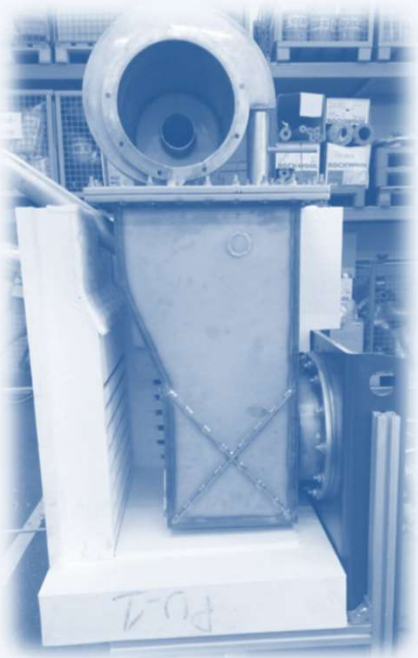
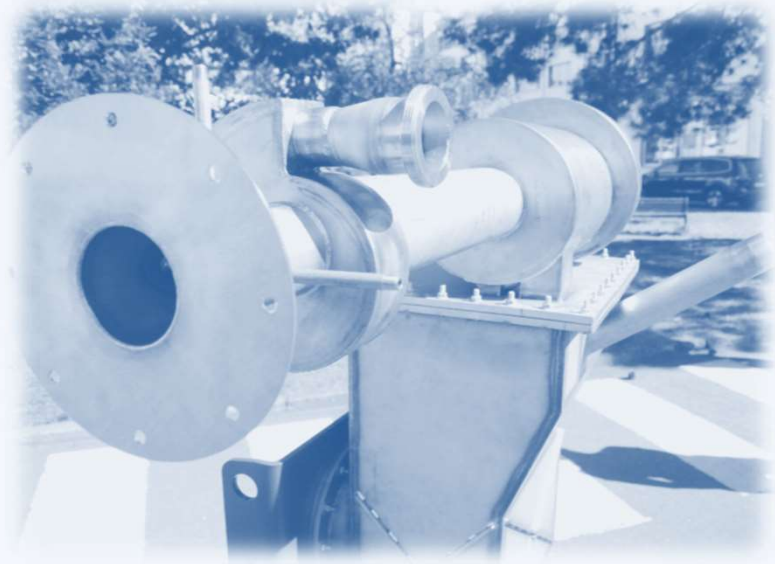
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

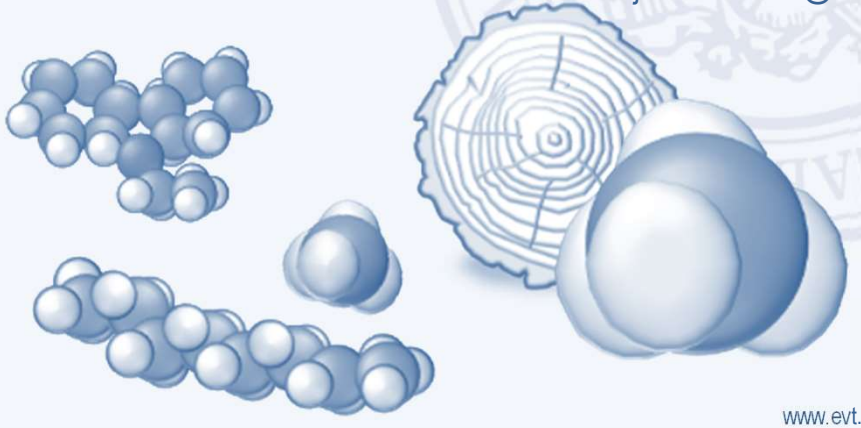




Biomass to Power and Heat, 07. Juni 2018, Zittau

„BioWasteStirling“ – Verstromung von biogenen Reststoffen mit einem wirbelschichtgefeuerten Stirlingmotor

Tanja Schneider, M.Sc.
Fürther Straße 244f
D-90429 Nürnberg
Deutschland
Tel: +49 (911) 5302-9038
Fax: +49 (911) 5302-9030
Email: tanja.t.schneider@fau.de



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Motivation
Grundlagen
Projektvorstellung
Pilotanlage
Ausblick

1. Motivation

2. Theoretische Grundlagen

3. Vorstellung Projekt “BioWasteStirling”

4. Auslegung und Aufbau der Pilotanlage

5. Zusammenfassung & Ausblick

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Mikro-/Mini-KWK Anlagen mit Stirlingmotoren

