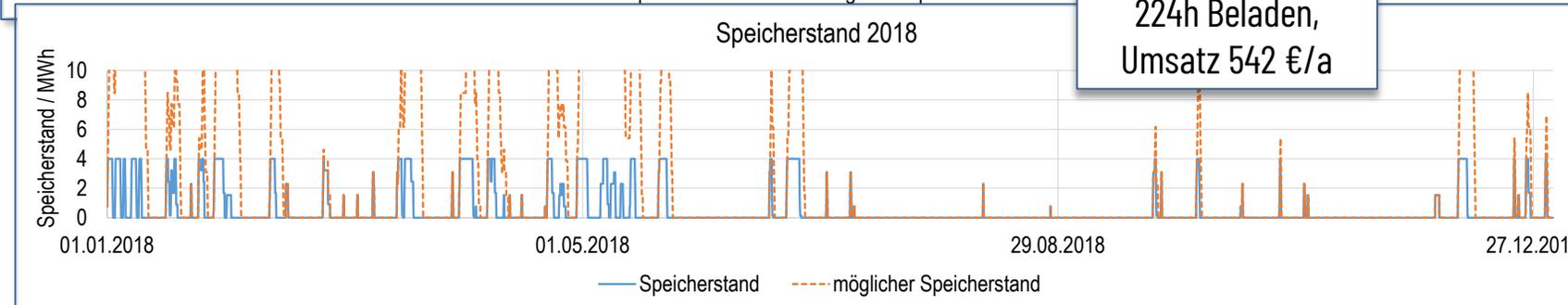
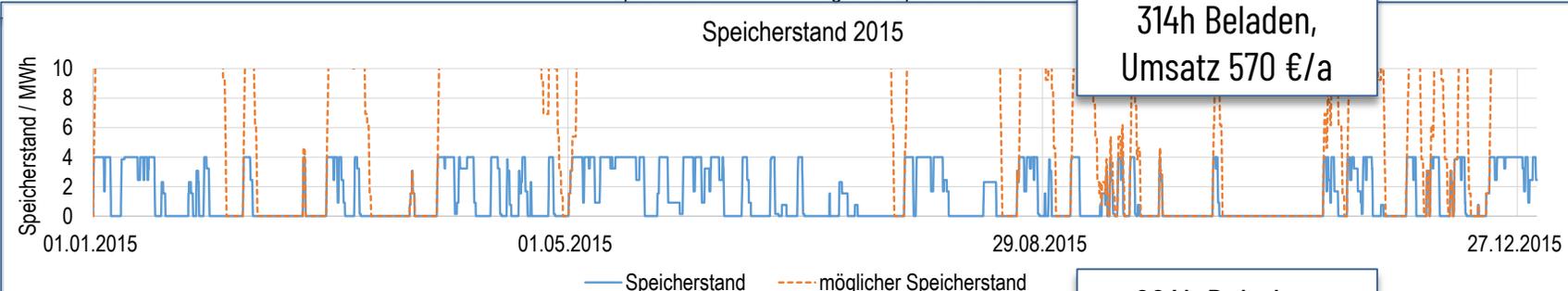
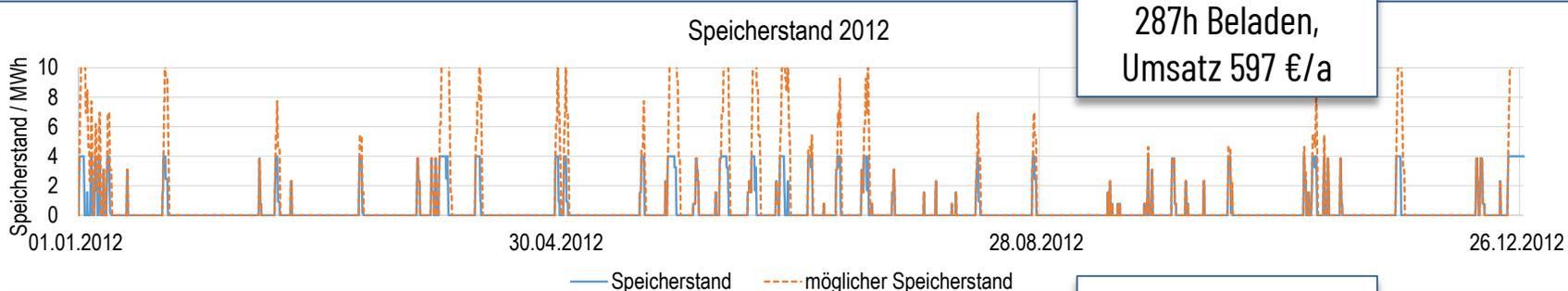
Marge &
Betriebsstunden

