



Thermochemische Energiespeicher – vom Wirbelschichtreaktormodell zum MILP-Ansatz

Vorstellung bei der TOPCon

Gesa Backofen
Technische Universität München
Berlin, 24.05.2022

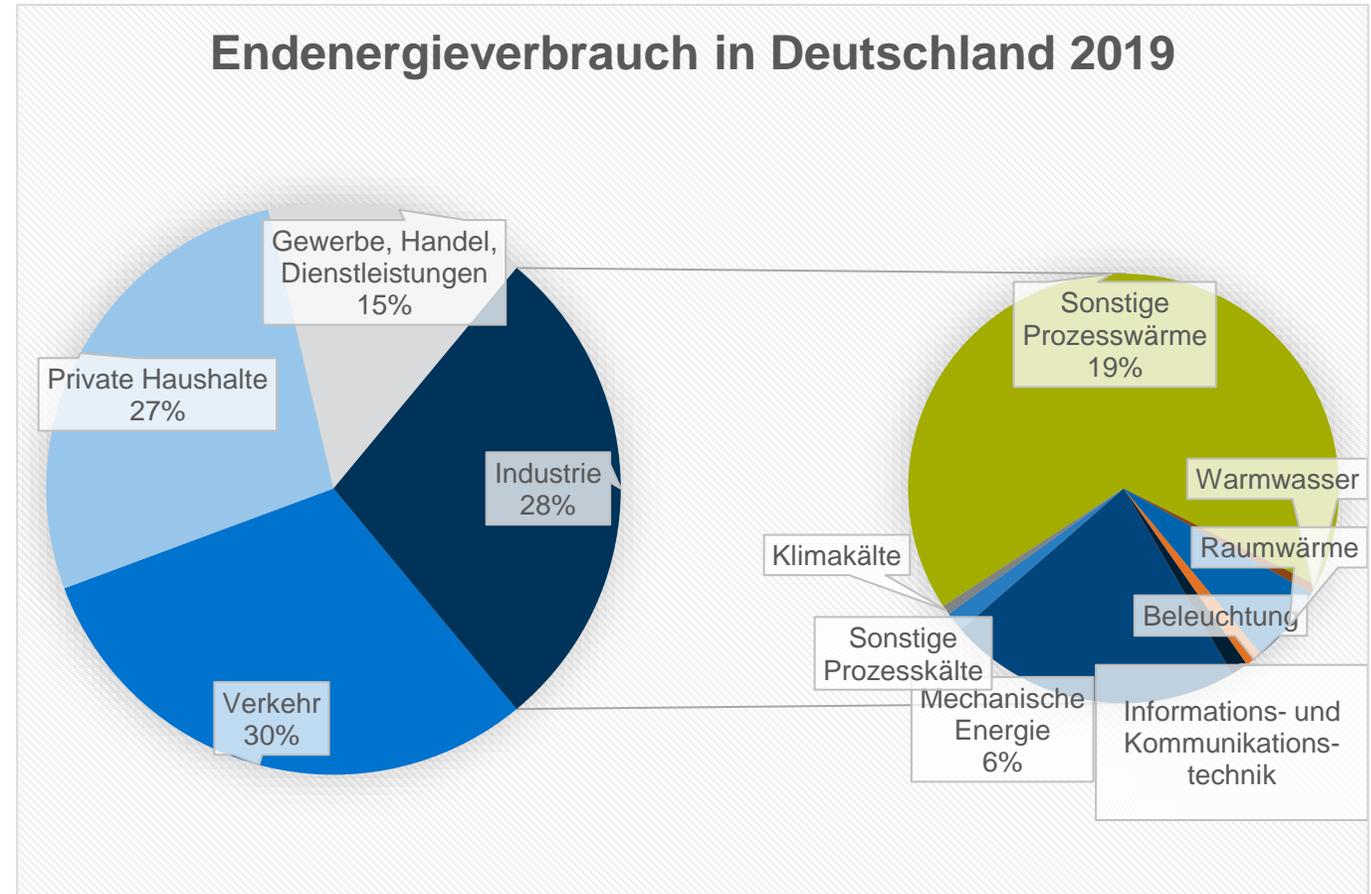
Motivation

Thermochemische Energiespeicher in der Industrie

- Deutschland will klimaneutral werden!
- Industrielle Prozesswärme ist ein großer Teil des deutschen Endenergieverbrauchs
- Bisher wird diese vor allem durch fossile Brennstoffe erzeugt

Thermochemischer Energiespeicher:

- Sektorkopplung zwischen erneuerbarem Strom und Prozesswärme
- Zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Bedarf



Eigene Darstellung auf Basis von BMWK: Energieeffizienz in Zahlen 2021

Agenda



Projekt TWIST



Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher



Wirbelschichtreaktormodell



Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark



Fazit und Ausblick

Projekt TWIST

Thermochemische Energiespeicher im **Wirbelschichtverfahren** für Industrieanwendungen und **Stromerzeugung**

Vorgängerprojekt TcET

Konzeptentwicklung und
Proof of Concept im Labormaßstab

Aufgaben des TWIST Projekts:

- Scale-Up: Speicherreaktion im Technikumsmaßstab
- Untersuchung von Betriebsparametern
- Analyse und Optimierung von Wärmeübergängen
- Identifikation von Anwendungsfällen
- Konzept einer Demonstrationsanlage