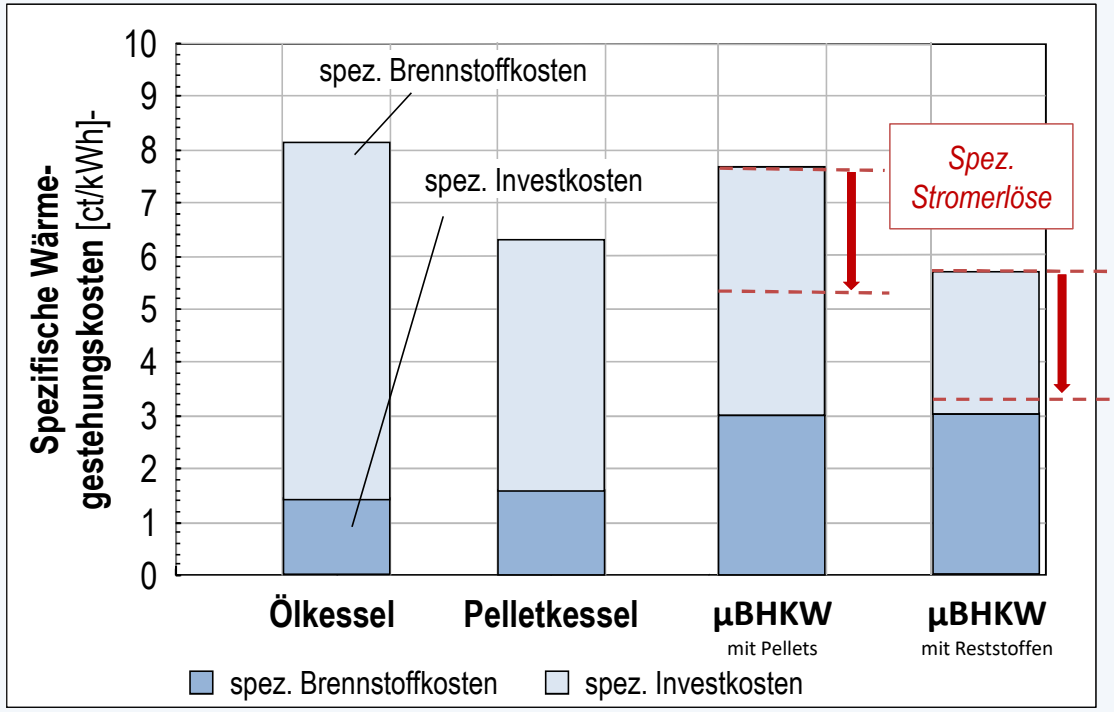
Müller, D.; Kleinskalige Wirbelschichtfeuerungen zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirlingmotoren, 2018

Firma	Eingesetzter Stirling	Eingesetzte Feuerung	Brennstoff
Stirling DK	35kW Vierzylinder-Siemensmaschine (Helium 40 bar), 75kW Achtzylinder-Siemensmaschine (Helium 45 bar), 9kW -Maschine (Helium 80 bar)	Mawera-Rostfeuerung mit Holzpellets, Gegenstrom-Hackschnitzelvergaser mit Brennkammer, optional auch ohne Vergaser für Verstromung von Gasen	Holzpellets, Holzhackschnitzel
Qalovis GmbH	35kW Vierzylinder-Siemensmaschine (Stirling Biopower Inc.)	Gleichstrom-Biomassevergaser	Holzhackschnitzel
Hoval	1kW-Maschine (Stickstoff 13 bar)	Gleichstrom-Hackschnitzelvergaserkessel	Holzhackschnitzel
SPM	1kW Siemensmaschine (Luft)	Holzpelletskessel von ÖkoFEN und KWB	Holzpellets
ÖkoFEN	1kW Freikolbenstirling (Microgen), 5kW Freikolbenstirling (Qnergy)	Handelsübliche Holzpelletskessel von ÖkoFEN	Holzpellets
SUNMACHINE	3kW-Maschine, (Stickstoff 33-36 bar)	ca. 15kW gestufte Feuerung für Holzpellets	Holzpellets
Robert Bosch GmbH	1kW Freikolbenstirling	6-9kW gestufte Unterschubfeuerung	Holzpellets
CUTEC-Institut	2-9kW-Maschine Solo V161 (Helium 30-120 bar)	ca. 130kW KÖB-Holzhackschnitzel	Holzhackschnitzel
Bioenergy2020+	5kW-Maschine Frauscher Thermal Motors A500	35kW Hargassner Holzpelletskessel	Holzpellets

