



Thermochemische Energiespeicher – vom Wirbelschichtreaktormodell zum MILP-Ansatz

Vorstellung bei der TOPCon

Gesa Backofen
Technische Universität München
Berlin, 24.05.2022

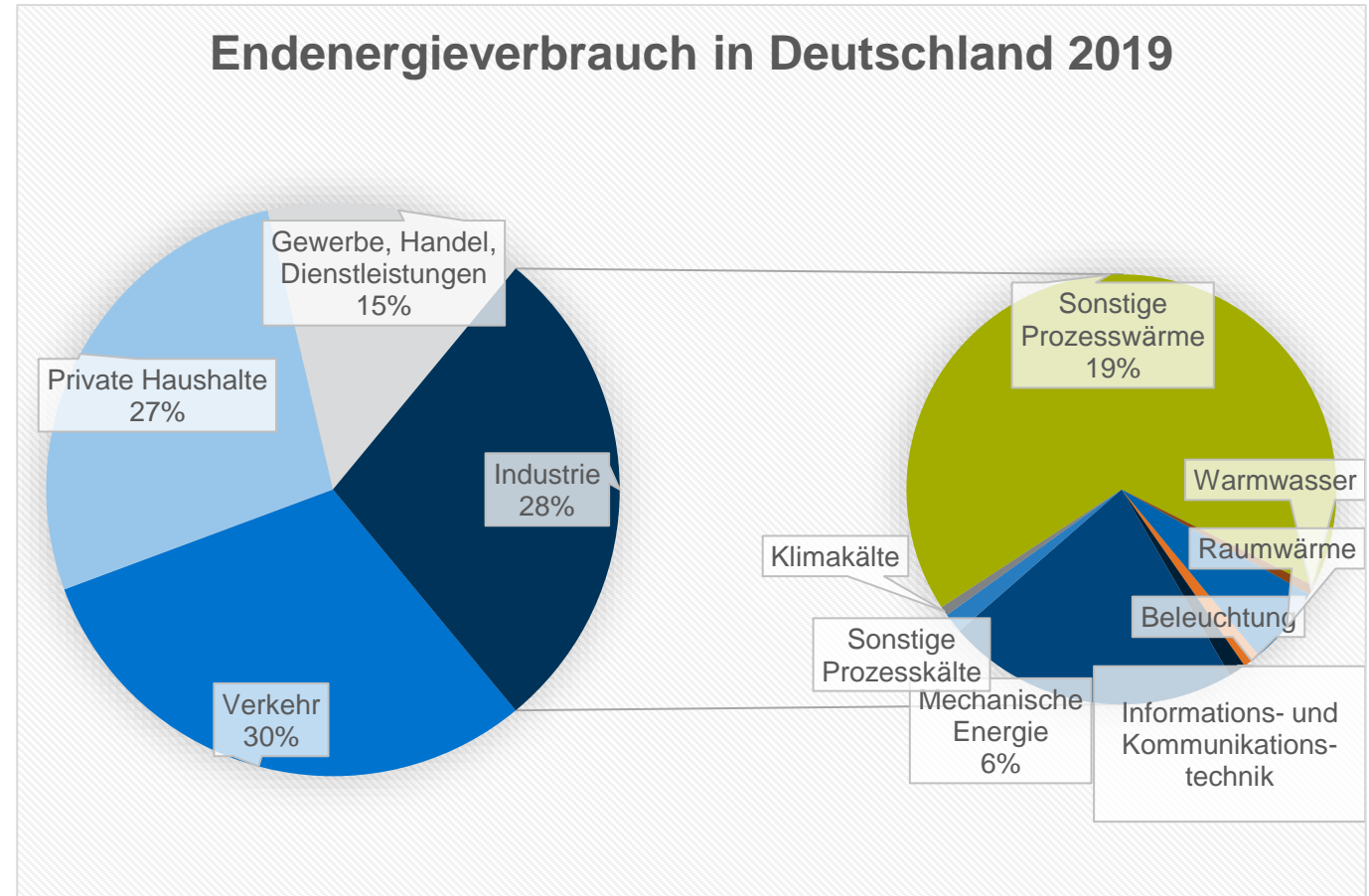
Motivation

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

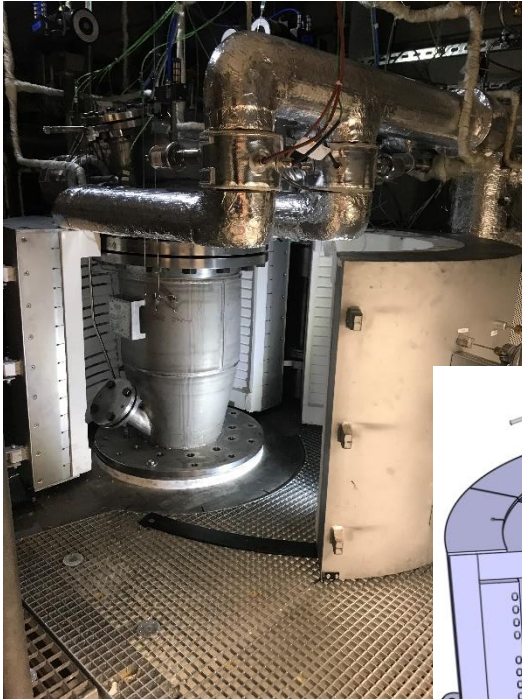


