

Thermochemische Energiespeicher für Industrie und Kraftwerke

Peter Ostermeier¹

Annelies Vandersickel¹

Hartmut Spliethoff^{1,2}

¹Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München,

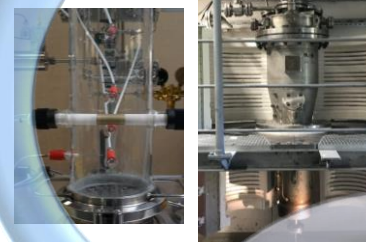
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

²ZAE Bayern, Walther-Meissner-Str. 6, 85748 Garching

Fachkongress SolarChemieR

18. Januar 2019

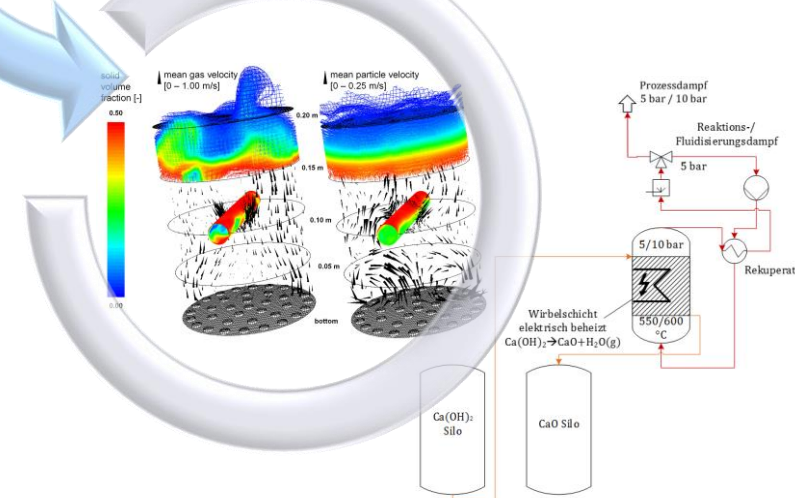
Technische
Umsetzung



Materialien



Simulation



Agenda



Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Ausgangssituation und das Projekt TcET



Materialien

Stoffsysteme und deren Charakterisierung



Technische Umsetzung

Versuchsanlagen und Messergebnisse



Simulation

Numerische Wirbelschichtsimulation und Prozesssimulation

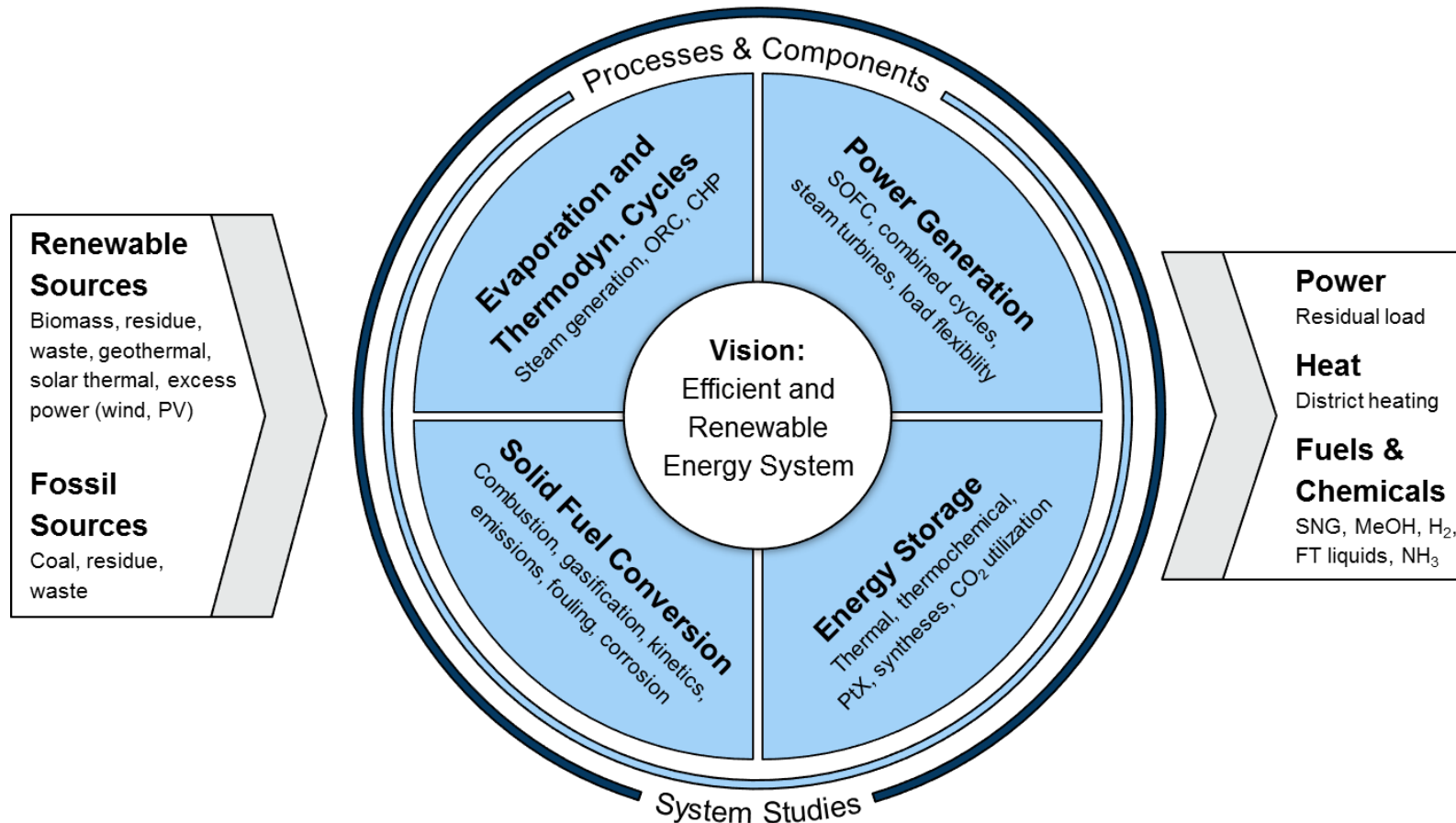


Erkenntnisse und Ausblick

Das Projekt TWIST und weitere Anwendungsmöglichkeiten

Lehrstuhl für Energiesysteme

Forschungsbereiche



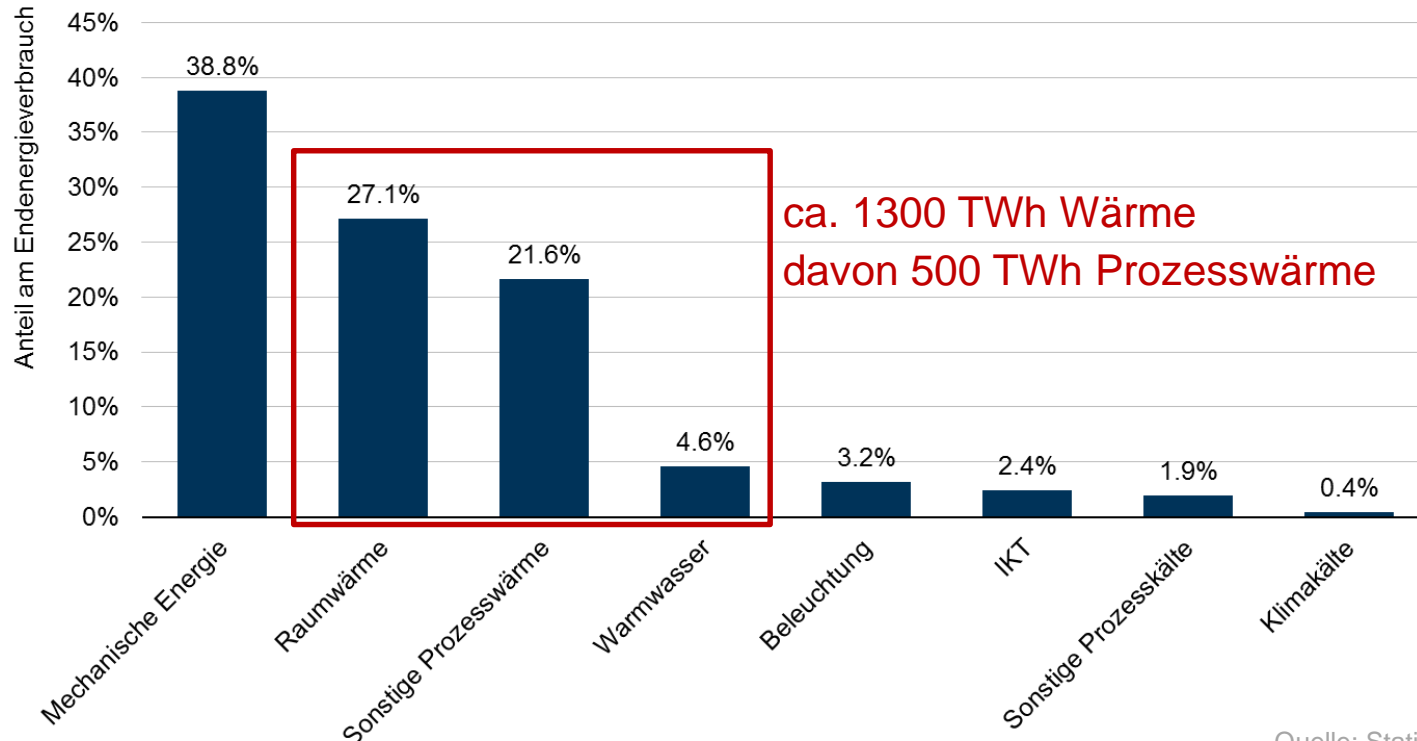
Lehrstuhlinhaber:
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

Mitarbeiter:
49 Angestellte
31 Doktoranden
4 Postdocs

(Stand 01.11.2018)