Spez. Investkosten &
Betriebsstunden

Szenario 1: Handel mit Börsenstrom

Betriebsstunden und Umsatz variieren je nach Jahresverlauf des Börsenstrompreis

Energiespeicher



Einkaufspreis: 20 €/MWh
Verkaufspreis: 40 €/MWh
4 MWh Speicherkapazität

Einkaufspreis / €/MWh

2018

	10	20	30
40	134 h 477 €/a	224 h 542 €/a	477 h 628 €/a
50	114 h 485 €/a	169 h 538 €/a	269 h 583 €/a
60	72 h 368 €/a	104 h 428 €/a	163 h 497 €/a

Verkaufspreis / €/MWh

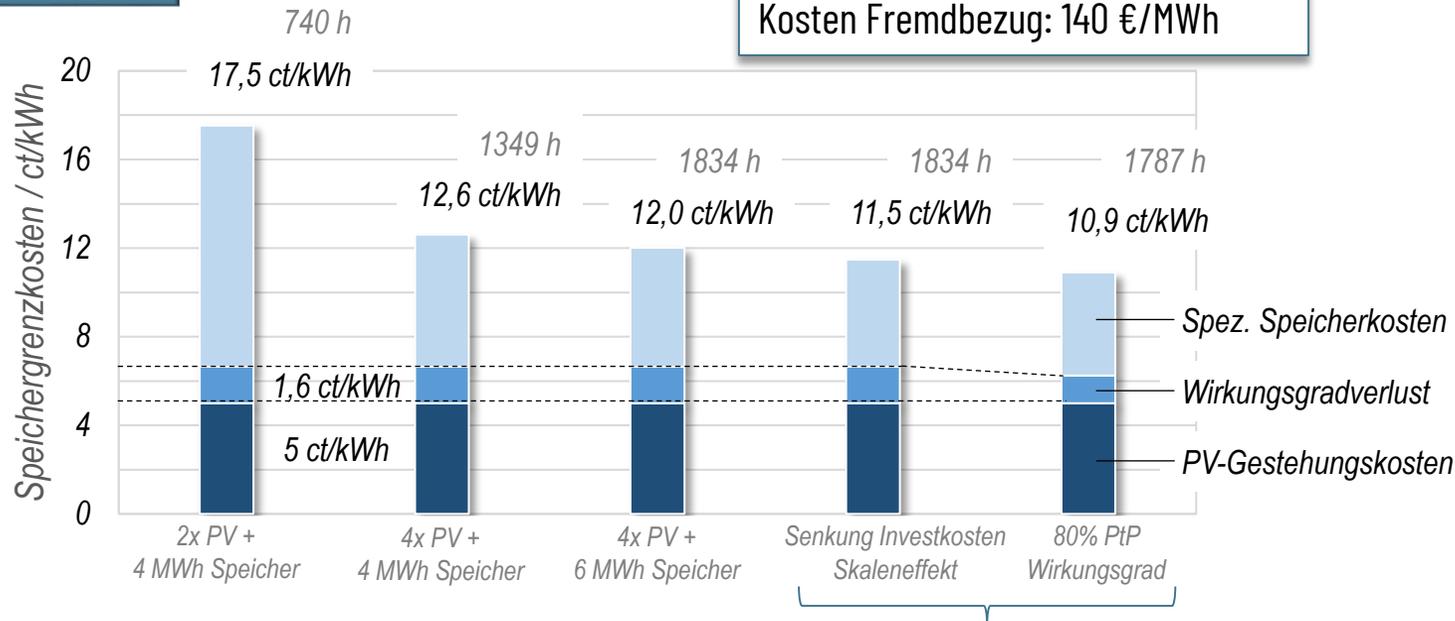
Geringe Umsätze durch
Börsenstromhandel

Szenario 2: Autarkiegrad erhöhen

„Durch Carnot-Batterie soll der Autarkiegrad des Netzes erhöht werden und die Preisspreizung zwischen Eigenerzeugung und Fremdbezug ausgenutzt werden“

- Energiespeicher
- Funktionsprinzip
- Aktuelle Forschung
- Anwendungen
- Fallstudie**

PV-Gestehungskosten: 50 €/MWh
 PV-Einspeisevergütung: 50 €/MWh
 Kosten Fremdbezug: 140 €/MWh