Auslegung und Anwendungsfall
Demoanlage

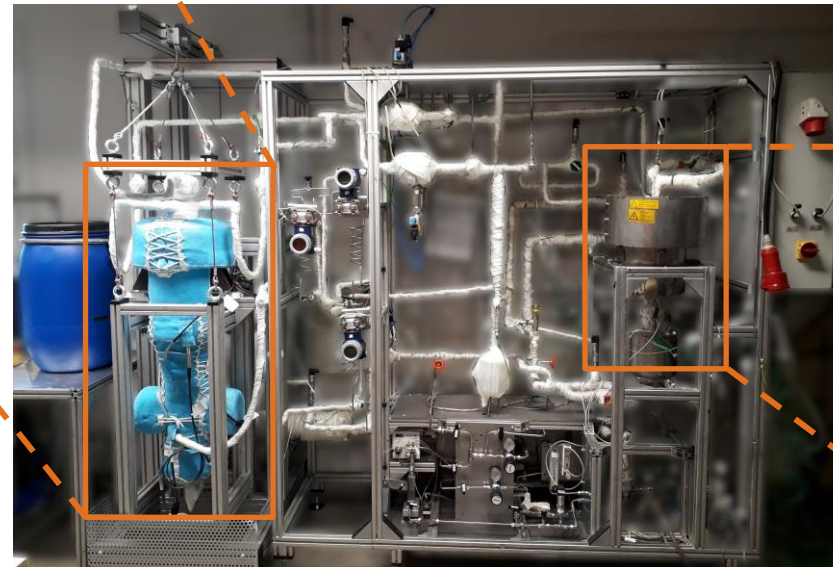
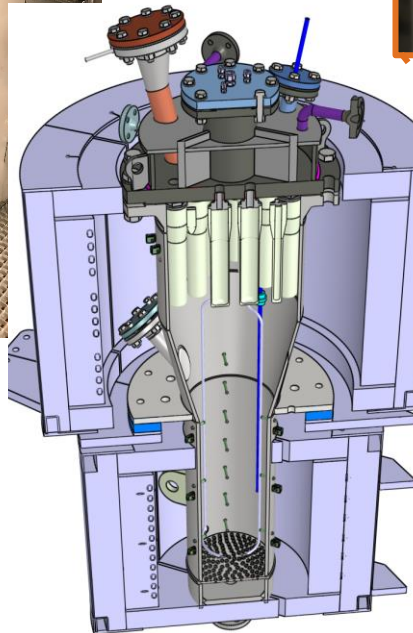
Vom Laborreaktor zum Demonstrationsreaktor

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*

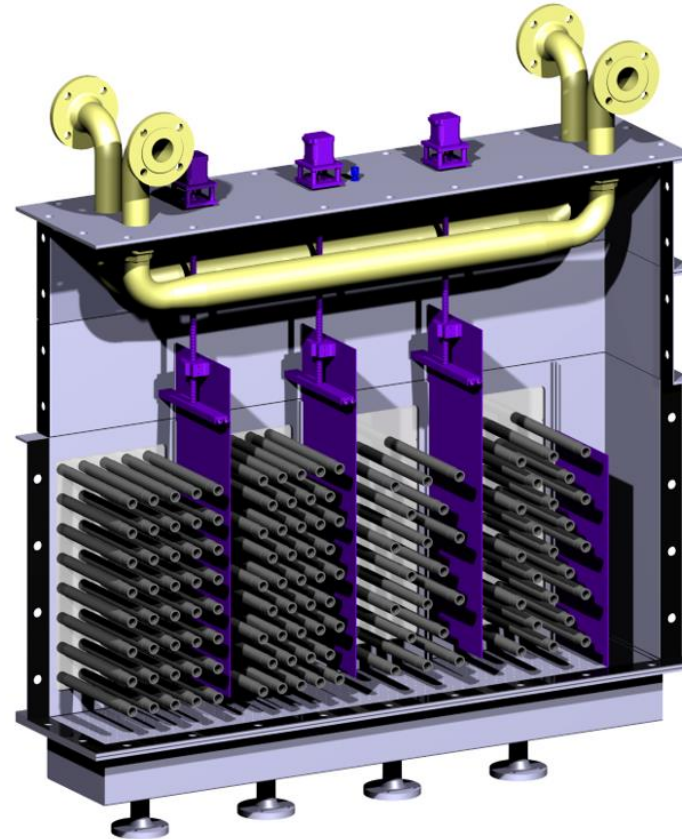
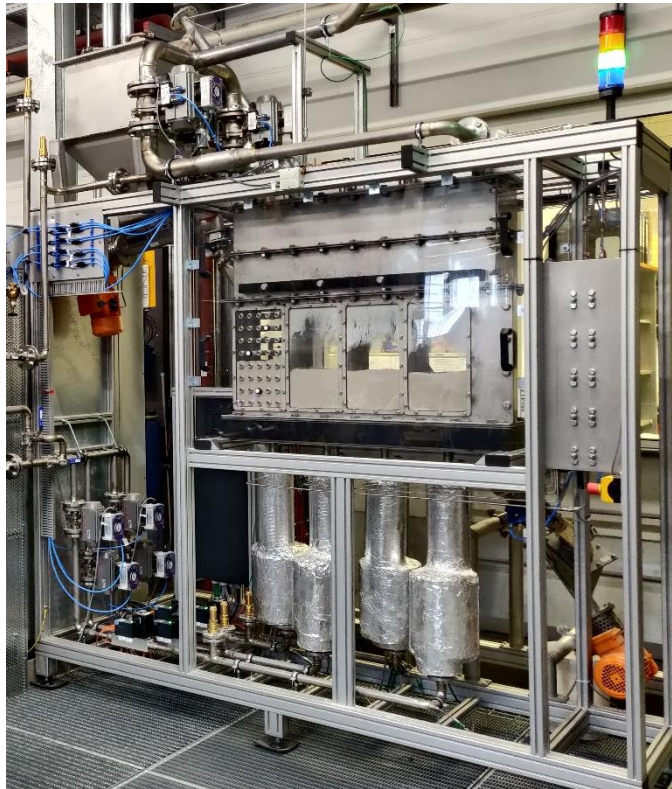


Untersuchungsziele:

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

Übersicht Versuchsanlagen

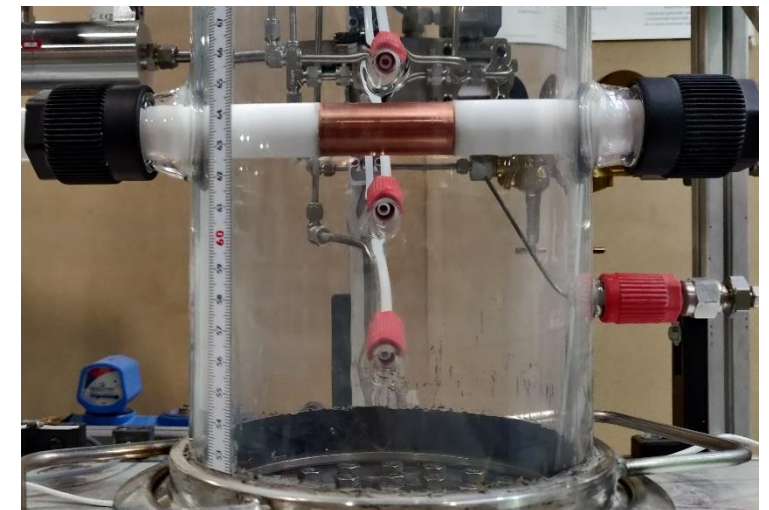
Kaltmodelle



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

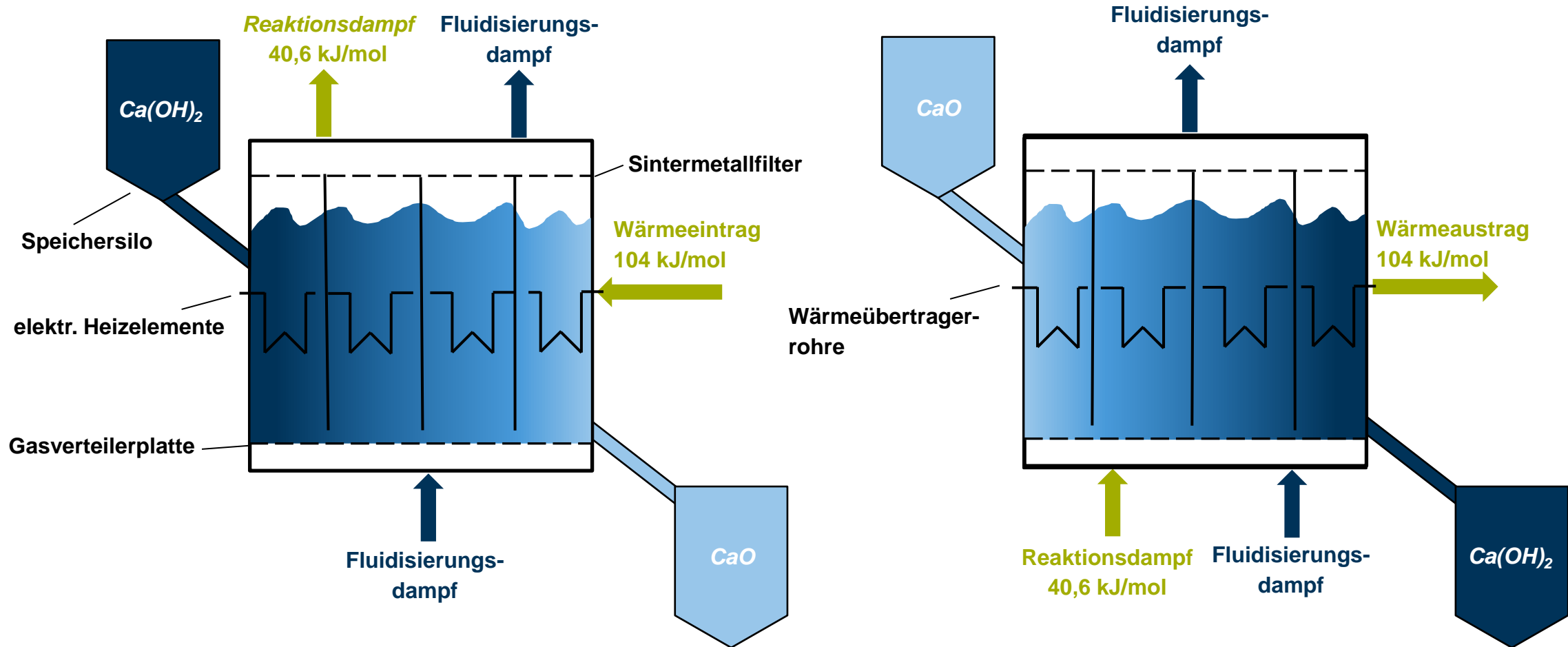
- Reversible Reaktion
- Nicht giftig und in der Kalk- und Zementindustrie erprobt
- Hohe Energiedichte mit 385 kWh/m³
- Niedrige Kosten mit unter 5 ct pro kg
- Atmosphärische Gleichgewichtstemperatur ca. 450 °C