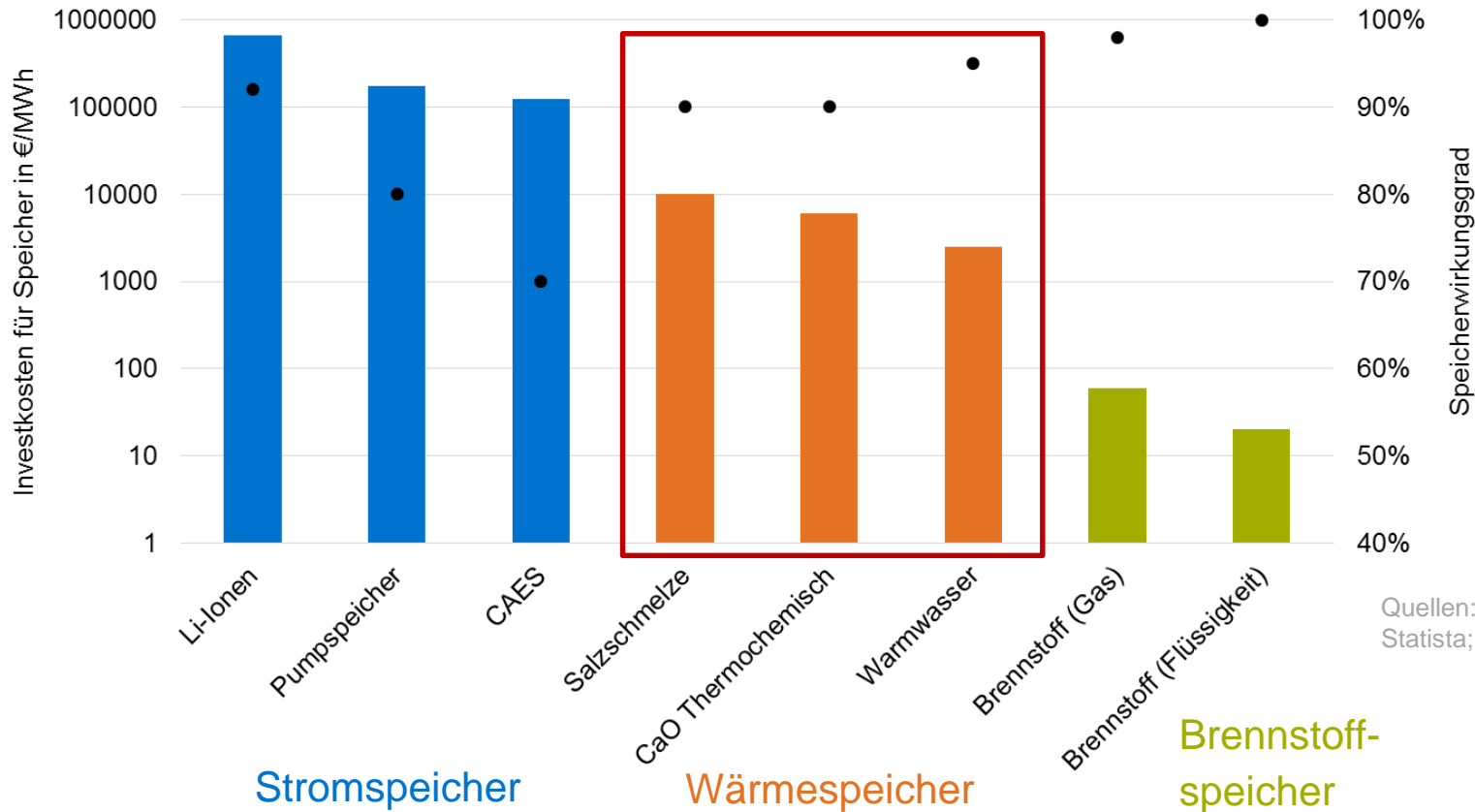
Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Endenergieverbrauch in Deutschland 2015 → über 50% Wärmebedingt



Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Speichertechnologien: Kostenvergleich → **Wärmespeicher effizienter und günstiger als Stromspeicher**



Quellen: *Energy Storage and Smart Energy Systems*, Lund et.al., 2016; Statista; energieforschung.info; Eigene Berechnungen

Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Wärmespeichertechnologien

Wärme < 150 °C

Warmwasserspeicher (kWh bis GWh) für kurze und mittlere Speicherdauer
Verschiedene Ansätze für Langzeitspeicher (Forschung)

Wärme > 150 °C

Keine etablierte Technologie (GWh-Maßstab) verfügbar

Es gibt drei Technologien, die sich in den GWh-Maßstab skalieren lassen:

<i>Speichertechnologie</i>	<i>Technische Umsetzbarkeit</i>	<i>Kostenentwicklung</i>
Salzschmelze , sensibel	Stand der Technik (CSP)	Stark ansteigend mit Größe
Feststoff , sensibel (Schüttgut oder Formkörper)	Forschung (Sand)/ Demonstration (Basaltsteine)	Wenig (Sand) bis moderat (Formkörper) ansteigend mit Größe
Thermochemische Speicher	Forschung	Wenig ansteigend mit Größe



Fernwärmespeicher Nürnberg
Sandreuth, 1,5 GWh, 120 °C

Bildquelle:
www.energieatlas.bayern.de

Das Projekt TcET

Eckdaten des Projektes

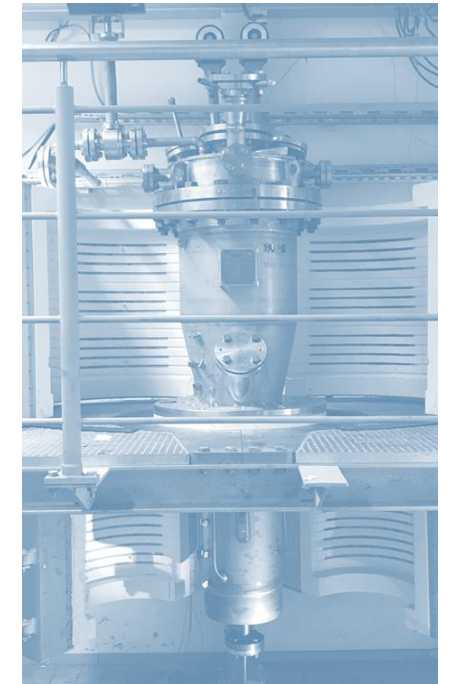
Ziele des Projektes

Entwicklung eines Thermochemischen Energiespeichers mittels reversibler Gas-Feststoff-Reaktion im Wirbelschichtverfahren

- Proof of Concept (Entwicklung geeignetes Material und Demonstration Fluidisierbarkeit)
- Entwicklung Methoden und Teststände zur Material- und Prozesscharakterisierung
- Inbetriebnahme eines 10kW Pilot-Reaktors
- Identifikation aussichtsreicher Anwendungsfälle

Laufzeit, Budget und Mitarbeiter

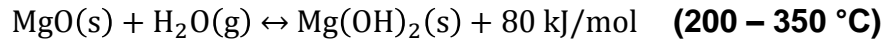
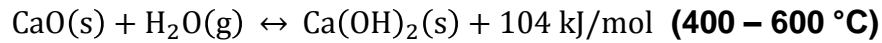
Laufzeit: Januar 2014 bis Juni 2018
Budget: ca. 2 Mio. Euro
Mitarbeiter: 5 Wissenschaftler, 2 Techniker



Das Projekt TcET

Warum Wärmespeicherung in reversiblen Gas-Feststoff-Reaktionen?

Wärmespeicherung in reversiblen Gas-Feststoff- Reaktionen:



Aufgrund guter Reaktivität und Zyklenstabilität ist CaO das vielversprechendste Material

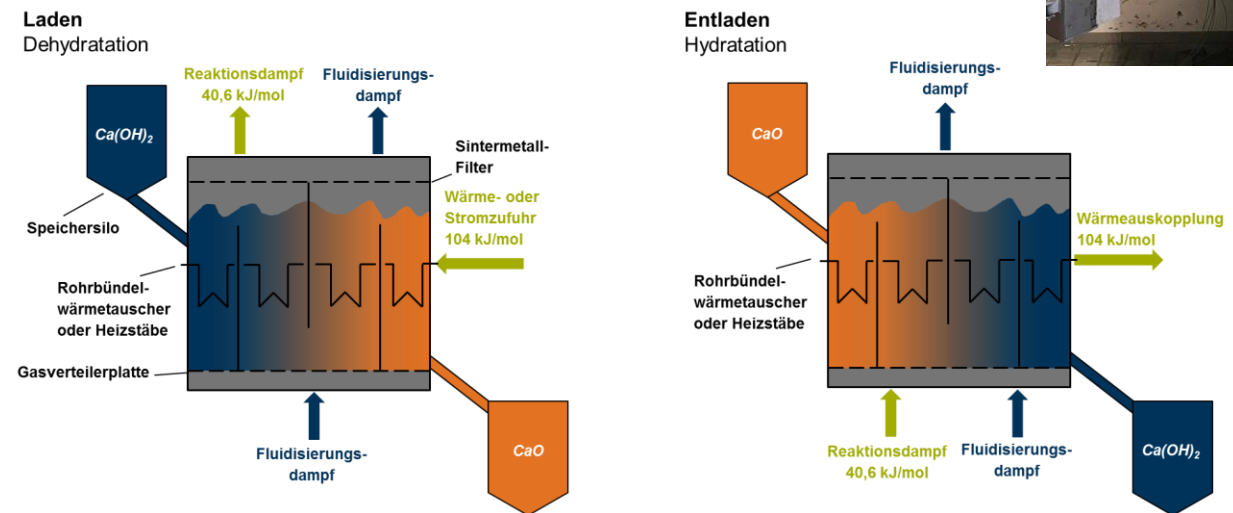
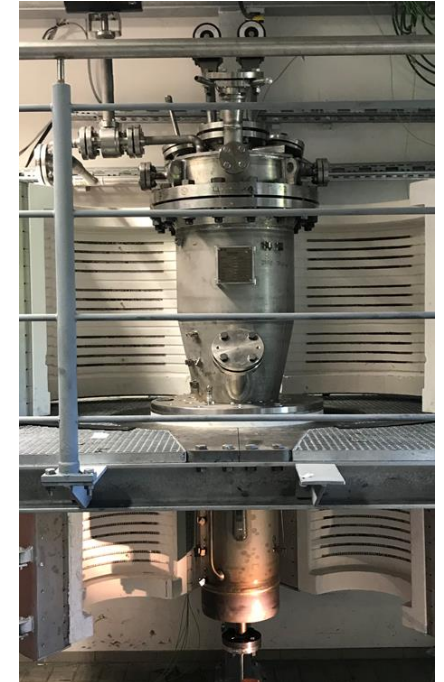
	<i>kWh/kg</i>	<i>kWh/m³ ***</i>	<i>Faktor</i>	<i>Euro/kWh (Material)</i>
Warmwasser*	0,06	58	1	0,025
Sand sensibel **	0,06	89	1,5	0,25
Salzschmelze sensibel **	0,10	190	3,2	5-10
Salzschmelze latent	0,06	100	2	10-15
MgO/(OH)₂ thermochemisch	0,38	200	3,4	0,35
CaO/(OH)₂ thermochemisch	0,40	160	2,8	0,15
Steinkohle	6,9	2775	56	0,007