Zeitraum: 2018-2022



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

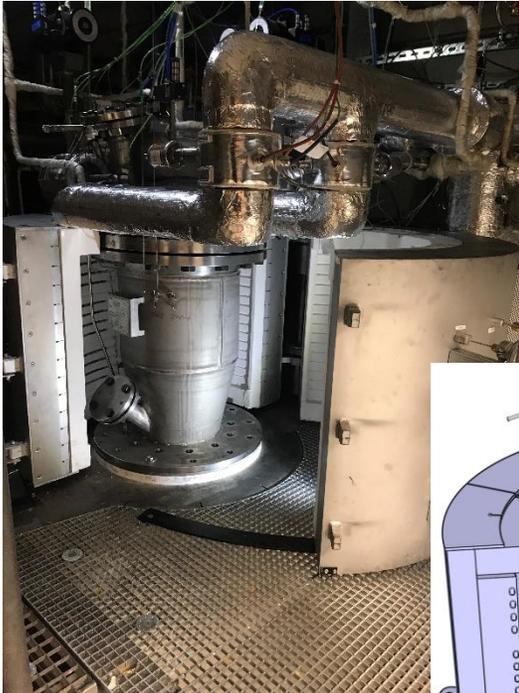


Auslegung und Anwendungsfall
Demoanlage

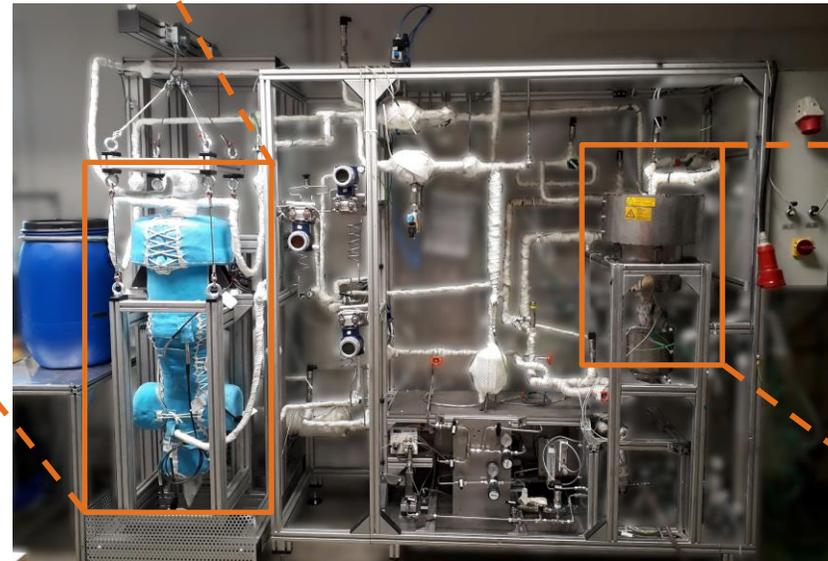
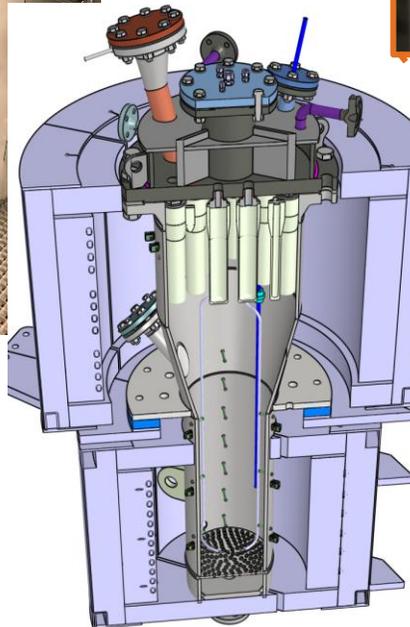
Vom Laborreaktor zum Demonstrationsreaktor

Übersicht Versuchsanlagen

Reaktive Wirbelschichten



*FluBeStor – 10 kWch Pilotreaktor
Bis 6 bar, 700 °C Dampf -
Reaktionszone 30 liter, \varnothing 257 mm*



*Laborreaktoren
0,2 L Reaktionsvolumen, bis 6 bar, 600 °C
1,8 L Reaktionsvolumen, bis 4 bar, 800 °C*

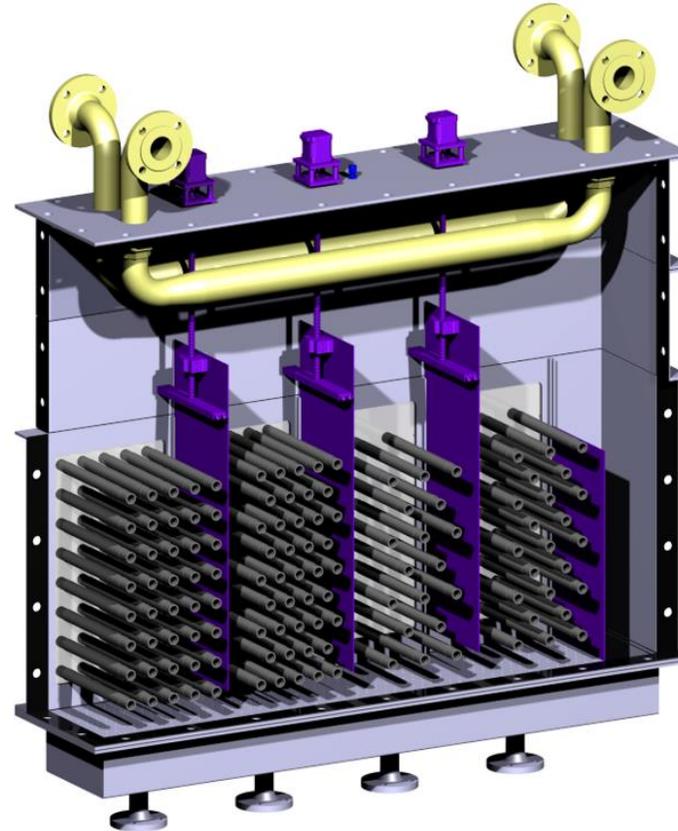
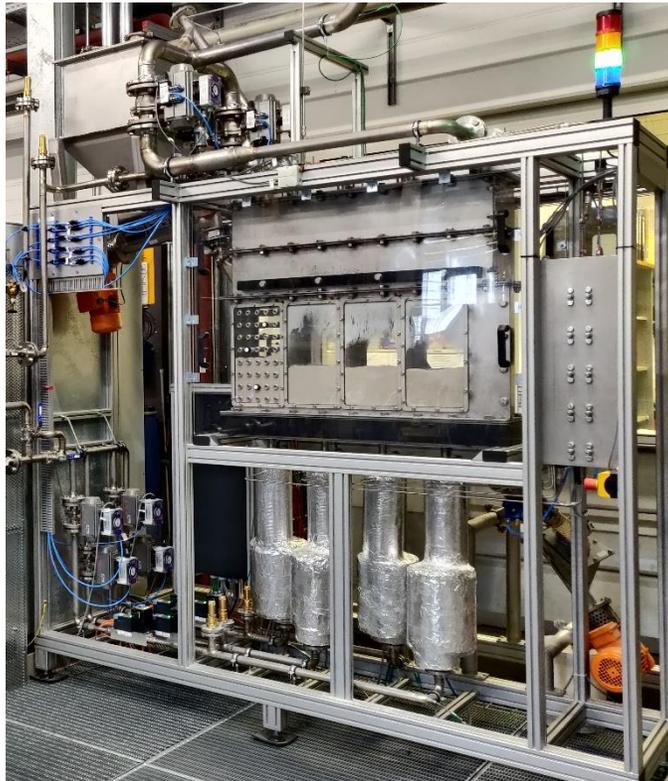