Funktionsweise thermochemisches Speichersystem

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

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

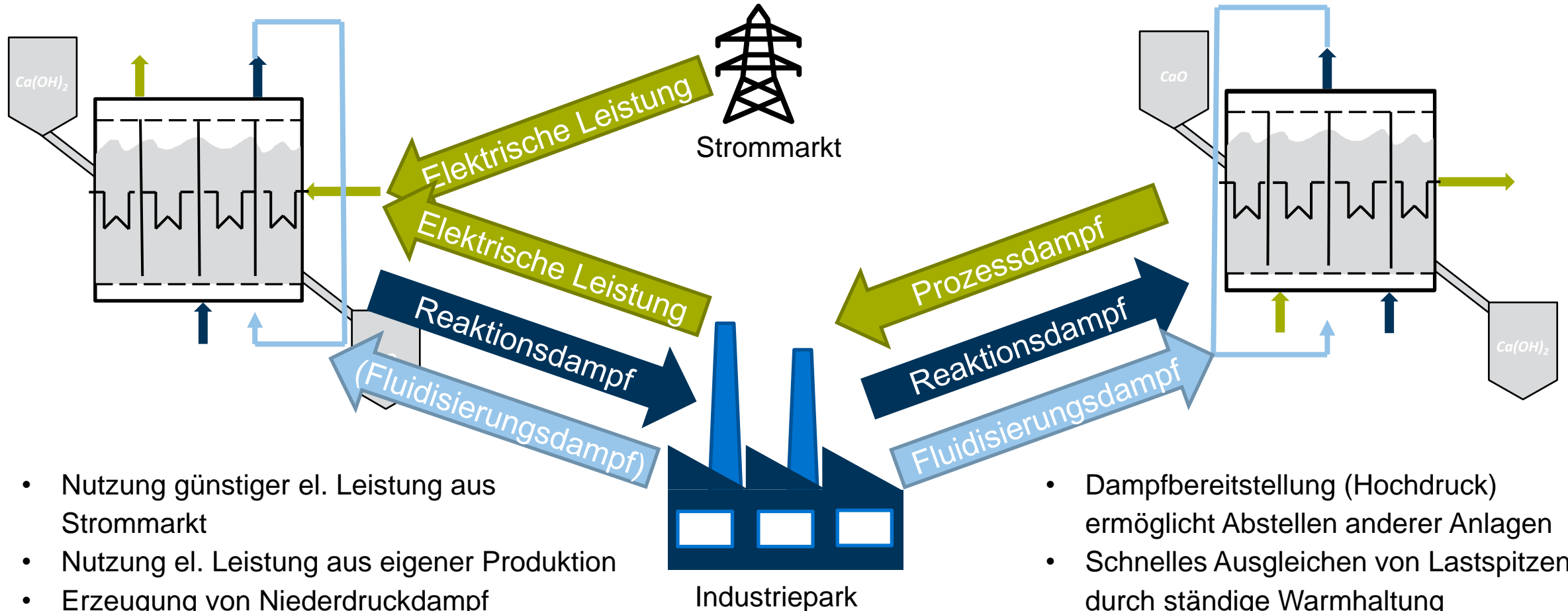


Anwendung des Speichersystems

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

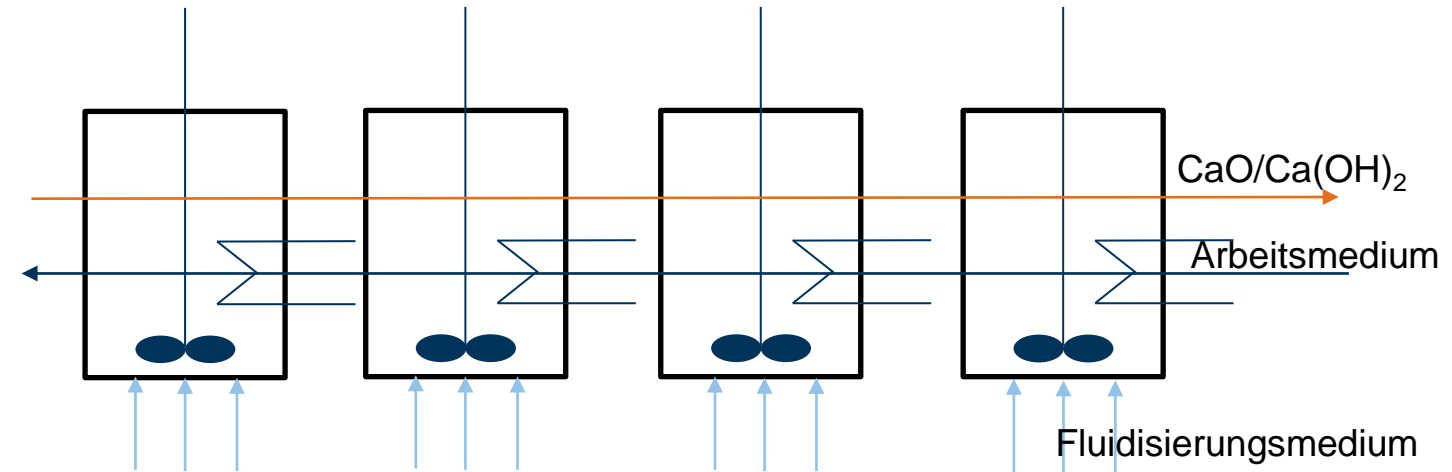
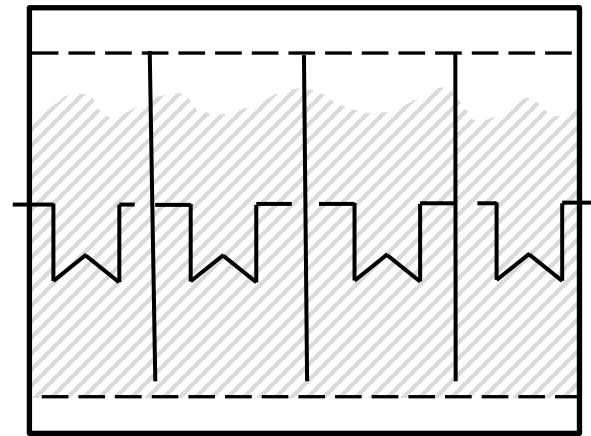
Wirbelschichtreaktormodell

Anwendungsfall Energieversorgung Industriepark

Fazit und Ausblick

Modell Wirbelschichtreaktor

CSTR Ansatz in Matlab



Reaktordesign:

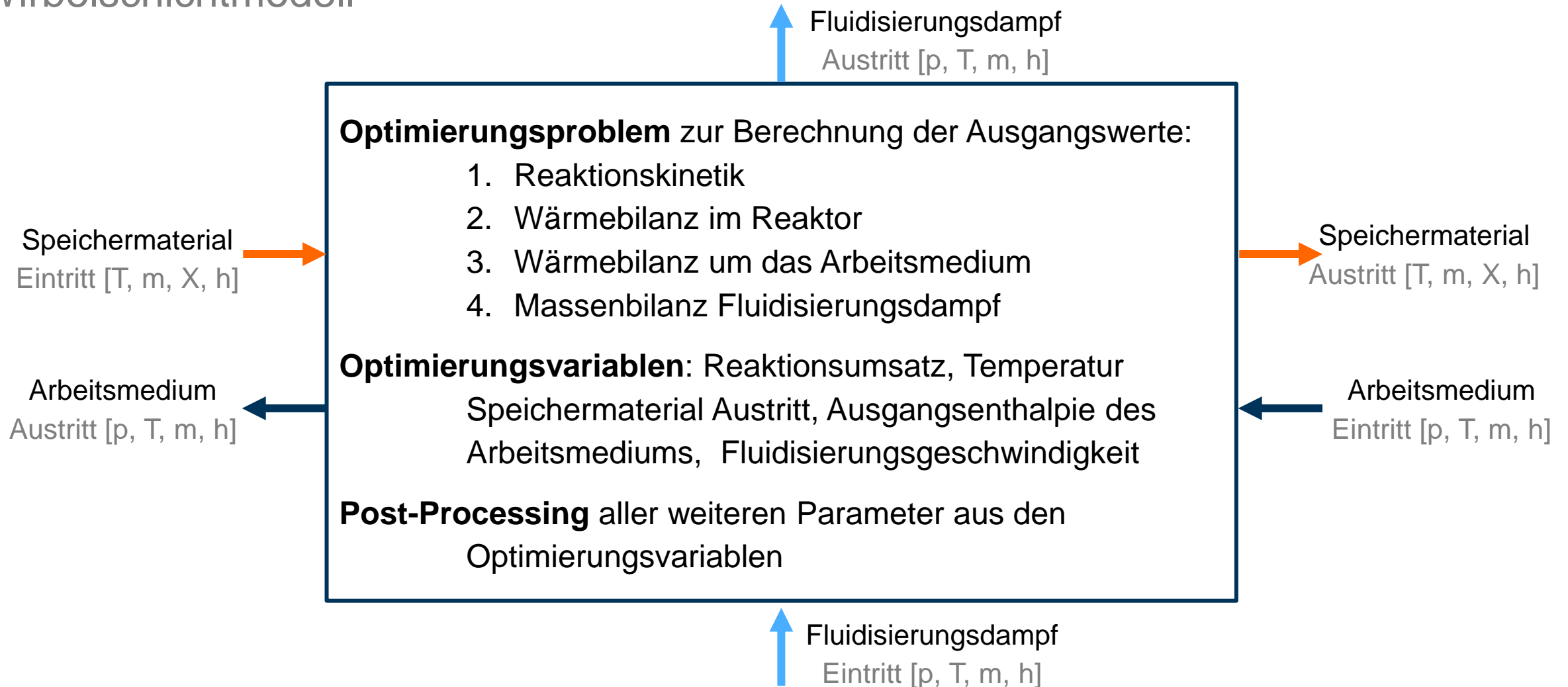
- Fluidisierung in reinem Dampf
- Unterlaufwehre trennen Reaktorsegmente für einheitliche Verweilzeit
- Einbauten für Wärmeübertragung

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

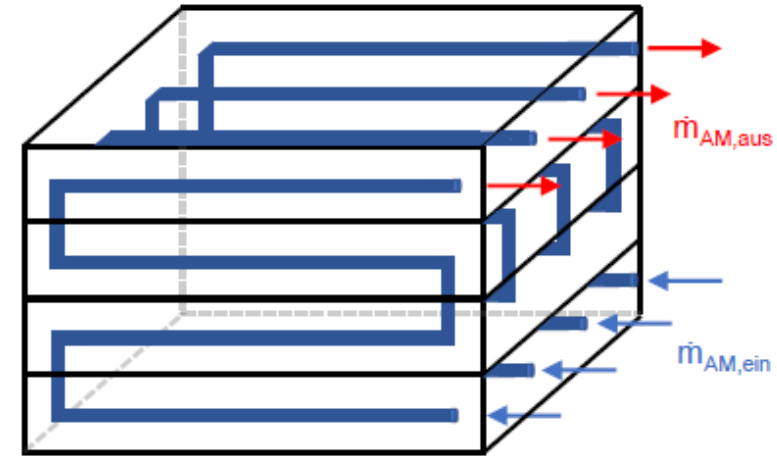
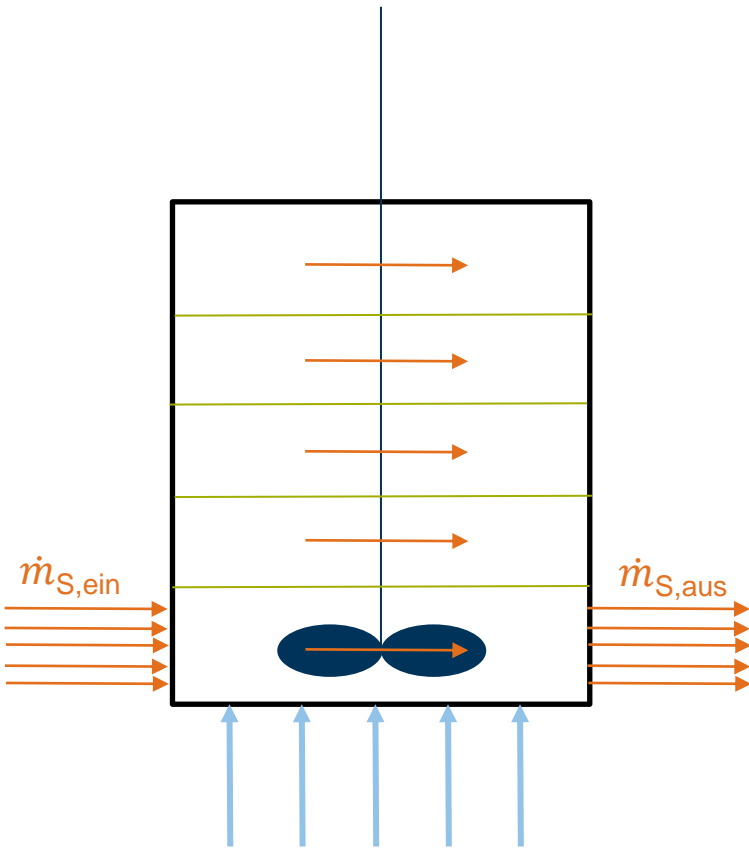
Berechnung eines Reaktorsegments