* mittlerer Temperaturhub= 50 K,
 ** mittlerer Temperaturhub= 250 K,
 *** bezogen auf technische Schüttdichten
 (ggf. des Materials mit geringerer Energiedichte)

Das Projekt TcET

Warum im Wirbelschichtverfahren?

- Kosten Speichermaterial (CaO): ca. 15 ct/kWh
 - Kosten für Speichersystem werden von Wärmetauscher/Reaktor dominiert
 - Förderung des Speichermaterials ermöglicht Entkopplung von Leistung und Kapazität und senkt die Speicherkosten pro kWh
- Wirbelschicht bietet guten Stofftransport und hohe Wärmeübergangskoeffizienten
- Durch höhere Wärmeübergangskoeffizienten kompaktere Bauweise als z.B. Wanderbett
- **Herausforderung:** Fluidisierung des feinen Speichermaterials (Partikelgrößen z.T. < 5 μm)



Das Projekt TcET

Überblick Projektstruktur

Reaktionskinetik

Modifikation chemischer
und physikalischer
Stoffeigenschaften

Zyklenstabilität



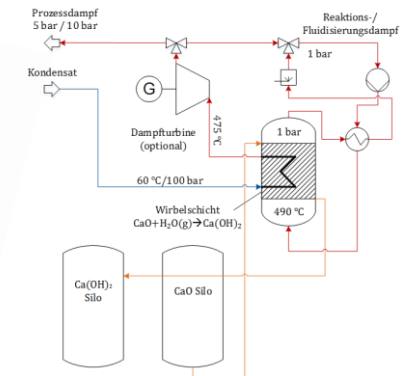
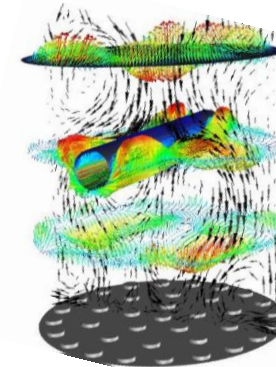
10 kW_{ch} kontinuierlicher
Wirbelschichtreaktor (bis 700 °C)

Wärmeübergänge



Numerische Simulation und
Upscaling

Prozesssimulation und
Bewertung von
Anwendungsgebieten



Materialien

Technische
Umsetzung

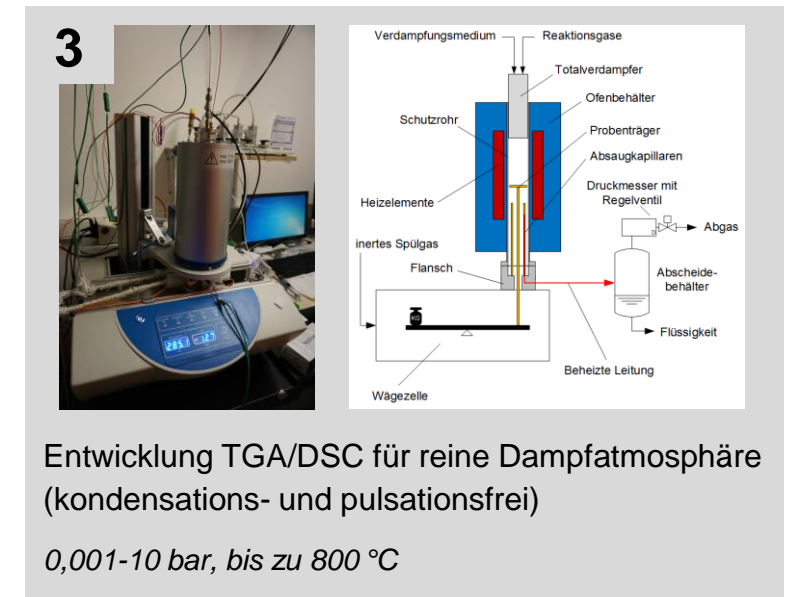
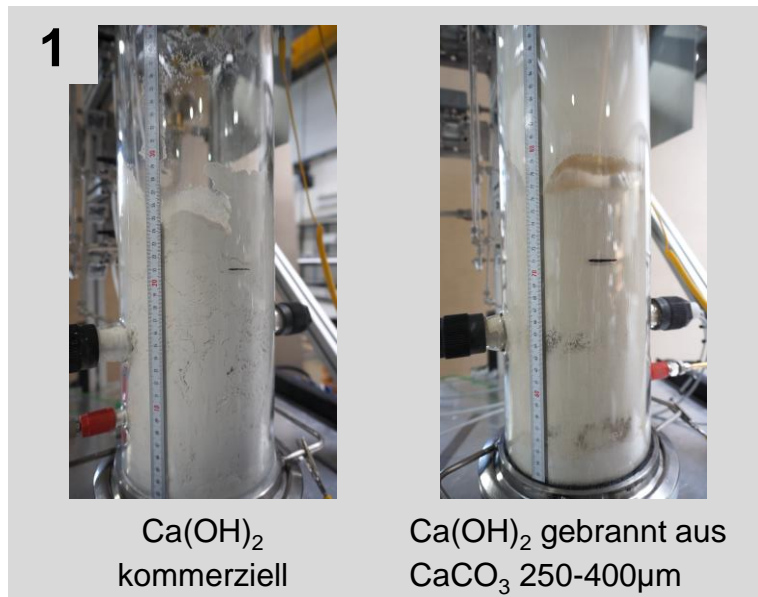
Simulation

Materialien

Stoffsysteme und deren Charakterisierung

Herausforderungen

- 1) Fluidisierung des feinen Speichermaterials
- 2) Zyklenstabilität
- 3) Entwicklung einer Kinetik in reiner Dampfatmosfera

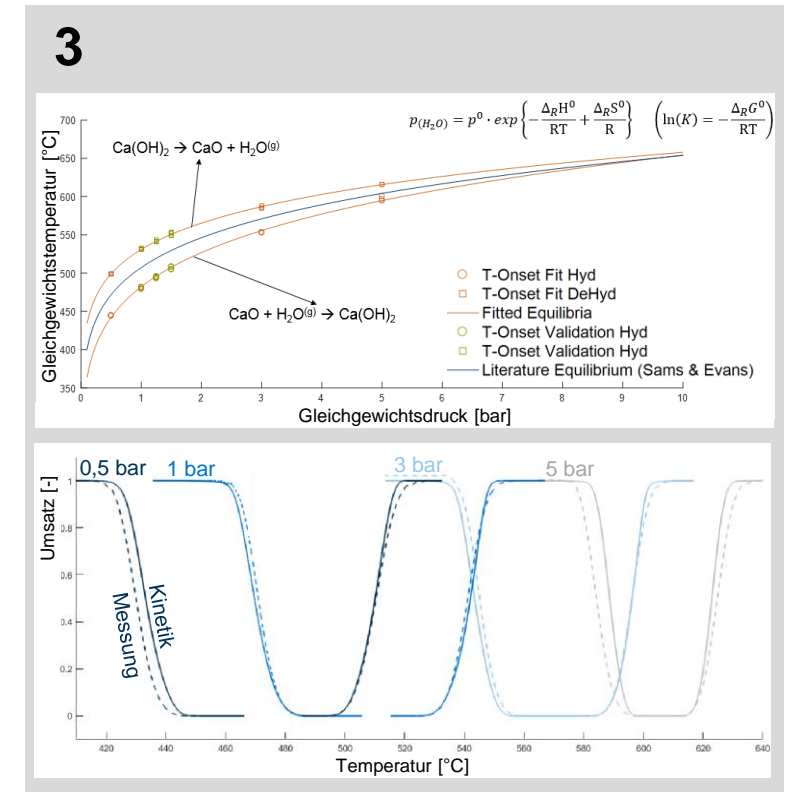
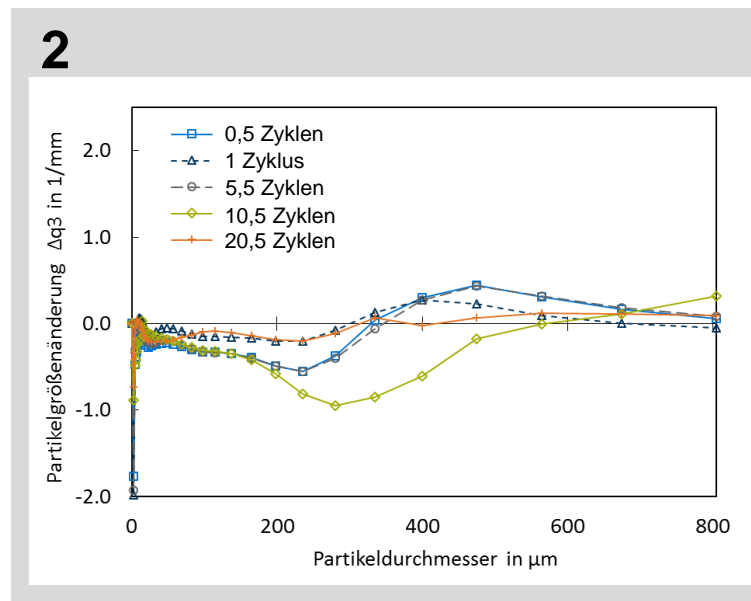
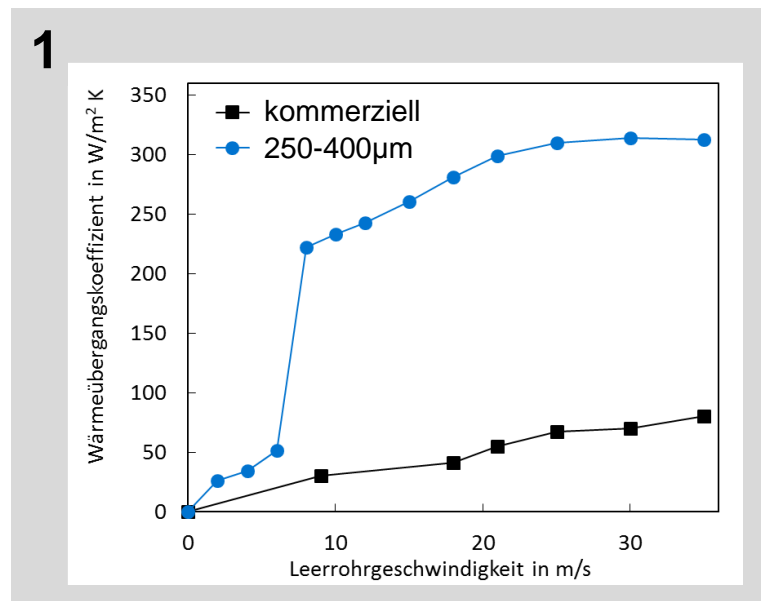