- Fokus auf Holzpellets und Hackschnitzeln als Brennstoffe
- Größtenteils 1-3 kW_{el} Stirlingmotoren

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Herausforderung für Mikro-KWK-Anlagen



Randbedingungen:

- **Investitionskosten:**
  - Ölkessel: 10.000 €
  - Pelletkessel: 11.000 €
  - µBHKW: 20.000 €
- **Brennstoffkosten:**
  - Heizöl: 6,5 ct/kWh
  - Holzpellets: 4,58 ct/kWh
  - Reststoffe: 2,78 ct/kWh
- Zinssatz: 3%
- Nutzungsdauer: 15 Jahre
- Jährliche Produktion: 50.000 kWh
- Stromkosten: 25 ct/kWh
- Brennstoffausnutzungsgrad: 90 %
- Elektrische Leistung: 5 kW
- Elektr. Wirkungsgrad: 10%

Wirtschaftlichkeit wird vor allem durch Brennstoffkosten bestimmt

Zusätzliche Herausforderung:

- Bisherige Konzepte der kleinskaligen Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse scheiterten oft an der Beheizung der Wärmekraftmaschinen
- Hohe Aschegehalte in Verbindung mit geringen -schmelztemperaturen führen zu Verschmutzungen von Wärmeübertragern und damit zu Anlagenausfällen

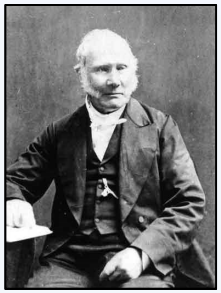
Motivation
Grundlagen
Projektvorstellung
Pilotanlage
Ausblick

2. Theoretische Grundlagen

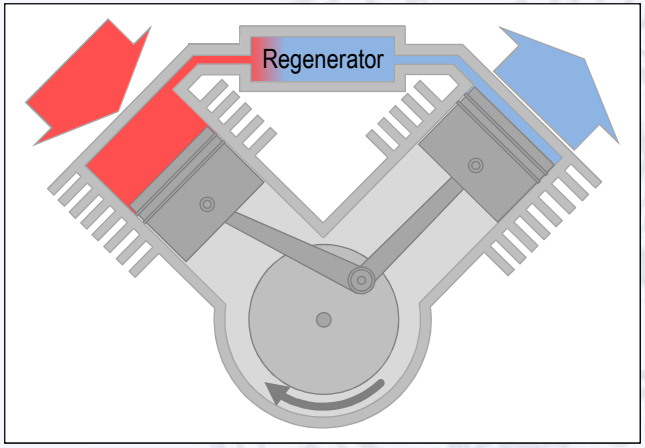
- Stirlingkreisprozess & Thermodynamische Randbedingungen
- Konzeptvorstellung

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Stirlingmotor



- Entwickelt 1816 von Robert Stirling
- Besonderheit: Arbeitsmedium bewegt sich in einem geschlossenen Kreisprozess, während die externe Wärmezufuhr beliebig erfolgen kann
- Kontinuierliche Verbrennung zumeist vorteilhaft bezüglich des Emissionsverhaltens
- Theoretisch lange Lebensdauern möglich