Wirbelschichtmodell



Modell Wirbelschichtreaktor

Erweiterung des CSTR Ansatzes



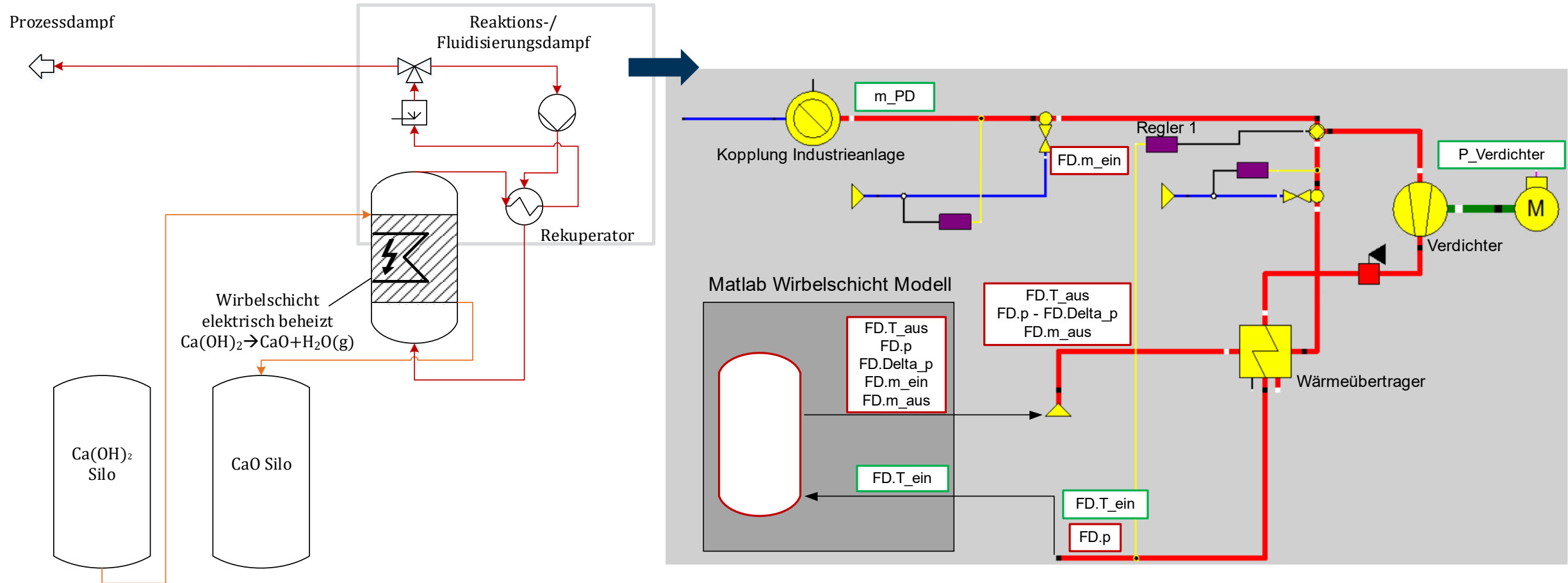
Problem: Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Fluidisierungsgeschwindigkeit kann im CSTR Modell nicht abgebildet werden

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

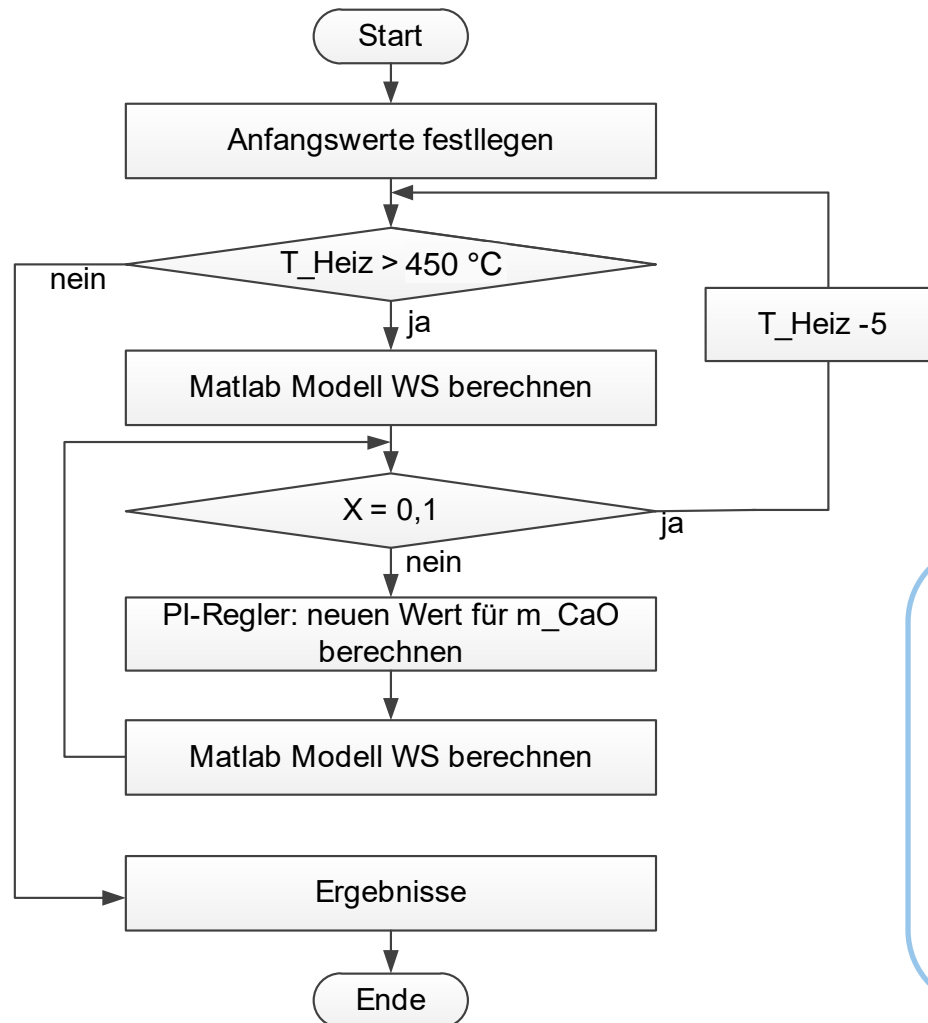
Recycling des Fluidisierungsdampfes in Epsilon