Untersuchungsziele:

- Betriebsverhalten/Zyklisierung
- Chemische und mechanische Stabilität
- HT-Wärmeübergangsmessungen

Übersicht Versuchsanlagen

Kaltmodelle



Kaltmodell FLEX
 Reaktorvolumen 80 L
 Verschiedene Einbauten möglich

Untersuchungsziele:

- Fluidisierung/Fluidisierbarkeit
- Materialförderung
- Wärmeübergang Einzelrohr/Rohrbündel
- Abriebsverhalten



Fluidisierungsteststand mit Wärmestromsonde

Agenda

Projekt TWIST

Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher

Wirbelschichtreaktormodell

Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark

Fazit und Ausblick

Wärmespeichertechnologien

Ein wichtiges Entwicklungsfeld für die Energiewende

Wärme > 150 °C

Wenige etablierte Technologien (GWh-Maßstab) verfügbar

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

Speichermaterial $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$:

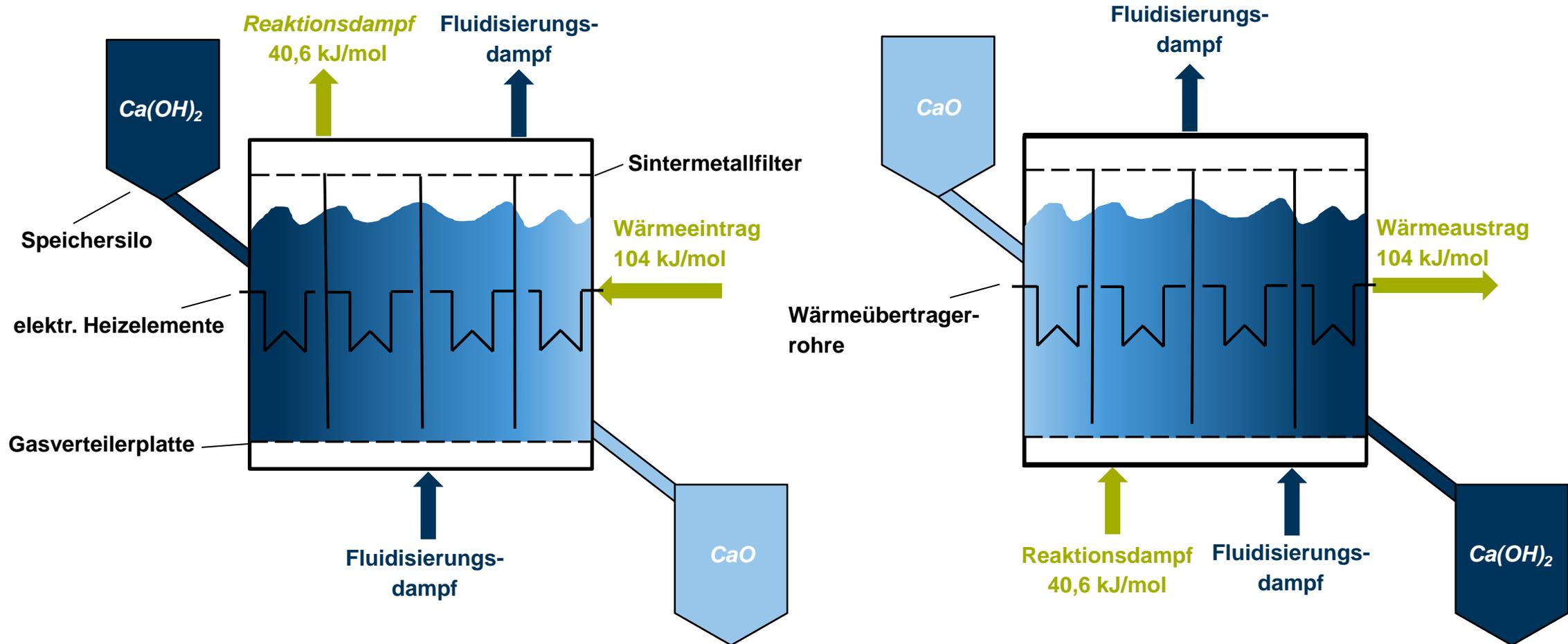
- Reversible Reaktion
- Nicht giftig und in der Kalk- und Zementindustrie erprobt
- Hohe Energiedichte mit 385 kWh/m³
- Niedrige Kosten mit unter 5 ct pro kg
- Atmosphärische Gleichgewichtstemperatur ca. 450 °C



Funktionsweise thermochemisches Speichersystem

Beladevorgang $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}^{(g)}$

Entladevorgang $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}^{(g)} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$