Stirlingmotor α-Konfiguration

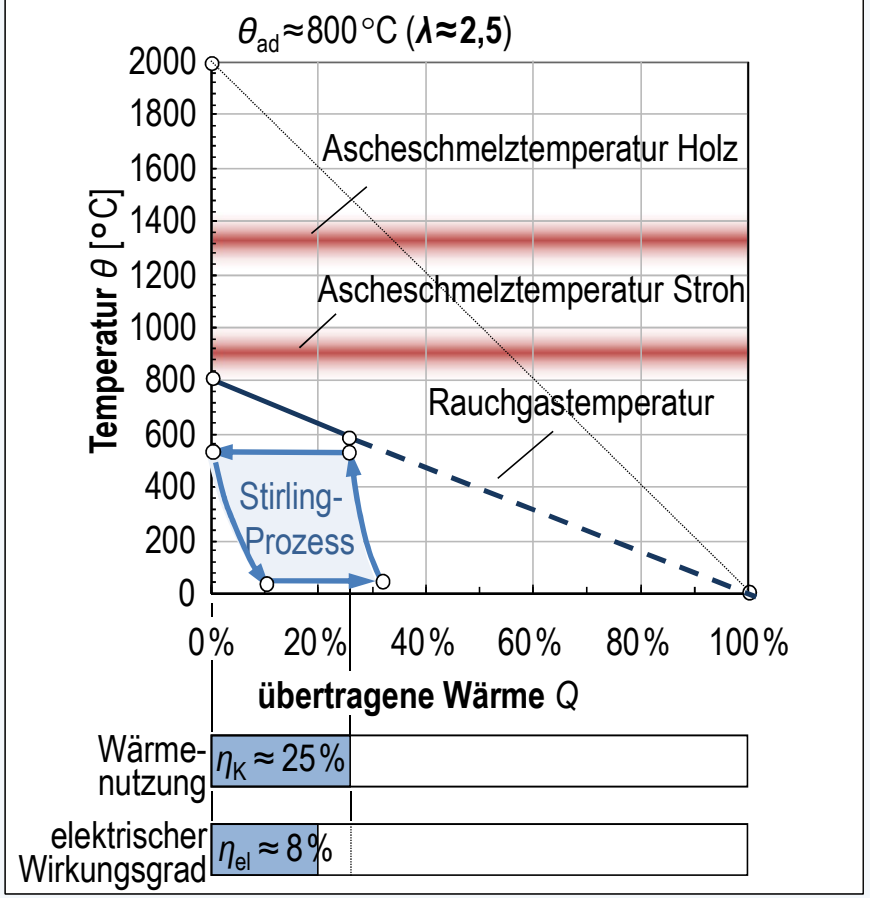
Kernprobleme:

- Hohes Temperaturniveau der Wärmezufuhr
- stets versprochene Wartungsfreiheit kann nur selten eingehalten werden
- **Hoher Entwicklungsstand von Verbrennungsmotoren…**