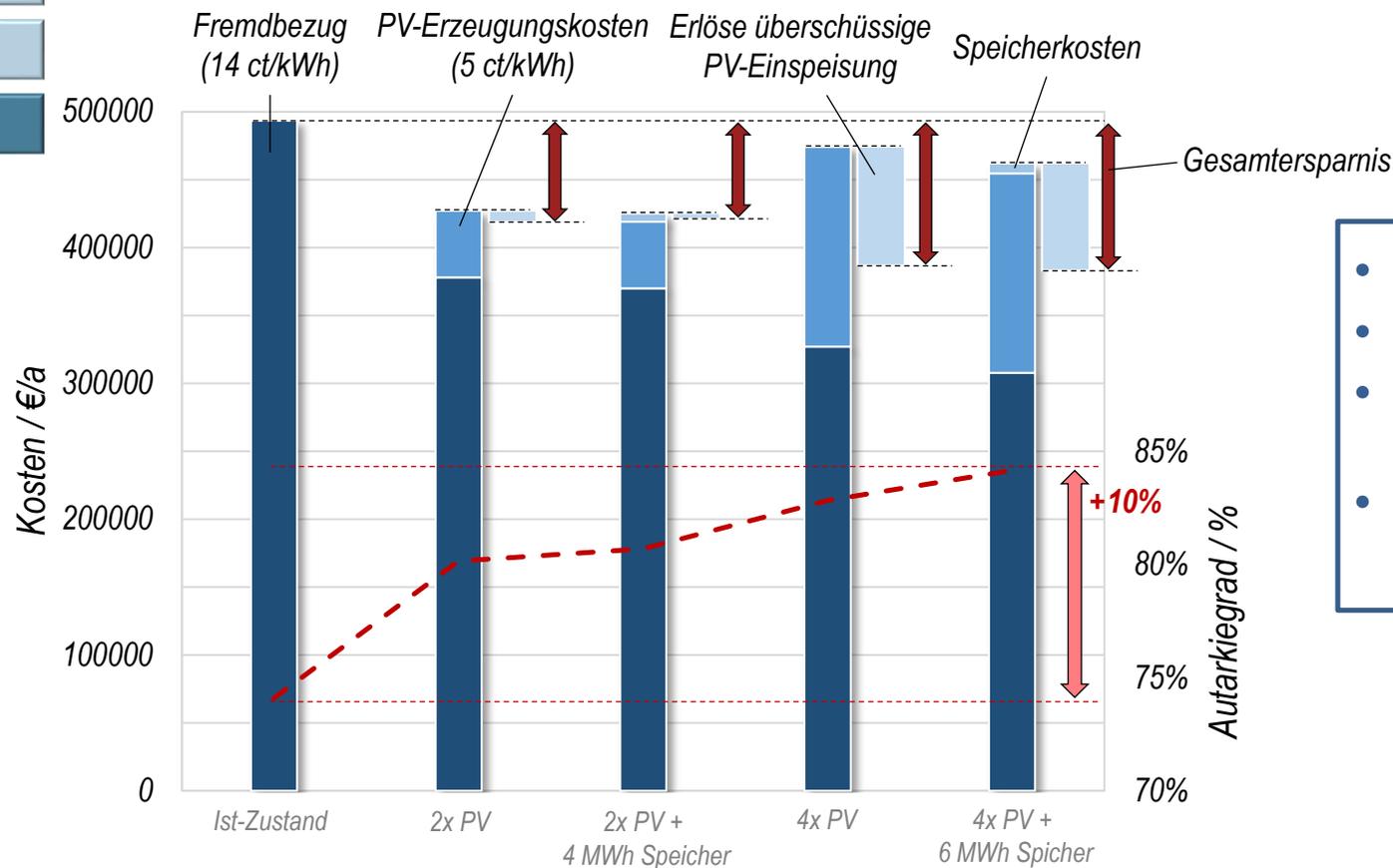


Literatur LCOS = 7-11 ct/kWh

- PV wird vollständig selbst genutzt (Anteil 9%)
- **Ausbau PV-Kapazitäten** im Netz Grafing (2x / 4x)
- PV-Einspeisevergütung nach EEG wird perspektivisch weiter sinken
- Fremdbezugskosten werden perspektivisch steigen (z.B. durch CO₂-Bepreisung)

Szenario 2: Autarkiegrad erhöhen

„Durch Carnot-Batterie soll der Autarkiegrad des Netzes erhöht werden und die Preisspreizung zwischen Eigenerzeugung und Fremdbezug ausgenutzt werden“



PV-Gestehungskosten: 50 €/MWh
PV-Einspeisevergütung: 50 €/MWh
Kosten Fremdbezug: 140 €/MWh

- PV wird vollständig selbst genutzt (Anteil 9%)
- **Ausbau PV-Kapazitäten** im Netz Grafing (2x / 4x)
- PV-Einspeisevergütung nach EEG wird perspektivisch weiter sinken
- Fremdbezugskosten werden perspektivisch steigen (z.B. durch CO₂-Bepreisung)