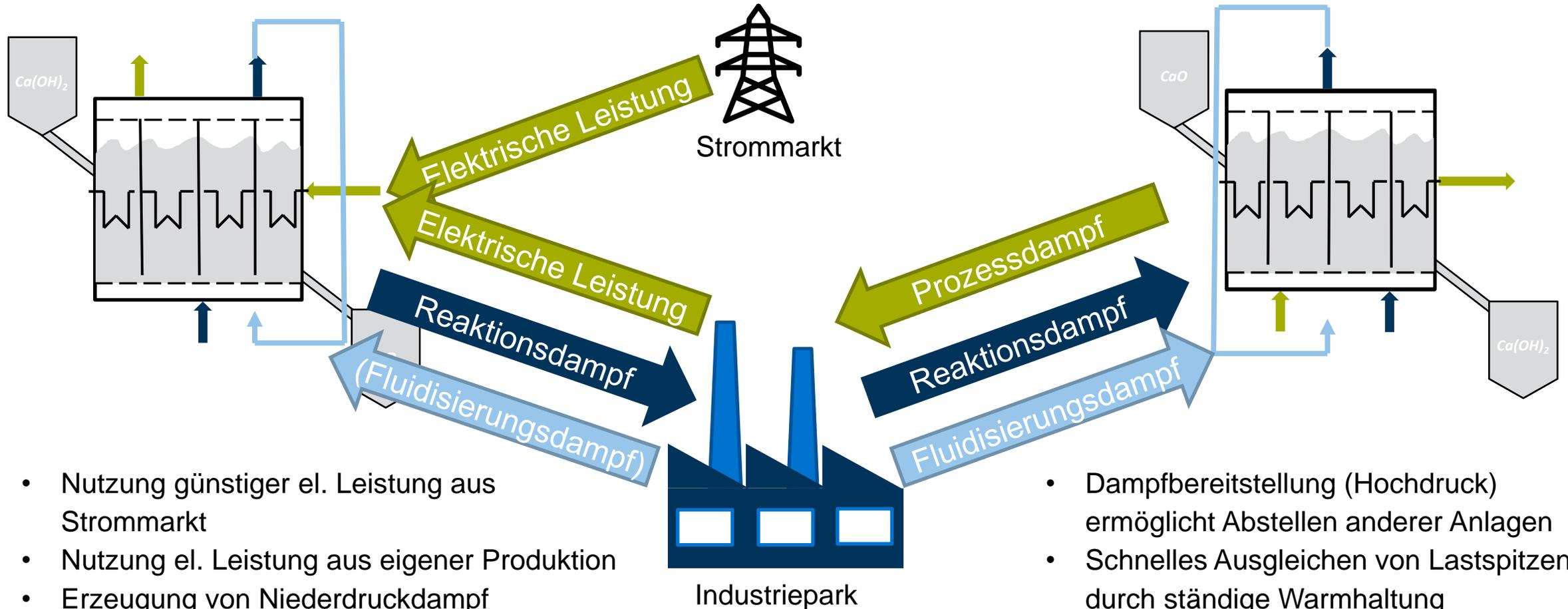


Anwendung des Speichersystems

Einbindung in die Energieversorgung eines Industrieparks

Beladevorgang $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}^{(\text{g})}$

Entladevorgang $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}^{(\text{g})} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$



- Nutzung günstiger el. Leistung aus Strommarkt
- Nutzung el. Leistung aus eigener Produktion
- Erzeugung von Niederdruckdampf

- Dampfbereitstellung (Hochdruck) ermöglicht Abstellen anderer Anlagen
- Schnelles Ausgleichen von Lastspitzen durch ständige Warmhaltung
- Niederdruckdampfsenke

Agenda

Projekt TWIST

Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher

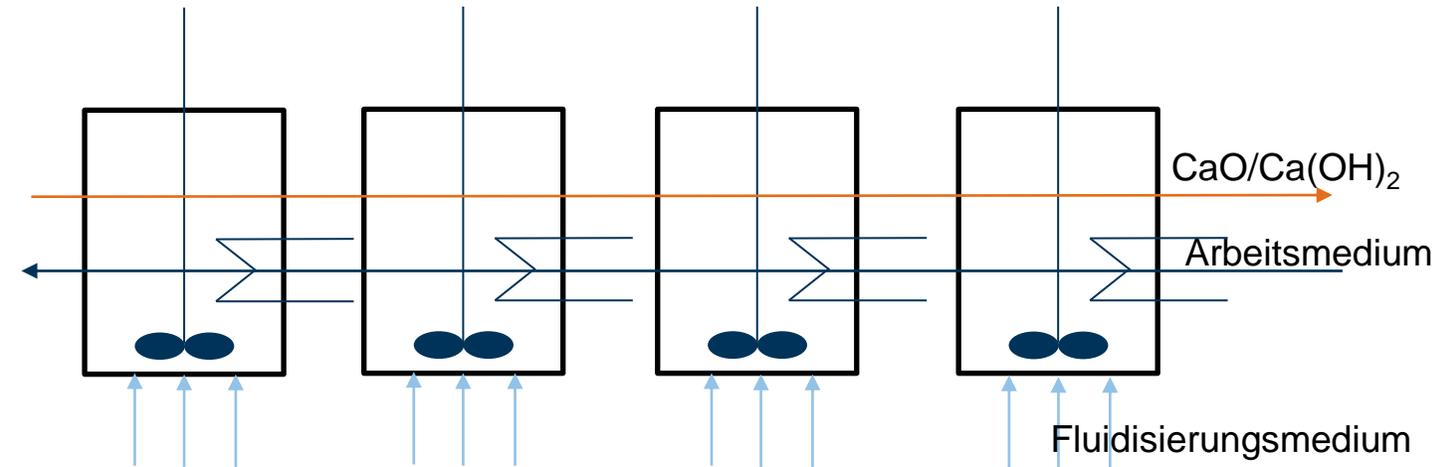
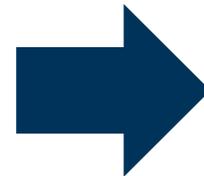
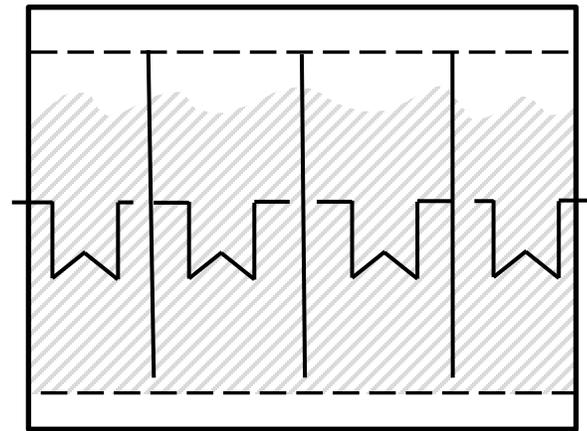
Wirbelschichtreaktormodell

Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark

Fazit und Ausblick

Modell Wirbelschichtreaktor

CSTR Ansatz in Matlab



Reaktordesign:

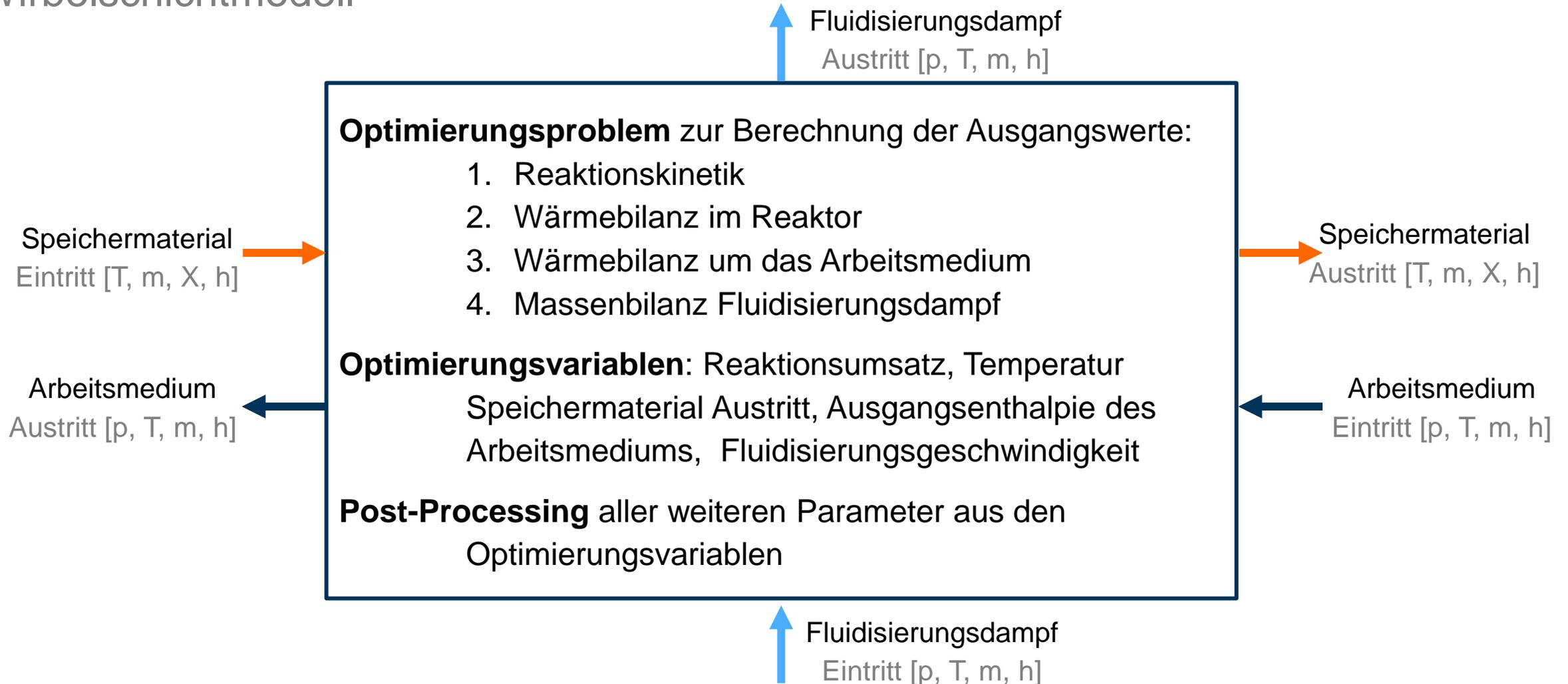
- Fluidisierung in reinem Dampf
- Unterlaufwehre trennen Reaktorsegmente für einheitliche Verweilzeit
- Einbauten für Wärmeübertragung

CSTR Modell:

- Reaktorsegmente sind einzelne CSTR
- Annahme eines idealen Rührkessels mit idealer Vermischung
- Jeder CSTR entspricht einem Gleichungssystem mit Kinetik und Energiebilanzen
- Verschaltung in Gleich- oder Gegenstrom

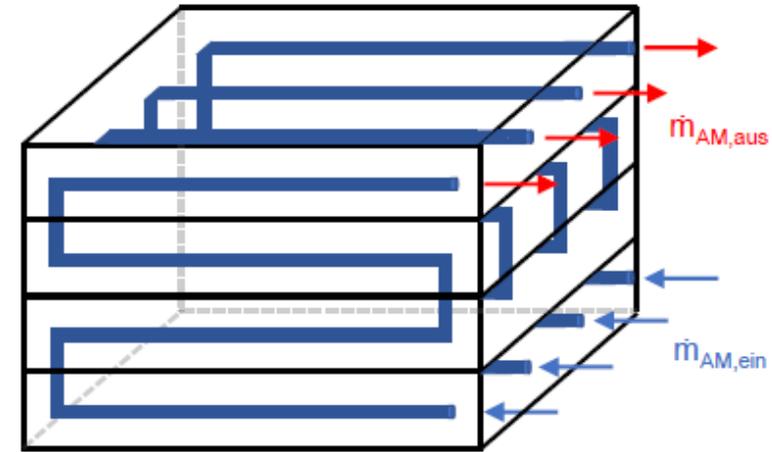
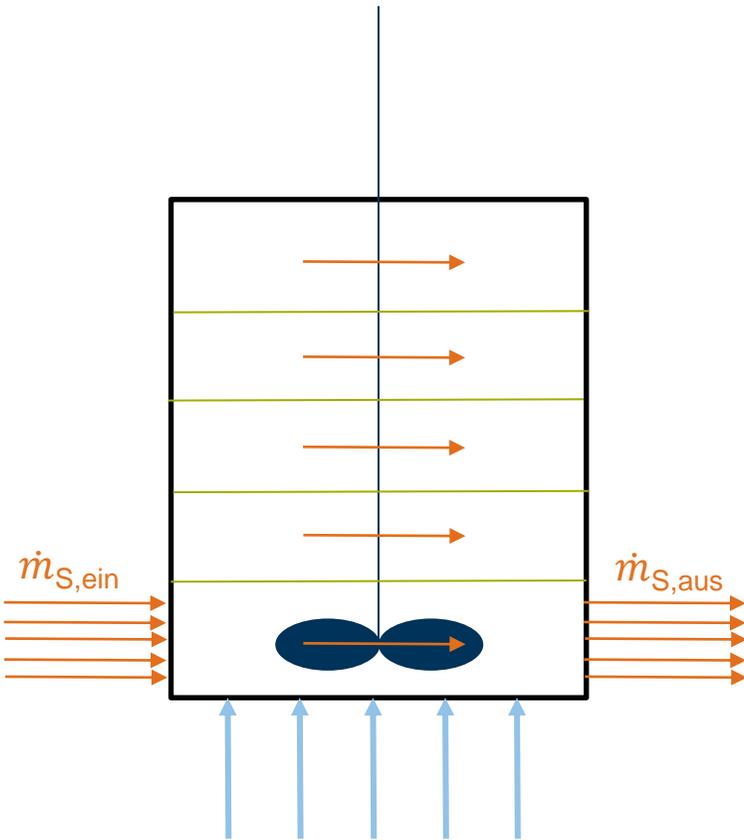
Berechnung eines Reaktorsegments