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

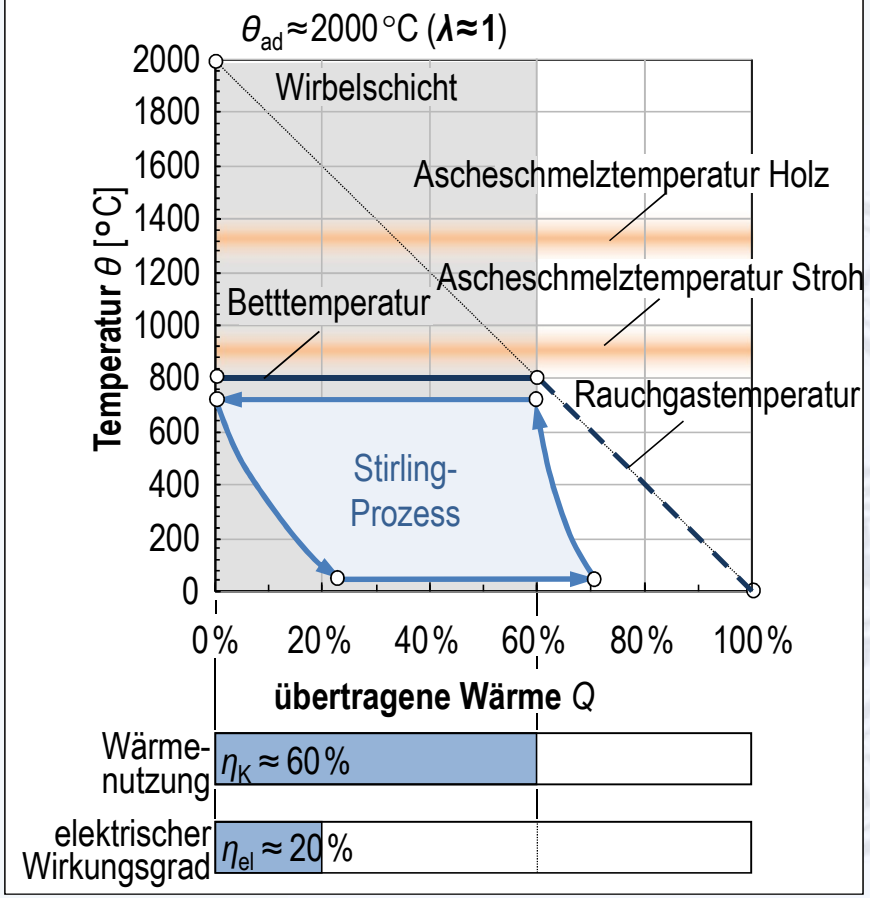
Thermodynamische Randbedingungen

Stirlingmotor mit herkömmlicher Pelletfeuerung



Geringer elektr. Wirkungsgrad

Stirlingmotor mit Wirbelschichtfeuerung

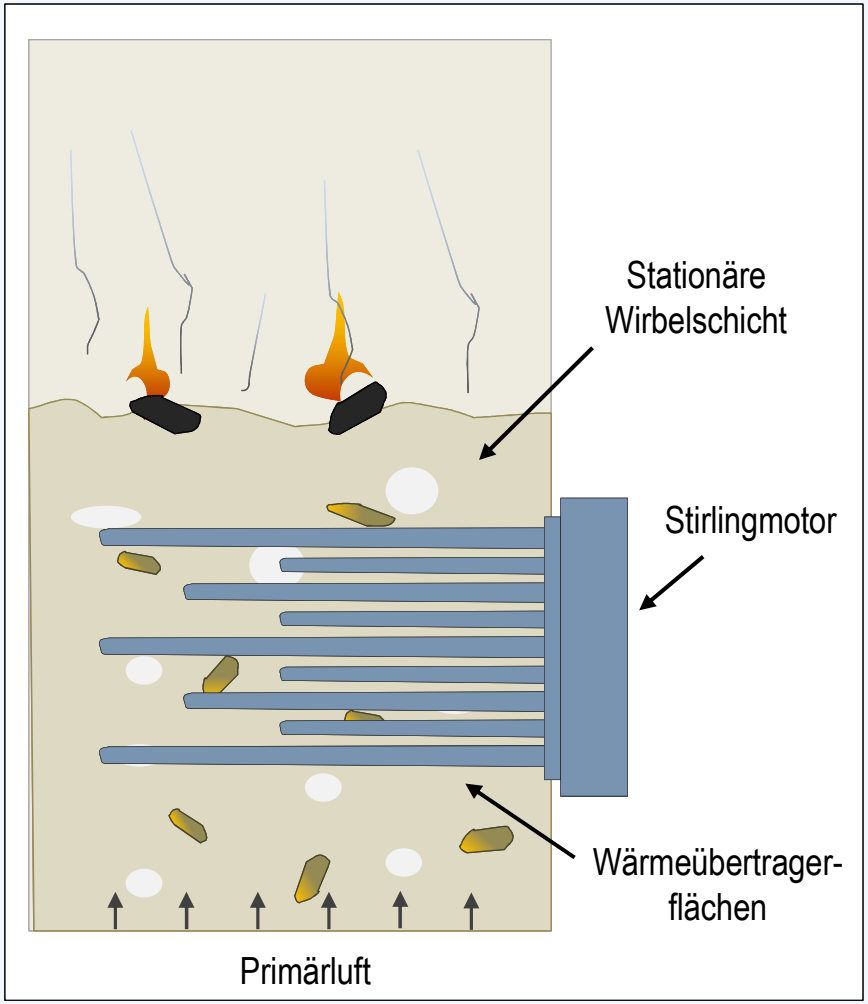


Gekühlte Feuerung ermöglicht hohen Feuerungswirkungsgrad

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Lösungskonzept

- Stirling-Erhitzerkopf als direkte Tauchheizflächen in einer Wirbelschichtfeuerung



Vorteile der Wirbelschichtfeuerung

- Homogene Temperaturverteilung
- Sehr guter Wärmeübergang
- Brennstofflexibel
- Leicht skalierbar (im Bereich < 100 kW)

Direkte Kopplung von Stirlingmotor und Wirbelschicht ermöglicht

- effektive Vermeidung von Verschmutzungen
- hohe Feuerungswirkungsgrade
- Reststoffverwertung

Motivation
Grundlagen
Projektvorstellung
Pilotanlage
Ausblick

3. Vorstellung Projekt „BioWasteStirling"

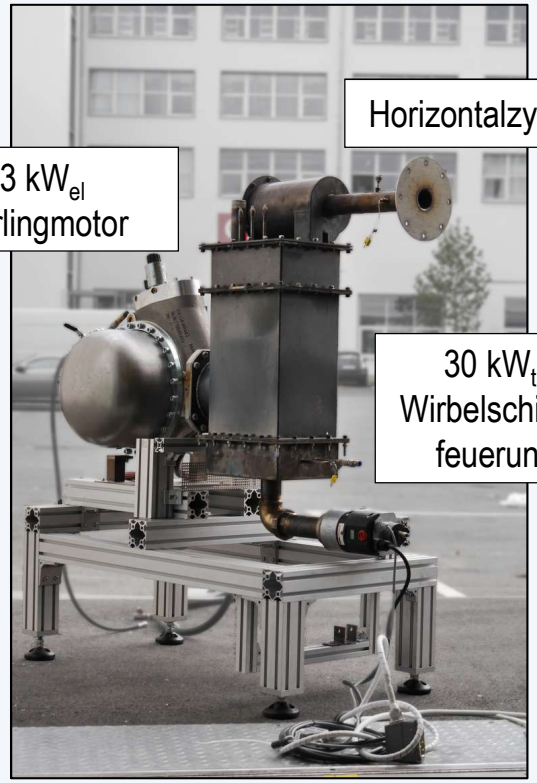
- Bisherige Arbeiten an der FAU & Ergebnisse aus Laborversuchen
- Projektpartner