Materialien

Stoffsysteme und deren Charakterisierung

Ergebnisse

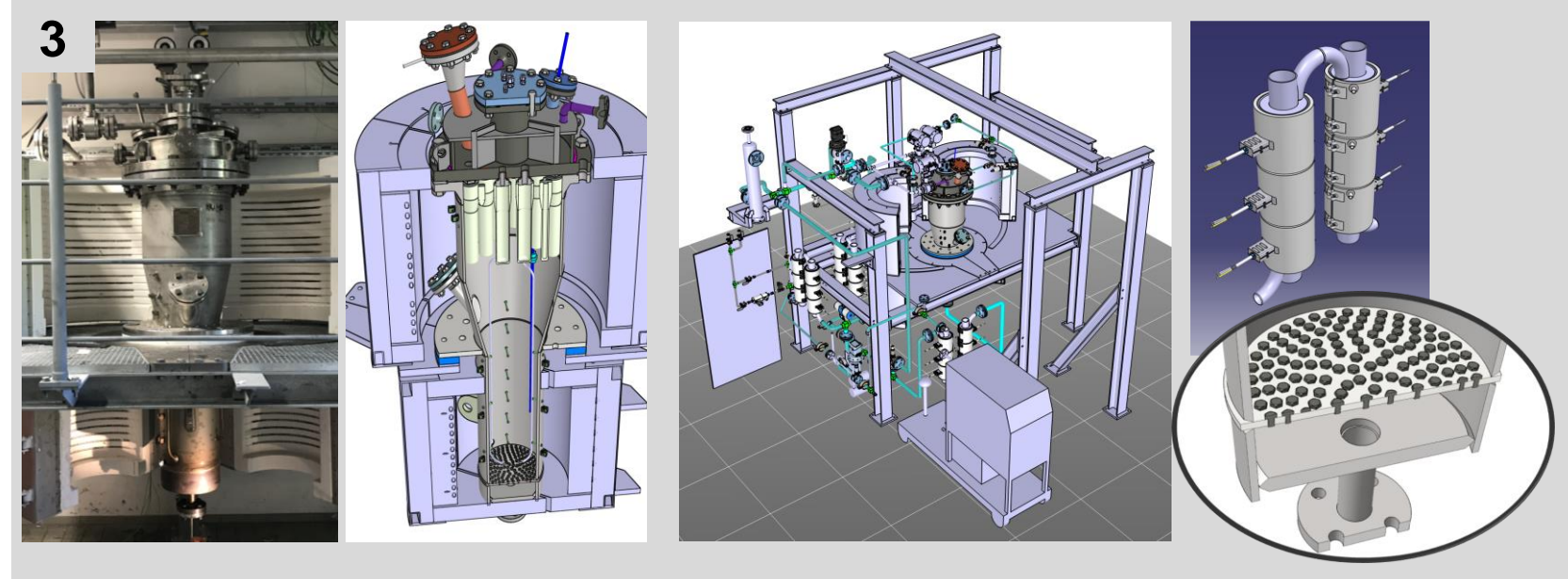
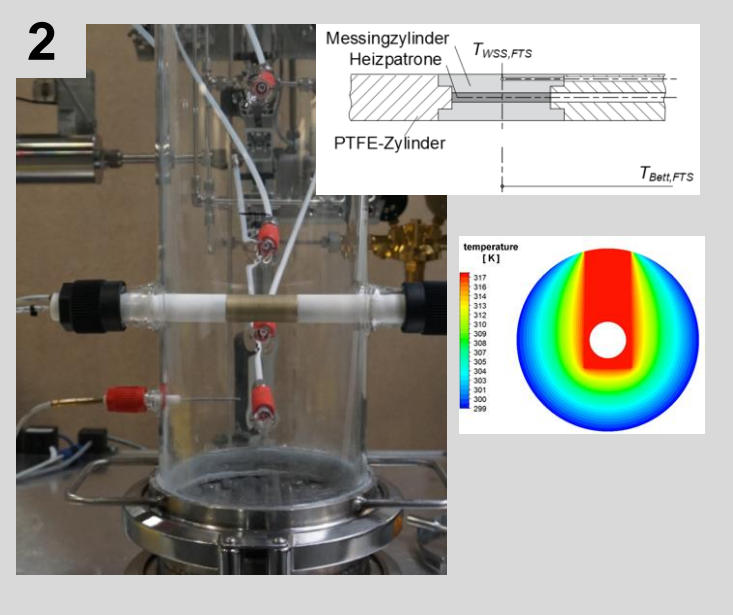
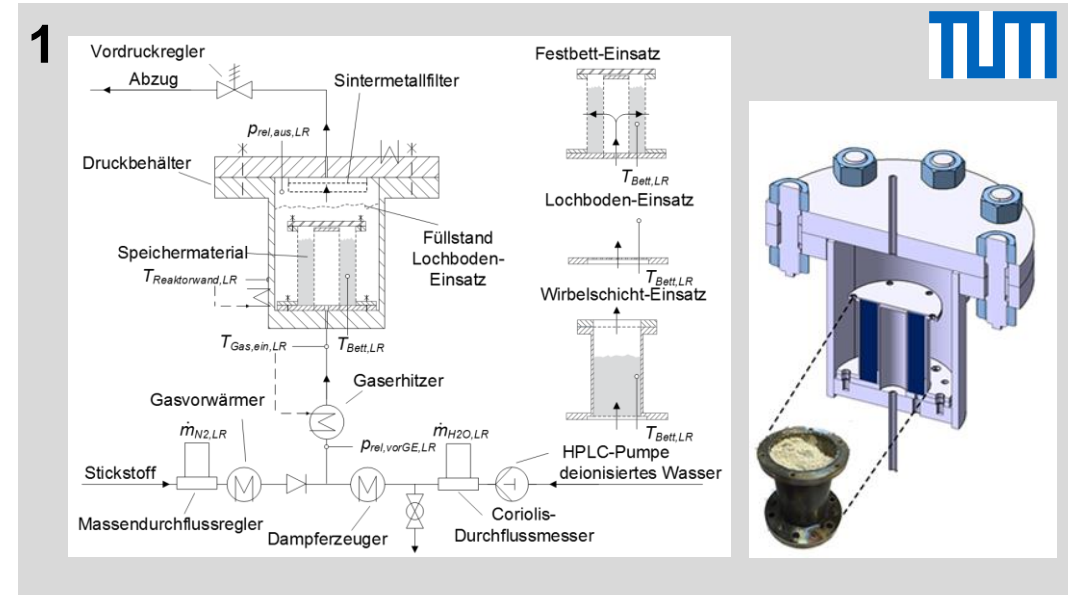
- 1) Fluidisierung des feinen Speichermaterials
- 2) Zyklenstabilität
- 3) Entwicklung einer Kinetik in reiner Dampfatmosphäre



Technische Umsetzung

Versuchsanlagen und Messergebnisse

- 1) Laborreaktor (200 ml, 5 bar, 700 °C, Stickstoff und Wasserdampf)
- 2) Fluidisierungsteststand (3 l, atmosphärisch, Stickstoff und Luft)
- 3) 10kW-Pilotreaktor (30 l, 7 bar, 700 °C, Stickstoff und Wasserdampf)