Wirbelschichtmodell



Modell Wirbelschichtreaktor

Erweiterung des CSTR Ansatzes



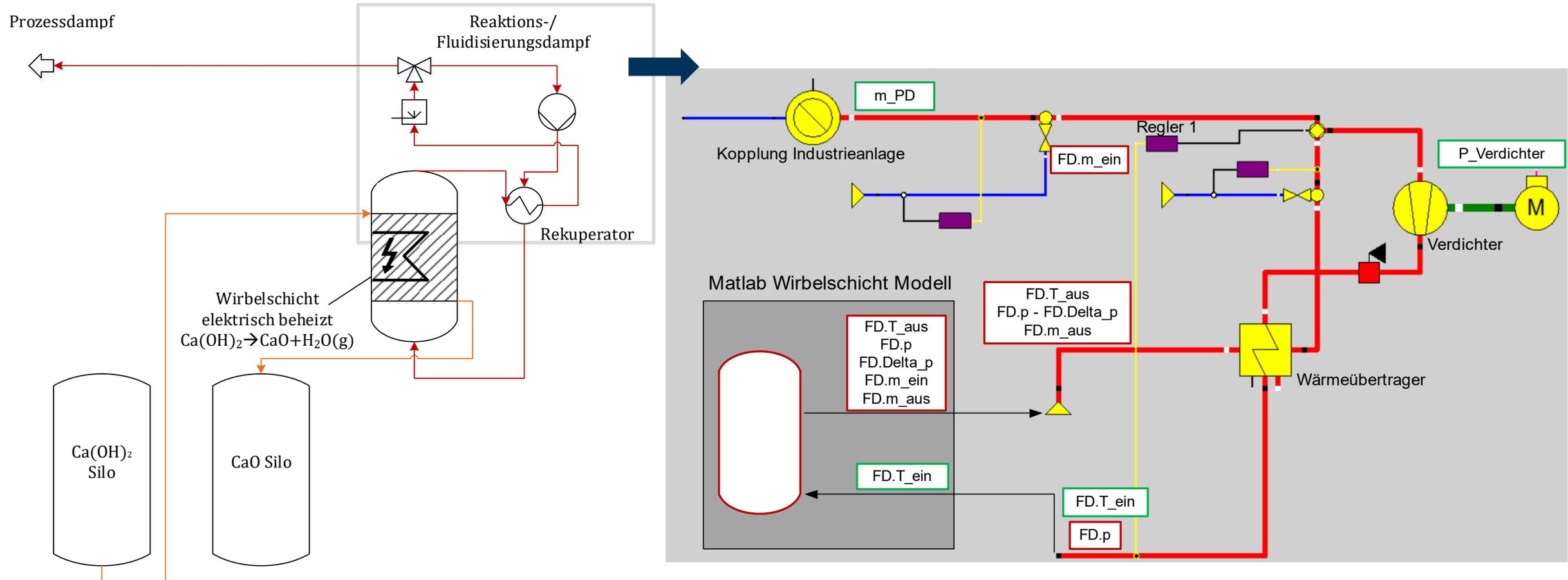
Problem: Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Fluidisierungsgeschwindigkeit kann im CSTR Modell nicht abgebildet werden

Ansatz:

- Einteilung jedes CSTRs in horizontale Ebenen
 - Fluidisierungsgeschwindigkeit kann sich nach jeder Ebene ändern
 - Aufteilung des eingehenden Massenstroms
 - Berechnung der Ebenen von unten nach oben
 - Zusammenführung des Feststoffes durch Mischtemperaturen und Mischkonzentrationen
- Realistische Austrittsgeschwindigkeiten des Fluidisierungsmediums

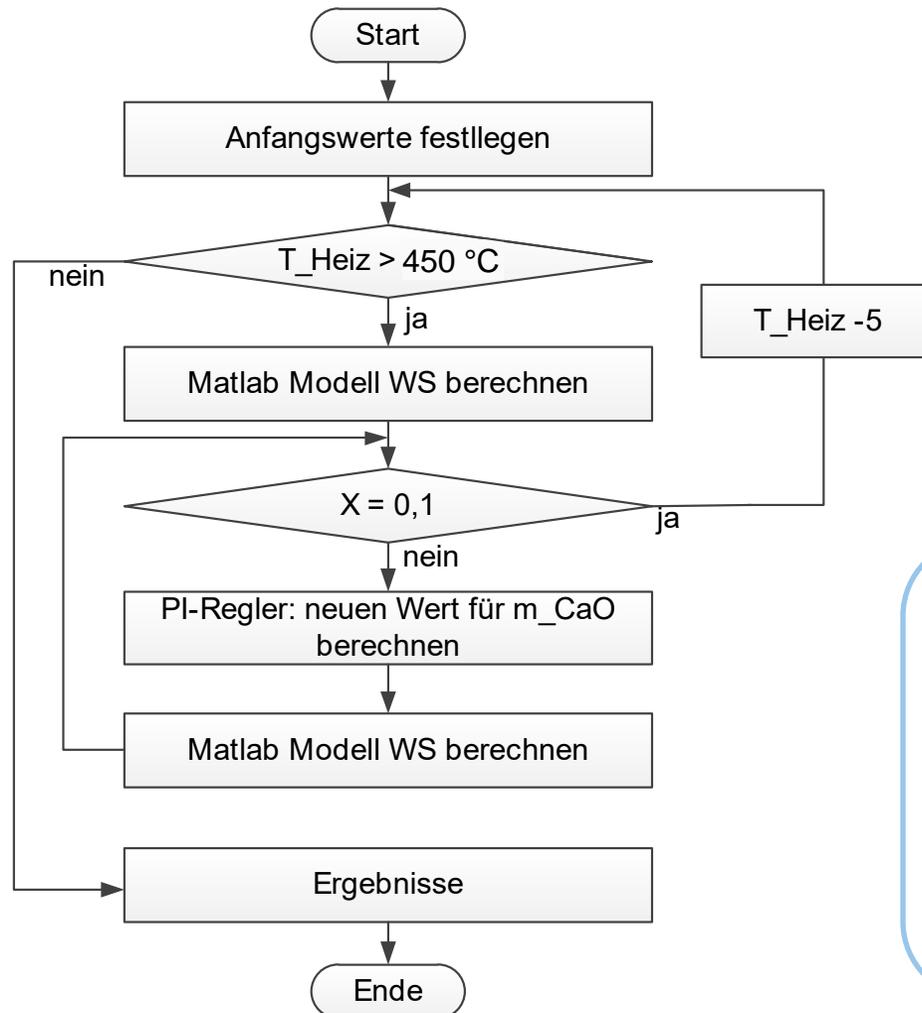
Recycling des Fluidisierungsdampfes in Epsilon