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

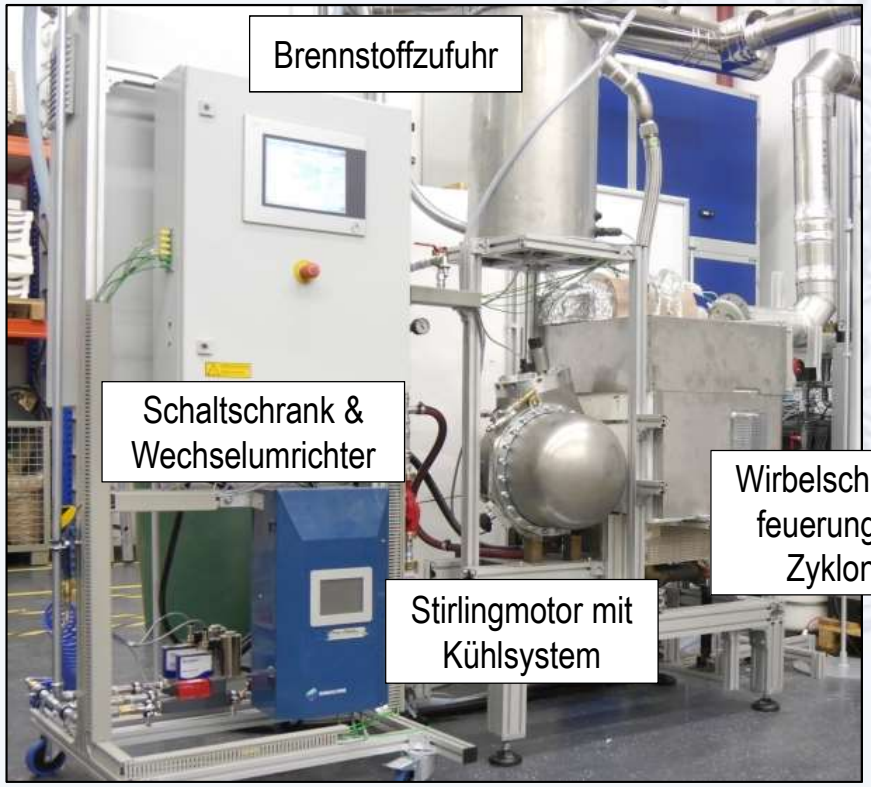
Vorarbeiten am EVT seit 2011

- Auslegung und Konstruktion einer Mikro-Wirbelschicht
- Aufbau einer 25 kW_{th} Laboranlage inkl. Partikelabscheidung
- Emissions- und Leistungsmessungen

Anlagenaufbau (ohne Dämmung und Instrumentierung)