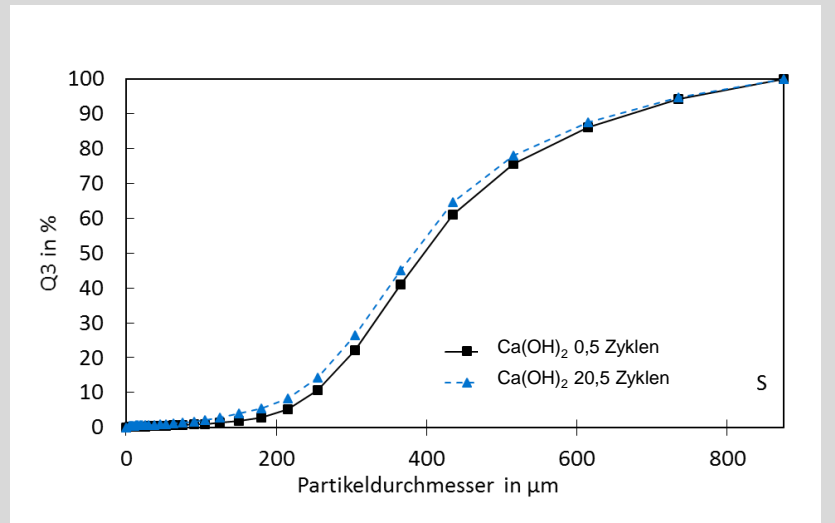
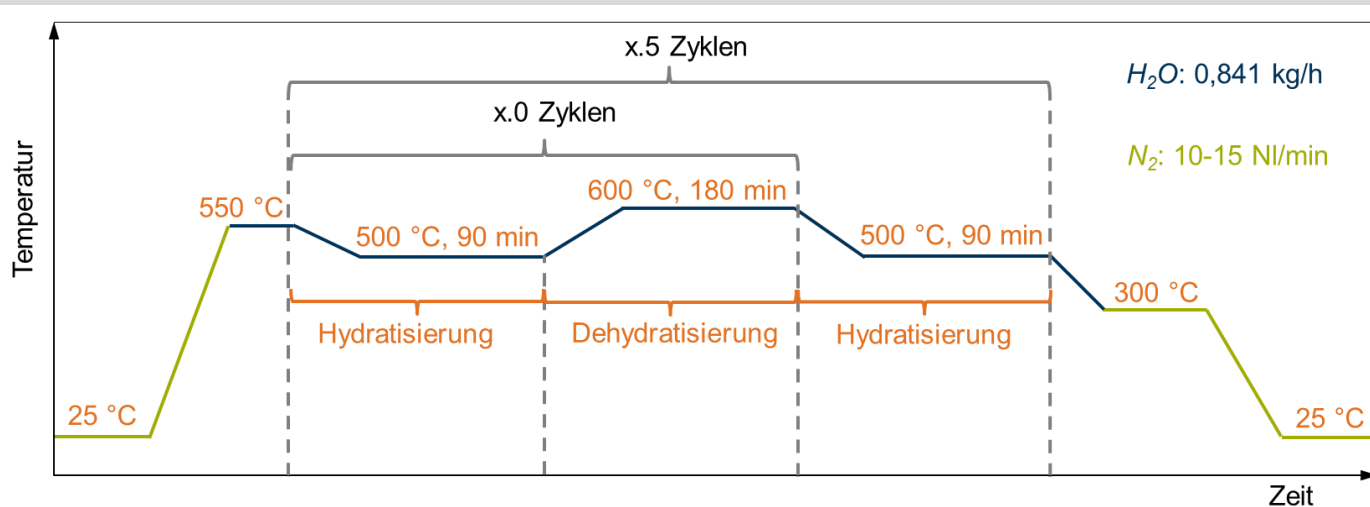
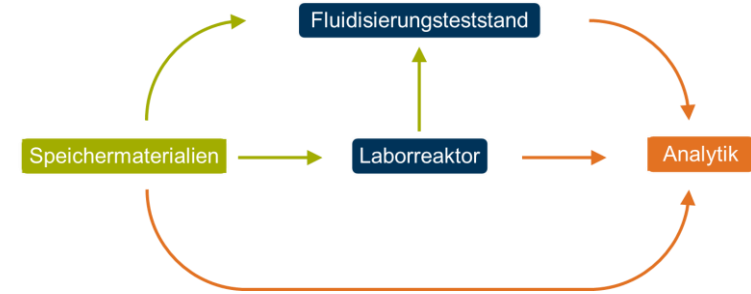
Technische Umsetzung

Versuchsanlagen und Messergebnisse

Ergebnisse Laborreaktor

Vollautomatisierte Zyklisierungsversuche
(chemische und mechanische Stabilität)

- Technischer Vollumsatz für Hydratation und Dehydratation
- Nur geringe Änderung in der PGV (leichte Verbackung am Filter) → **Zyklusstabilität gegeben!**



Technische Umsetzung

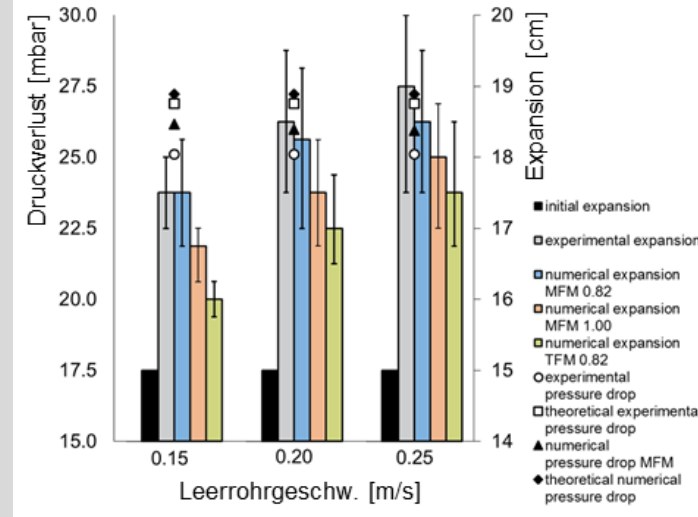
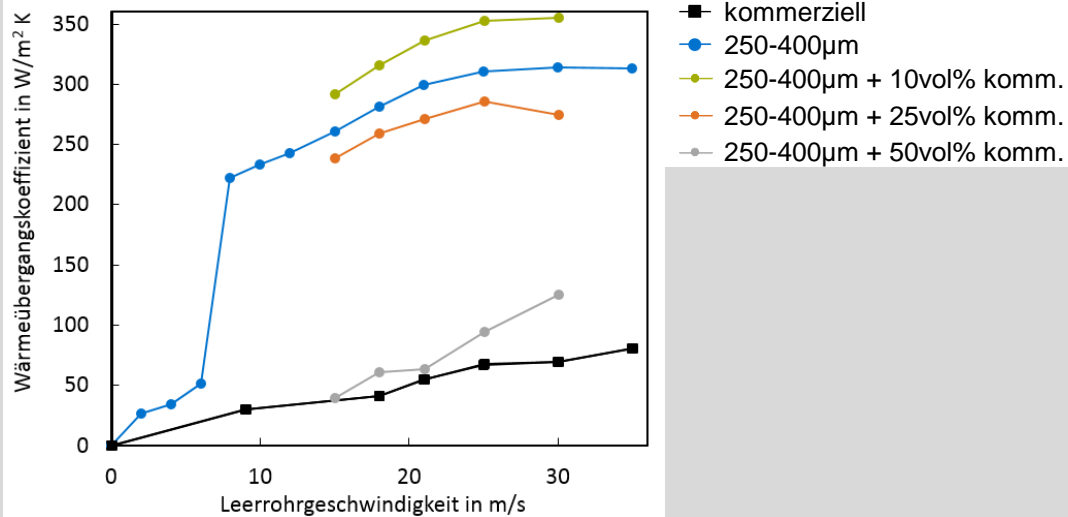
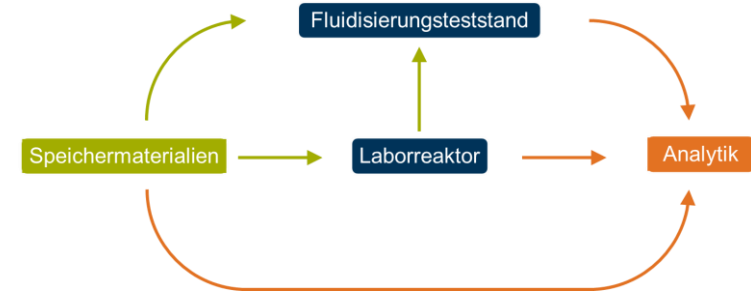
Versuchsanlagen und Messergebnisse

Ergebnisse Fluidisierungsteststand

Untersuchung der Hydrodynamik und des Wärmeübergangs

(Druckverlust, Expansion, Blasen- und Partikelverhalten, Wärmeübergang auf horizontales Rohr)

- Wärmeübergang durch Fluidisierung deutlich optimiert (auch bei signifikantem Feinanteil)
- Validierung des CFD-Modells der Wirbelschicht anhand der Messdaten