Beladen (Power2Heat)



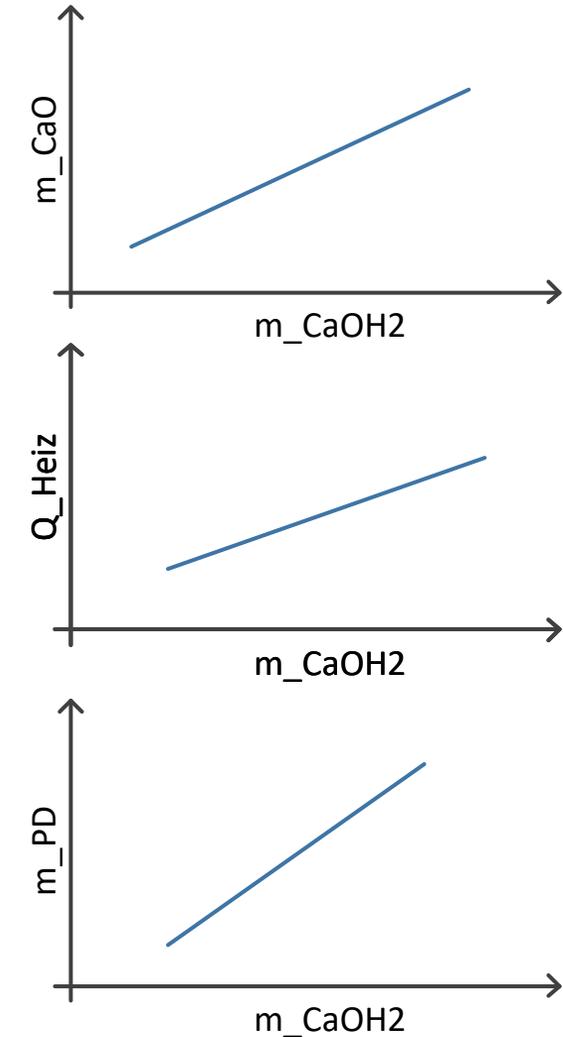
Parametervariation Beladen

Linearisierung des Wirbelschichtmodells



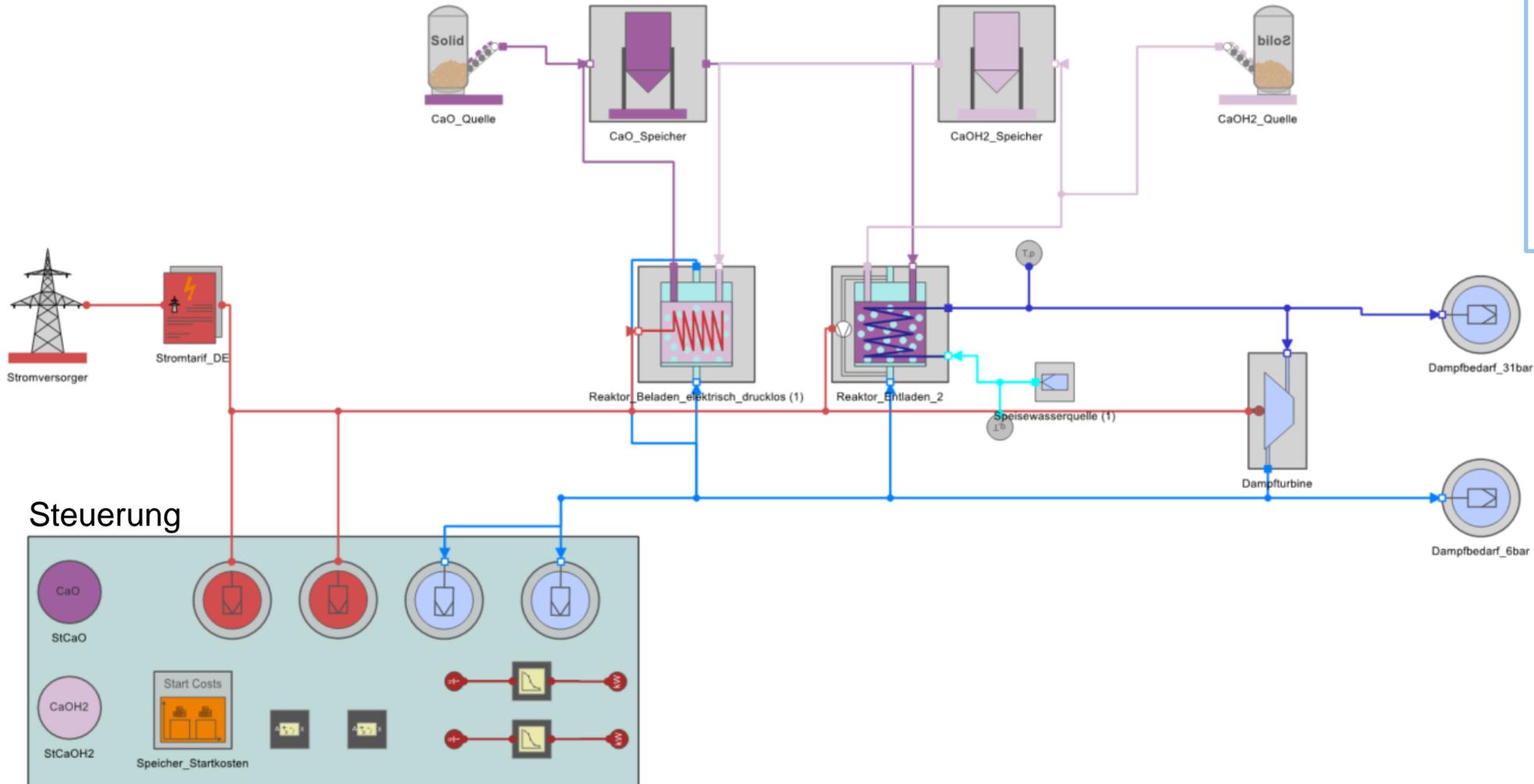
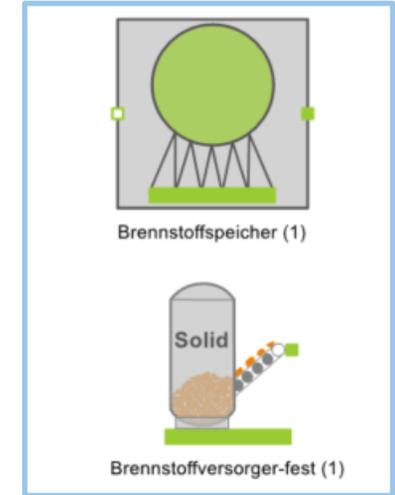
Konstante Werte:

- Reaktorvolumen und Geometrie
- Reaktordruck
- Fluidisierungsgeschwindigkeit am Eintritt
- Umsatz wird konstant gehalten



TOP-Energy Modell des Speichersystems

Basierend auf:



Agenda

Projekt TWIST

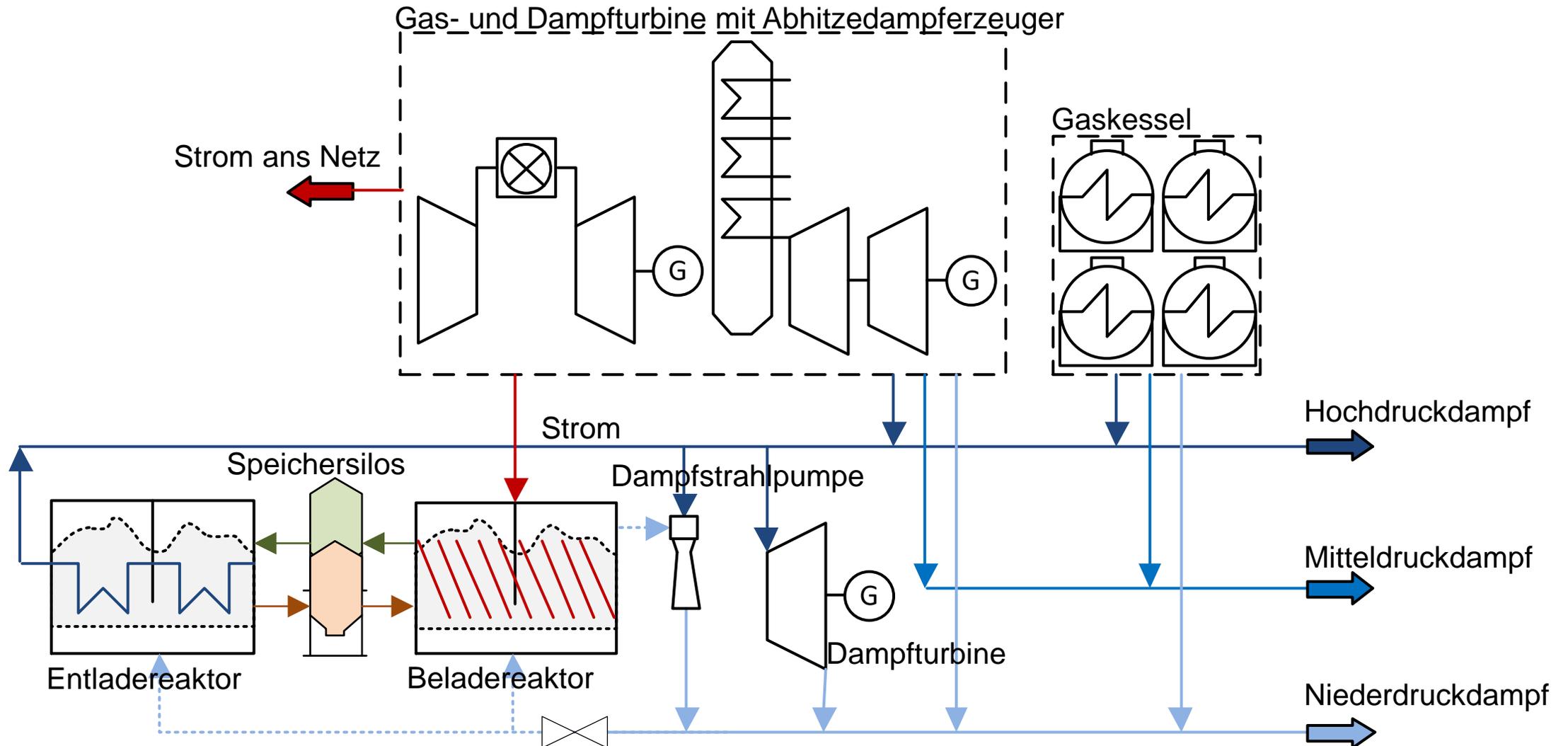
Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher

Wirbelschichtreaktormodell

Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark

Fazit und Ausblick

Einbindung in die Energieversorgung eines Industrieparks



Agenda



Projekt TWIST



Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher



Wirbelschichtreaktormodell

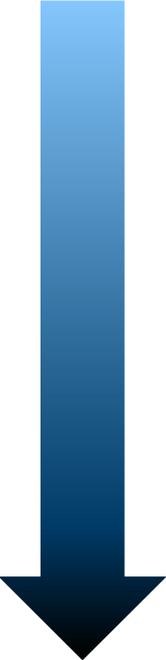


Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark



Fazit und Ausblick

Fazit und Ausblick



Fazit:

- Thermochemische Energiespeicher können zur Energiewende im Industriesektor beitragen
- Bisherige Ergebnisse zeigen gutes wirtschaftliches Potential bei steigenden Gaspreisen
- Die Wirbelschichtreaktoren können durch ein erweitertes CSTR Modell abgebildet werden
- Komplexe Modelle können durch Parametervariationen in linearen Kennlinien dargestellt werden



Ausblick:

- Nachfolgeprojekt zur Planung einer Demonstrationsanlage
- Zubauoptimierungen für die Energiewende in Bayern/Deutschland/Industrieparks
- Hochtemperaturwärmespeicher als Standardkomponenten in TOP-Energy? 😊

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit!

Gesa Backofen

Lehrstuhl für Energiesysteme

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

gesa.backofen@tum.de

089 289 16339