Beladen (Power2Heat)



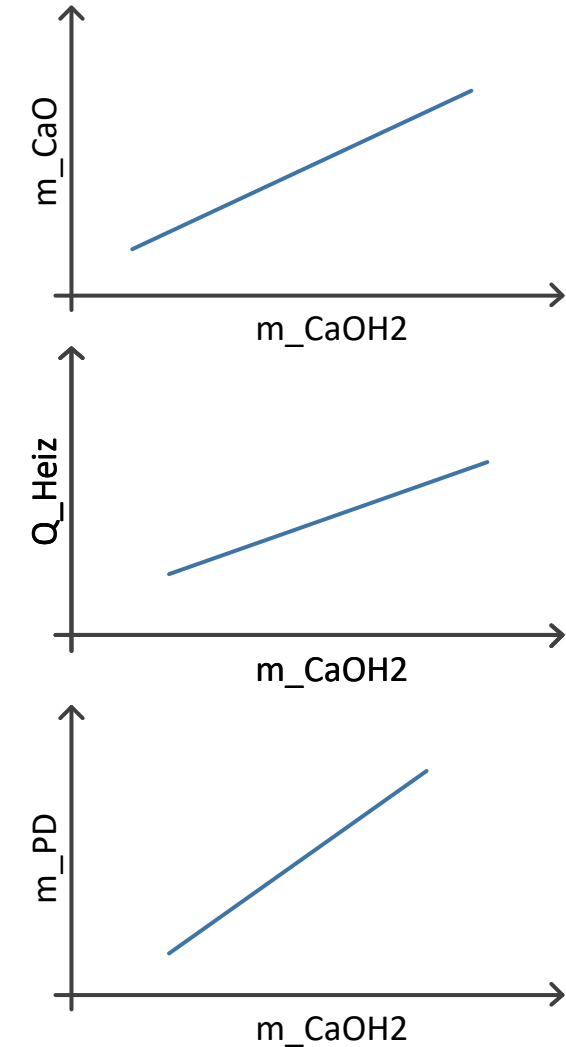
Parametervariation Beladen

Linearisierung des Wirbelschichtmodells



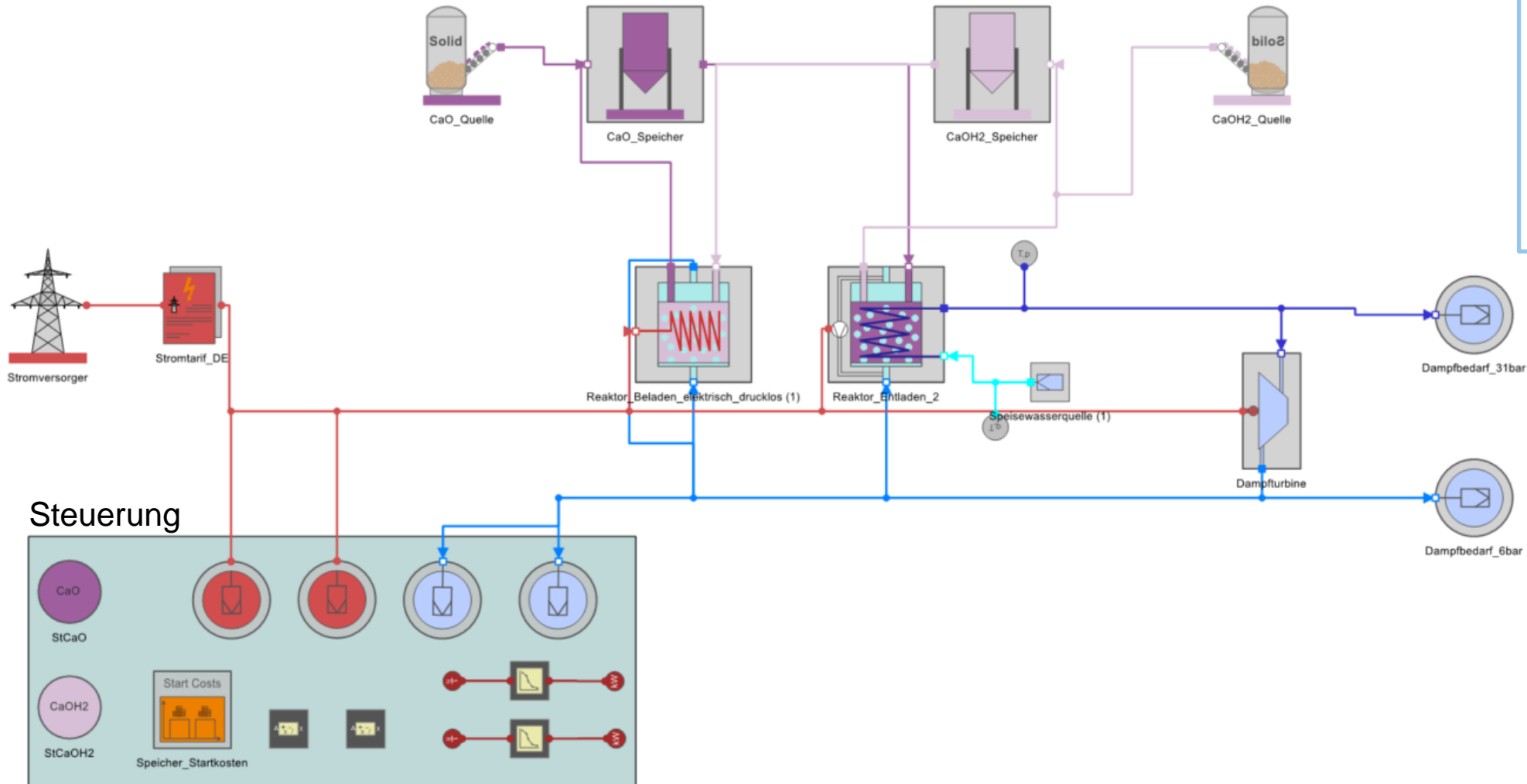
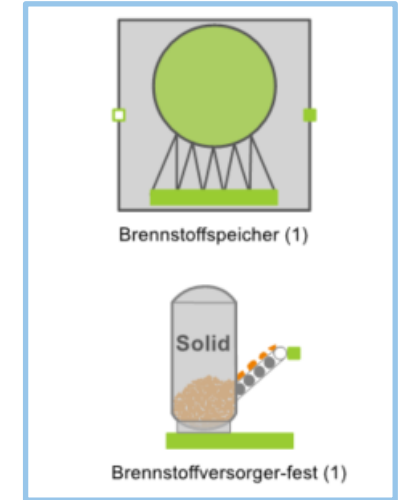
Konstante Werte:

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



TOP-Energy Modell des Speichersystems

Basierend auf:



Agenda

Projekt TWIST

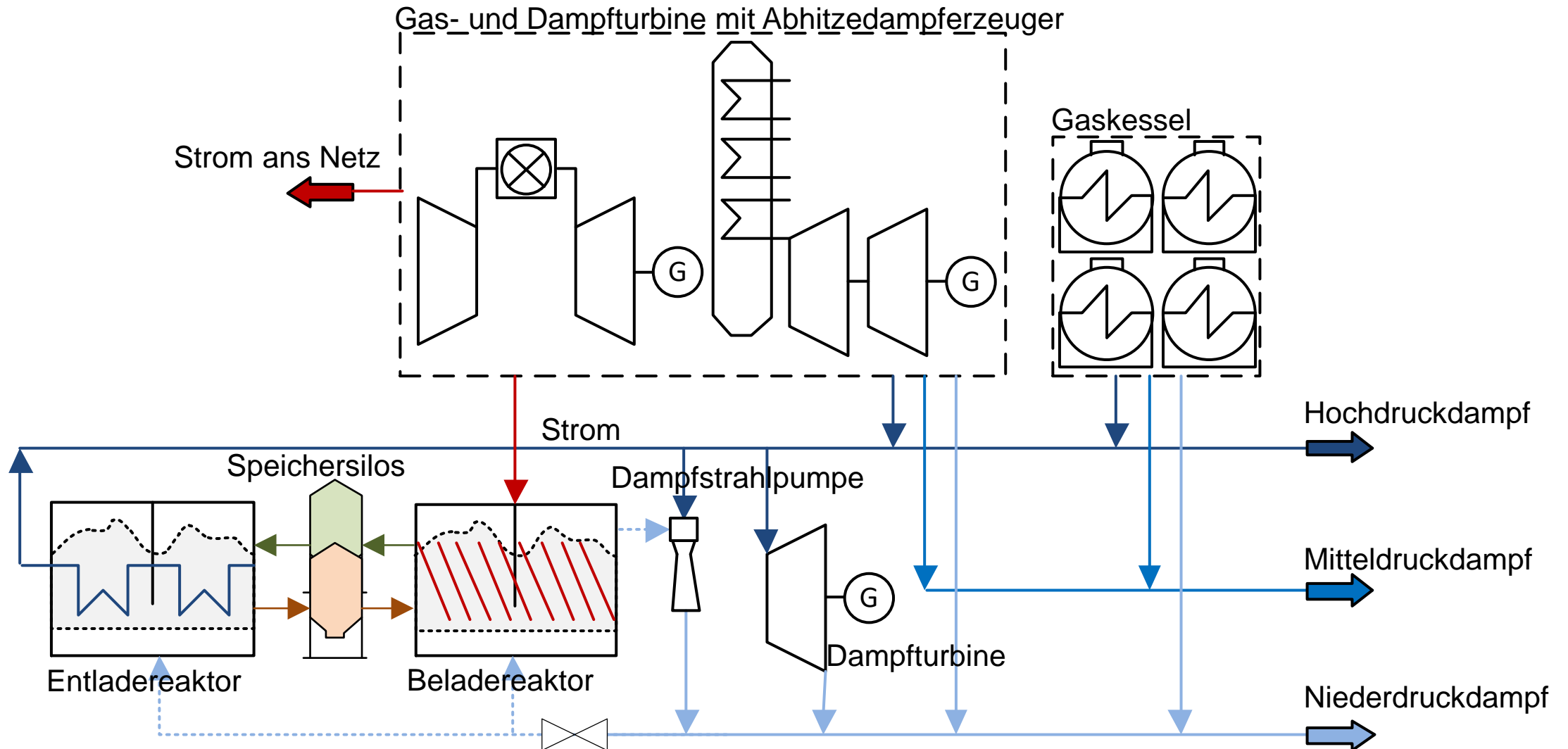
Speicherkonzept – Thermochemischer Energiespeicher

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