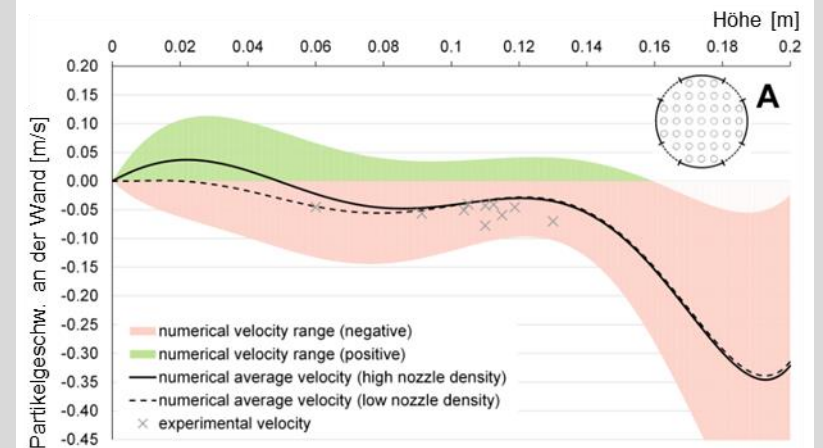
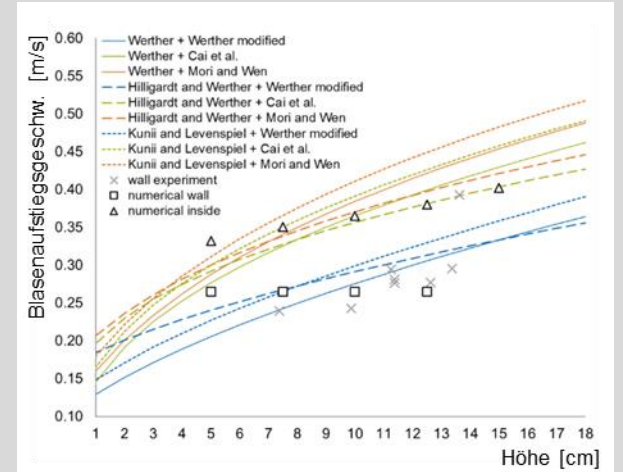
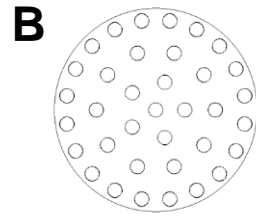
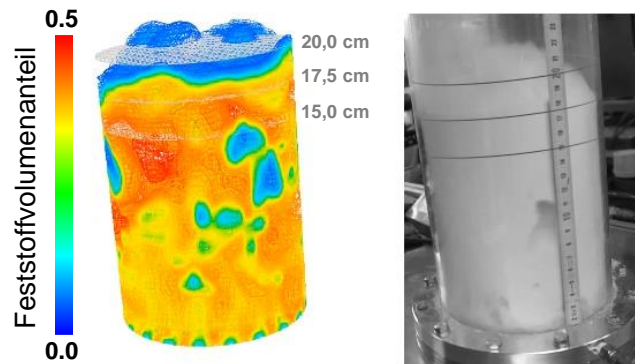
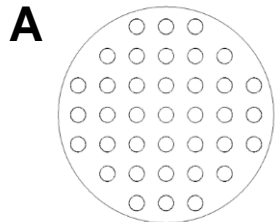
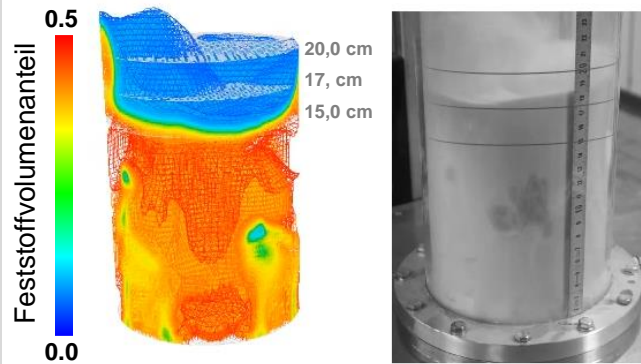


Simulation

Numerische Wirbelschichtsimulation

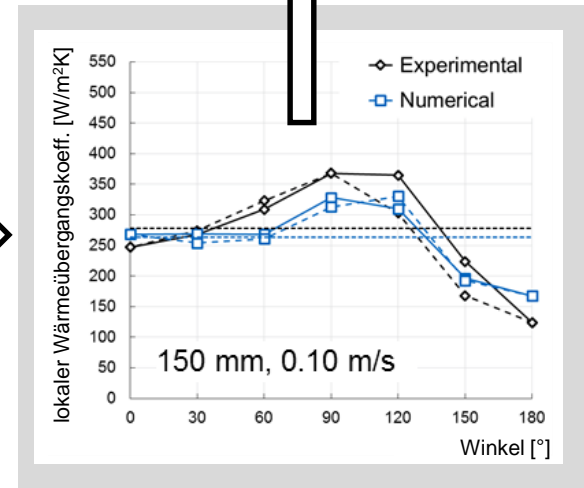
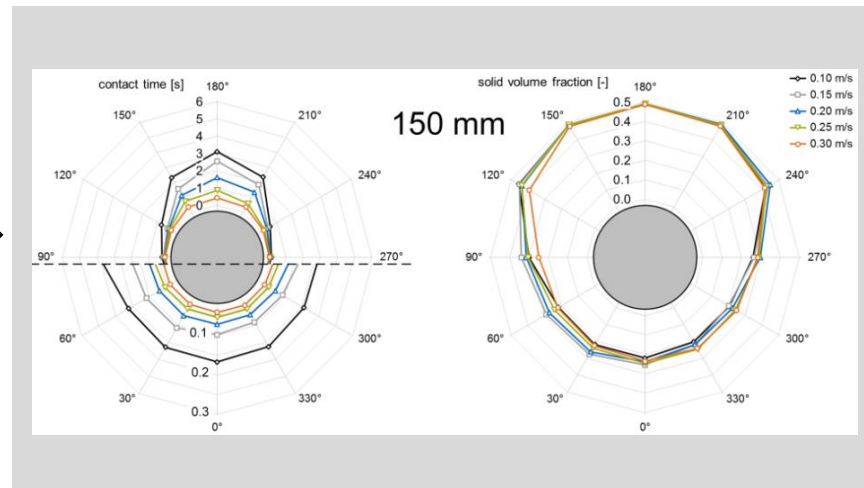
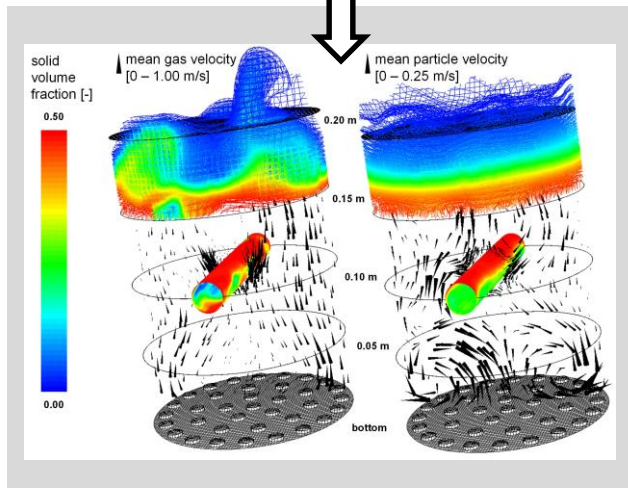
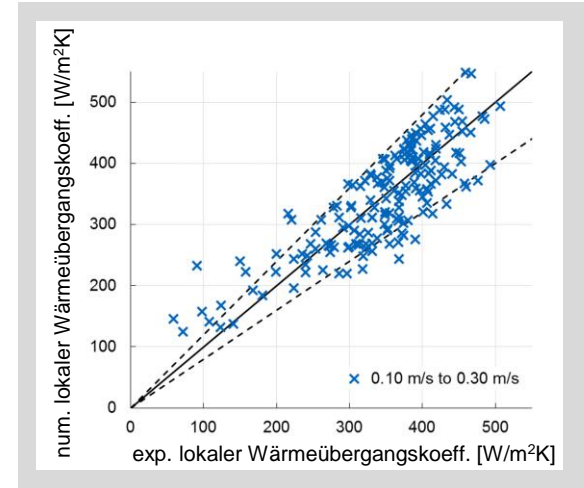
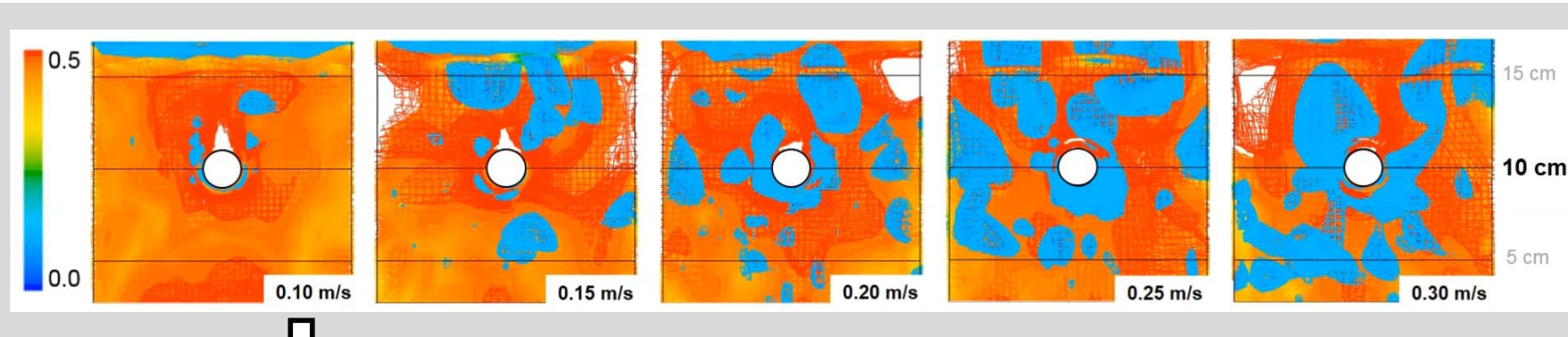
Verständnis und Quantifizierung der „inneren Phänomene“ in der Wirbelschicht