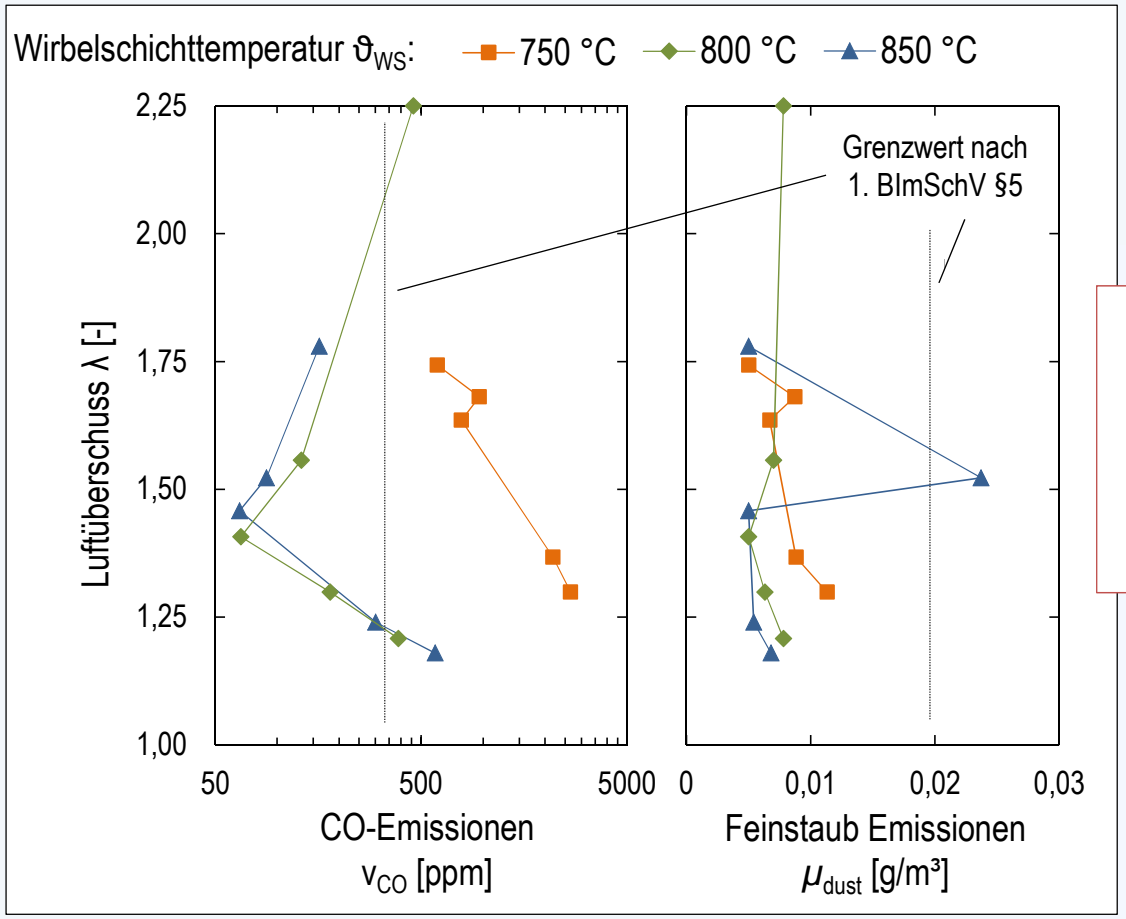


Versuchsaufbau in Laborumgebung



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Ergebnisse der Emissionsmessungen



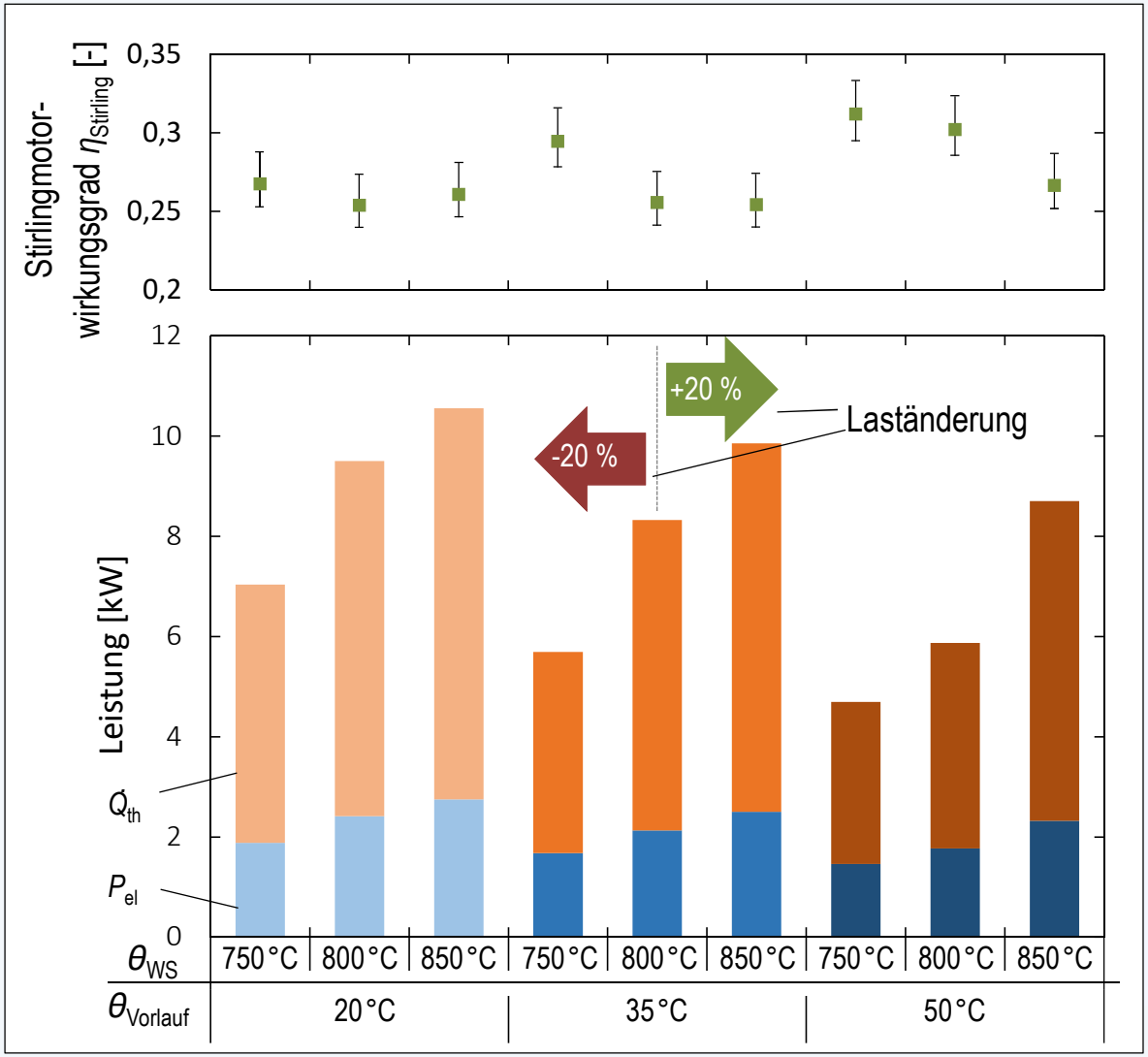
Müller, D.; Kleinskalige Wirbelschichtfeuerungen zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirlingmotoren, 2018