Carnot-Batterie
erhöht Autarkiegrad

Vergleich mit Lithium-Ionen-Batterien

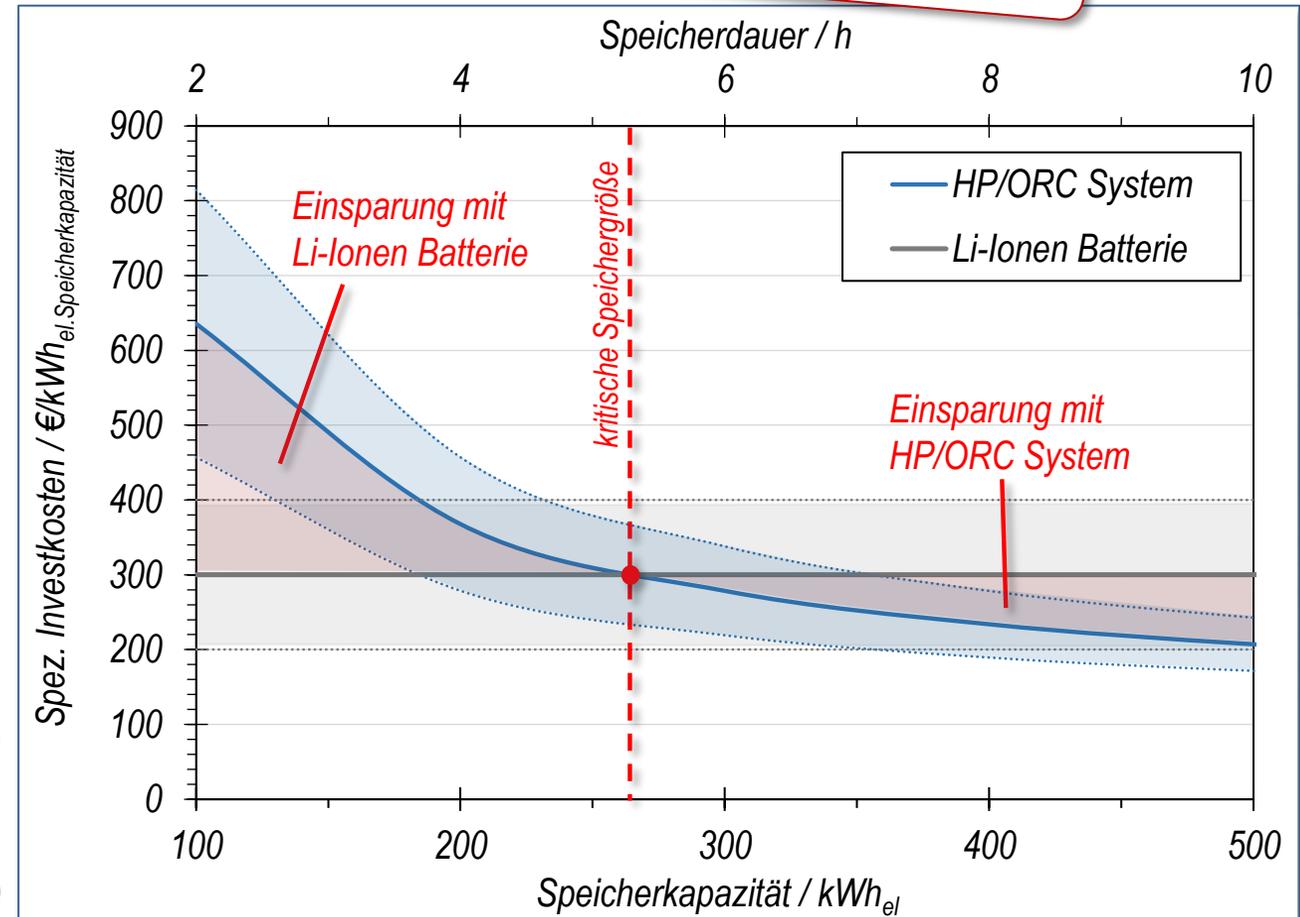
Energiespeicher

- Li-Ionen-Batterie effizient, aber zu teuer für großskalige Speicher (200-400 €/kWh)
- Li-Batterien daher eher mit kleinerer Speicherkapazität zur Stabilisierung der Netzfrequenz geeignet
- **Heißwasserspeicher des HP-ORC Systems ermöglicht kostengünstigen Upscale (10 €/kWh)**

Spezifische Investitionskosten für Carnot-Batterien und Lithium-Batterien pro kWh elektrischer Speicherkapazität in Abhängigkeit der Speichergröße für ein 50 kW_{el}-System

(Annahmen: HP/ORC: 500-1000 €/kW_{el}, Speicher 10.000 €/MWh_{th}, $\eta_{\text{PtP}} = 70\%$, $\eta_{\text{ORC}} = 10\%$, COP = 7; Angaben Li-Batterie: 200-400 €/kWh, $\eta = 100\%$)

Ab Speicherung von > 5h Einsparungen durch HP-ORC



Zusammenfassung



Verschiedene Energiespeicheraufgaben erfordern einen Mix aus unterschiedlichen Speichertechnologien



Thermische Speicher wie Carnot-Batterien eignen sich vor allem zur Überbrückung von Dunkelflauten



Mögliche Anwendungen: Aufwertung (industrieller) Abwärme, Sektorenkopplung, Gebäudeenergiesysteme, ...



Wirtschaftlicher Einsatz von Carnot-Batterien unter bestimmten Voraussetzungen möglich

Vorteile

- Günstiger Speicher-Upscale
- Komponentenverfügbarkeit
- Geographisch unabhängig
- Sektorenkopplung möglich
(Strom, Wärme, Kälte)

Maximilian Weitzer

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg

Tel: +49 (0) 911 5302 99022

E-Mail: maximilian.weitzer@fau.de



www.evt.tf.fau.de