Abschätzung und Optimierung von Betriebsparametern und Scale-Up



Simulation

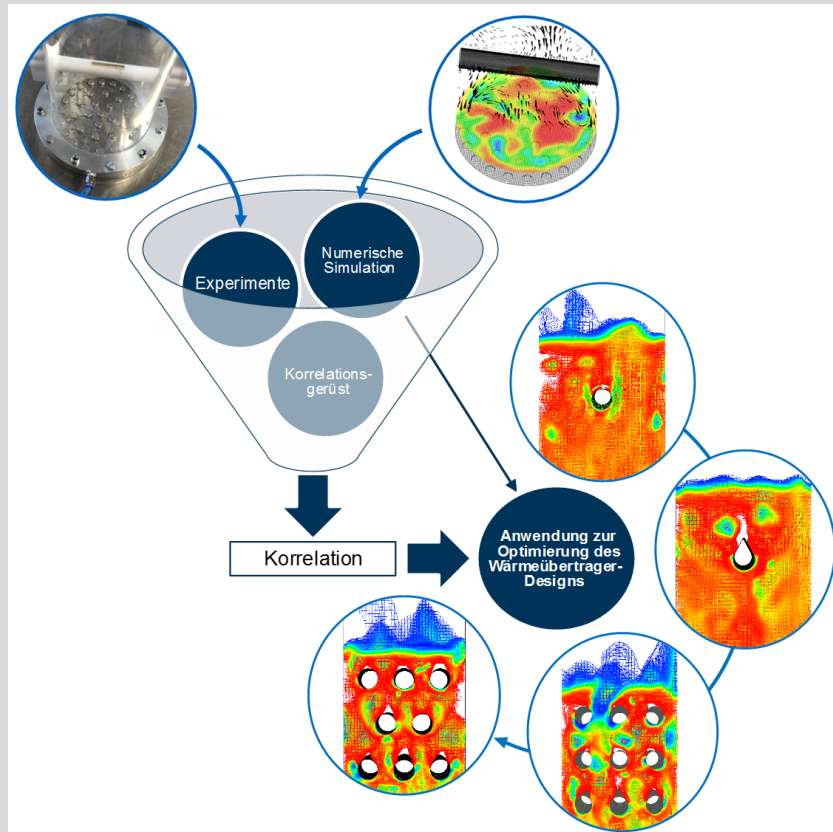
Numerische Wirbelschichtsimulation



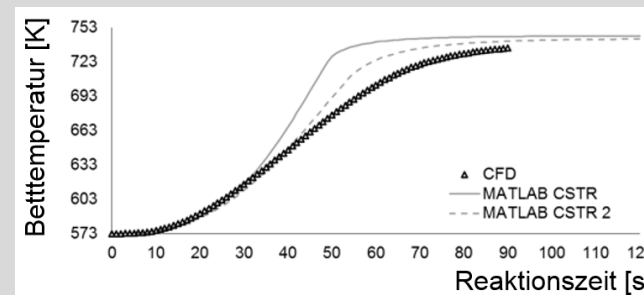
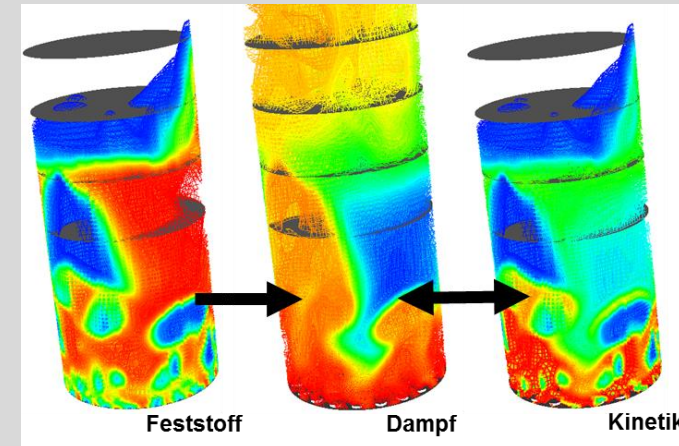
Simulation

Numerische Wirbelschichtsimulation

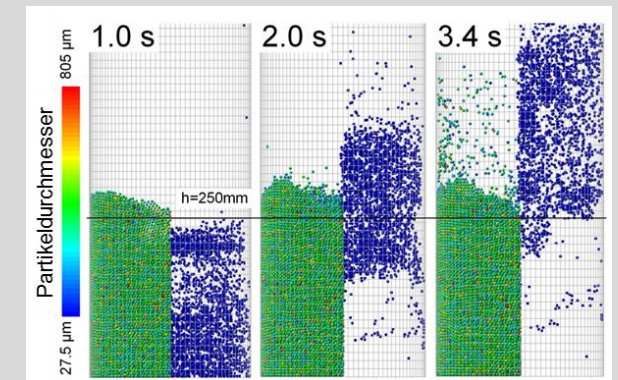
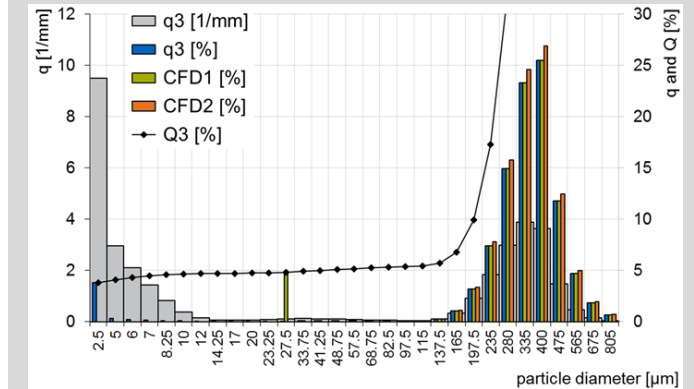
Auslegung von Rohrbündelwärmetauschern:



Untersuchungen Reaktionsverhalten:



Kohäsionseinfluss:



Simulation

Prozesssimulation

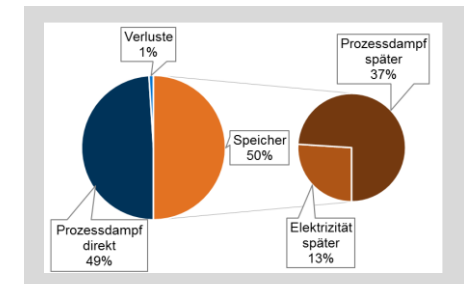
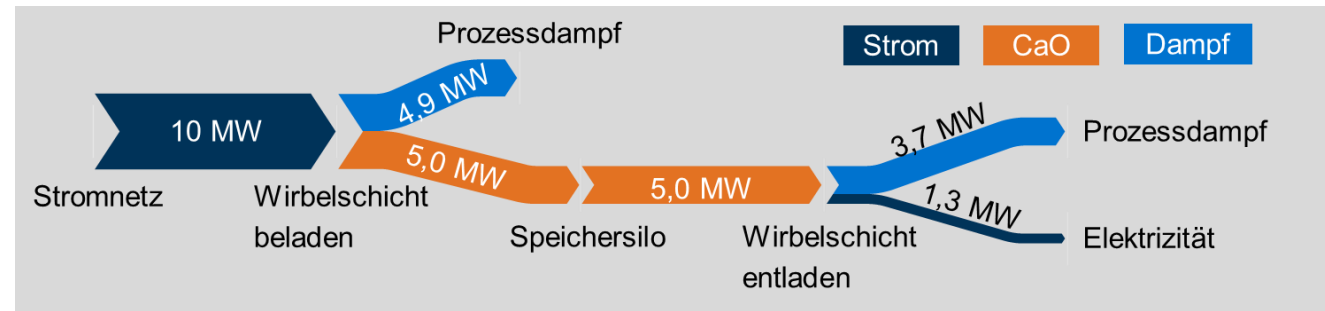
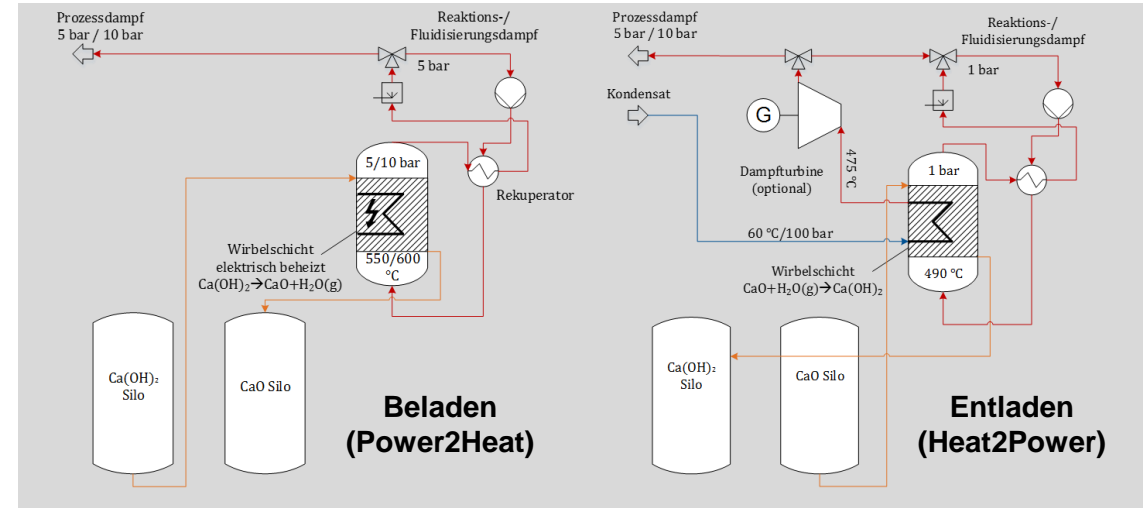
Ergebnisse Prozesssimulation

Konzept nicht zur Mindestlastabsenkung in **Kohle-KW** geeignet

Speicher kann sinnvoll bei **KWK**-Flexibilisierung sein
 (v.a. in Verbänden Synergieeffekte möglich: hohes
 Potential in vernetzten Strom/Wärme/Kälte-Systemen)

Power2Heat als vielversprechendste Anwendung
 (Kosten Wärmebereitstellung vergleichbar mit erdgas-
 basierter Wärmeversorgung, stark abhängig von Strom-
 preisschwankungen und regulatorischem Rahmen)

Power2Heat mit Wärmespeicher stellt den einzigen Weg dar, die CO₂-Emissionen in der
 Prozessindustrie zu senken ohne die Kosten für die Wärmeversorgung drastisch steigen zu lassen!



Erkenntnisse und Ausblick

Das Projekt TWIST

Erkenntnisse TcET:

Speichersystem ist vielversprechend (hinsichtlich Energiedichten, Kosten und technischer Umsetzbarkeit) und hat hohes Potential

Speichermaterial ist günstig und verfügbar

Wirbelschichtverfahren ist für großskalige Anwendung das einzig vielversprechende Verfahren (Wanderbett teurer, Festbett nicht umsetzbar)

Das Projekt TWIST:

Laufzeit: September 2018 bis August 2022

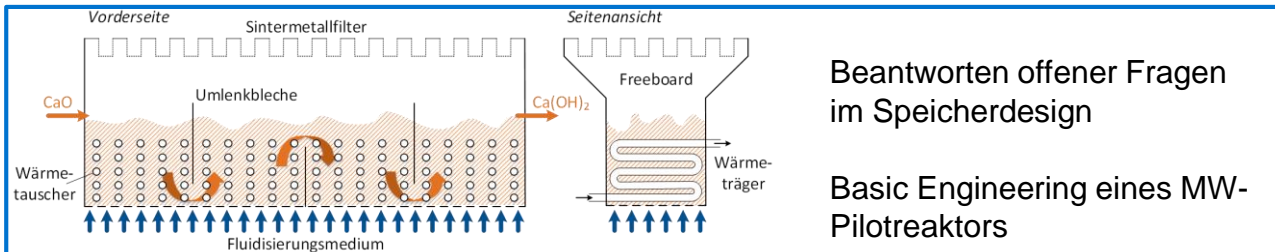
Budget: ca. 1,5 Mio. Euro

Mitarbeiter: 4 Wissenschaftler, 1 Techniker



Gefördert durch:

 aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Beantworten offener Fragen im Speicherdesign

Basic Engineering eines MW-Pilotreaktors

Evaluation der Speicherintegration in kombinierte Strom/Wärme/Kälte Systeme

Untersuchung des Einflusses des regulatorischen Rahmens

Integration eines vereinfachten Modells in kommerzielle Software um Markteinstieg zu erleichtern

Erkenntnisse und Ausblick

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Solkraftwerk (Tower CSP)

Nutzung eines Teils der Salzschnelze (hohes c_p) zum Aufladen des Speichers

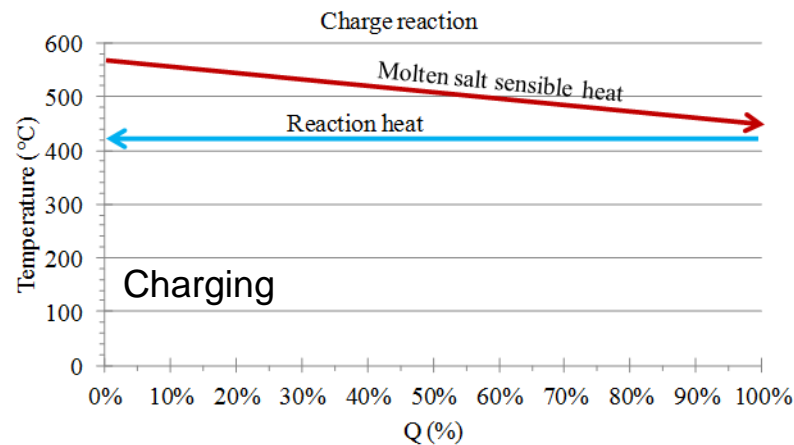
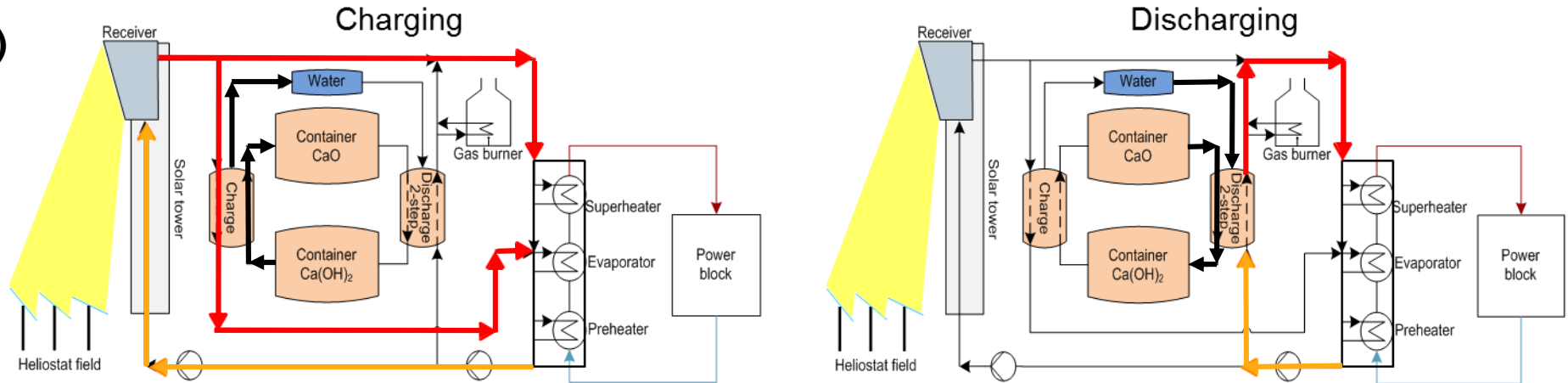
Erhöhung von:

- Flexibilität
- Auslastung

Fragestellungen:

- Wirtschaftlicher Vergleich zu Salzschnelze-Speicher?
- Langzeit-Speicherung?

Danov, Techno-economic Evaluation Thermo-chemical Storages, TUM Lecture 2016 by Siemens AG



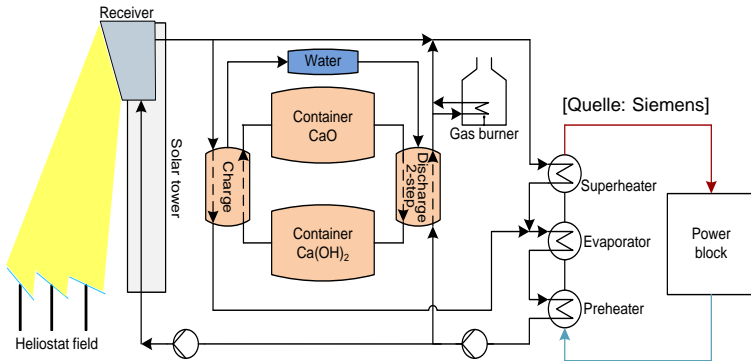
Quelle: ME News Wire

Erkenntnisse und Ausblick

Weitere Anwendungsmöglichkeiten



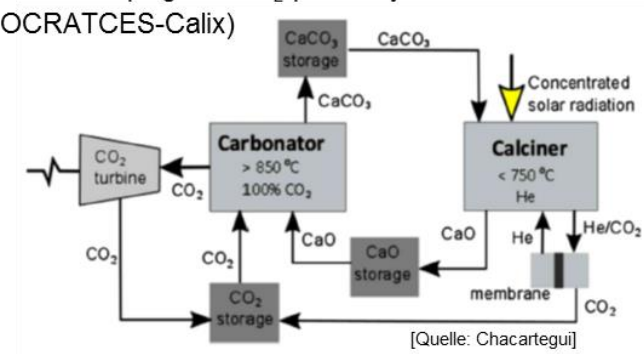
[Quelle: SaltX]



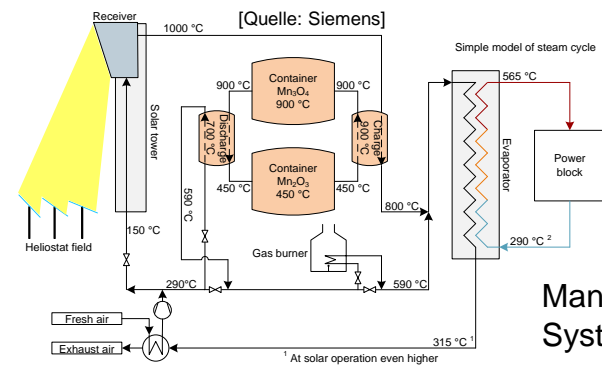
[Quelle: Siemens]

Wirbelschicht als Alternative zum Salzschnmelze-Speicher:
 Potential zur Kostenreduktion für längere Speicherdauer

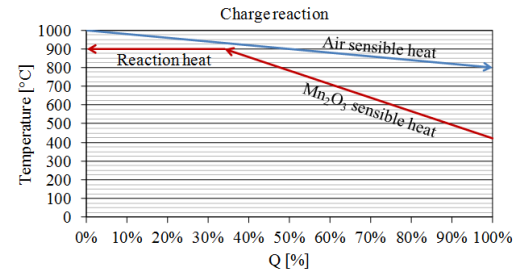
Calcium Looping mit CO₂-power cycle (SOCRATES-Calix)



[Quelle: Chacartegui]



Manganoxid-System



Wirbelschicht als Komponente neuer Hochtemperatur-Solkraftwerkkonzepte: Höhere Wirkungsgrade

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit! Fragen?

Kontaktinformationen:

Annelies Vandersickel
Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Energiesysteme

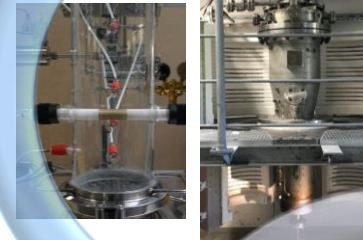
Tel: +49 89 289 16339
annelies.vandersickel@tum.de
www.es.mw.tum.de

Fachkongress SolarChemieR
18. Januar 2019

Peter Ostermeier
Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Energiesysteme

Tel: +49 89 289 16280
peter.ostermeier@tum.de
www.es.mw.tum.de

Technische Umsetzung



Materialien



Simulation