Grenzwerte für CO- und Feinstaubemissionen können für angestrebten Betriebsbereich problemlos eingehalten werden

- CO-Emissionen zeigen für T_{Bett} > 800 °C im Bereich λ = 1,5 Emissionswerte unter 100 ppm
- Feinstaubemissionen unter gesetzlichem Grenzwert von 0,02 g/m³

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Ergebnisse der Leistungsmessungen



- Starke Leistungsabhängigkeit von Wirbelbett- und Kühlvorlauftemperatur
- Stirlingmotorwirkungsgrad quasi konstant
- Lastflexibilisierung durch Temperaturvariation möglich

Müller, D.; Kleinskalige Wirbelschichtfeuerungen zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirlingmotoren, 2018

Projekt „BioWasteStirling“

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FAU FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Energetische Biomassenutzung

Projektpartner

- FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Energieverfahrenstechnik (EVT)
  - Aufbau, Inbetriebnahme und Begleitung des Feldtests
  - Weiterentwicklung der integrierten Partikelabscheidung
  - Marktanalysen & Ausgründungsvorbereitung
- SWW Wunsiedel
  - Durchführung des Feldtests
  - Brennstoffaufbereitung
- TFZ Straubing
  - Feinstaubanalytik
  - Genehmigungsrechtliche Betrachtungen
- Frauscher Thermal Motors
  - Bereitstellung eines Stirlingmotors
  - Weiterentwicklung Erhitzerkopfdesign

SWW wunsiedel wir bewegen

TFZ

FRAUSCHER THERMAL MOTORS

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Projektablauf

Laufzeit: 01. September 2017 – 31. August 2020

I
II
III
VI
V

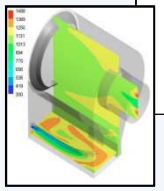
Arbeitspaket 1

Aufbau & Inbetriebnahme der Pilotanlage

Arbeitspaket 2

Feldtest mit verschiedenen Brennstoffen im Heizkraftwerk der SWW

2017 → 2018 → 2019 → 2020



Arbeitspaket 3

Experimentelle und numerische Untersuchung von Horizontalzyklonen zur Staubabscheidung

Arbeitspaket 4

Lebensdauernachweis von Tauchheizflächen

Arbeitspaket 5

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Marktpotential, Vorbereitung der wirt. Verwertung

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Motivation
Grundlagen
Projektvorstellung
Pilotanlage
Ausblick

4. Auslegung und Aufbau der Pilotanlage

- Randbedingungen des Scale-up
- Aufbau der Pilotanlage
- Simulationen mit Barracuda VR
- Erste Inbetriebnahme

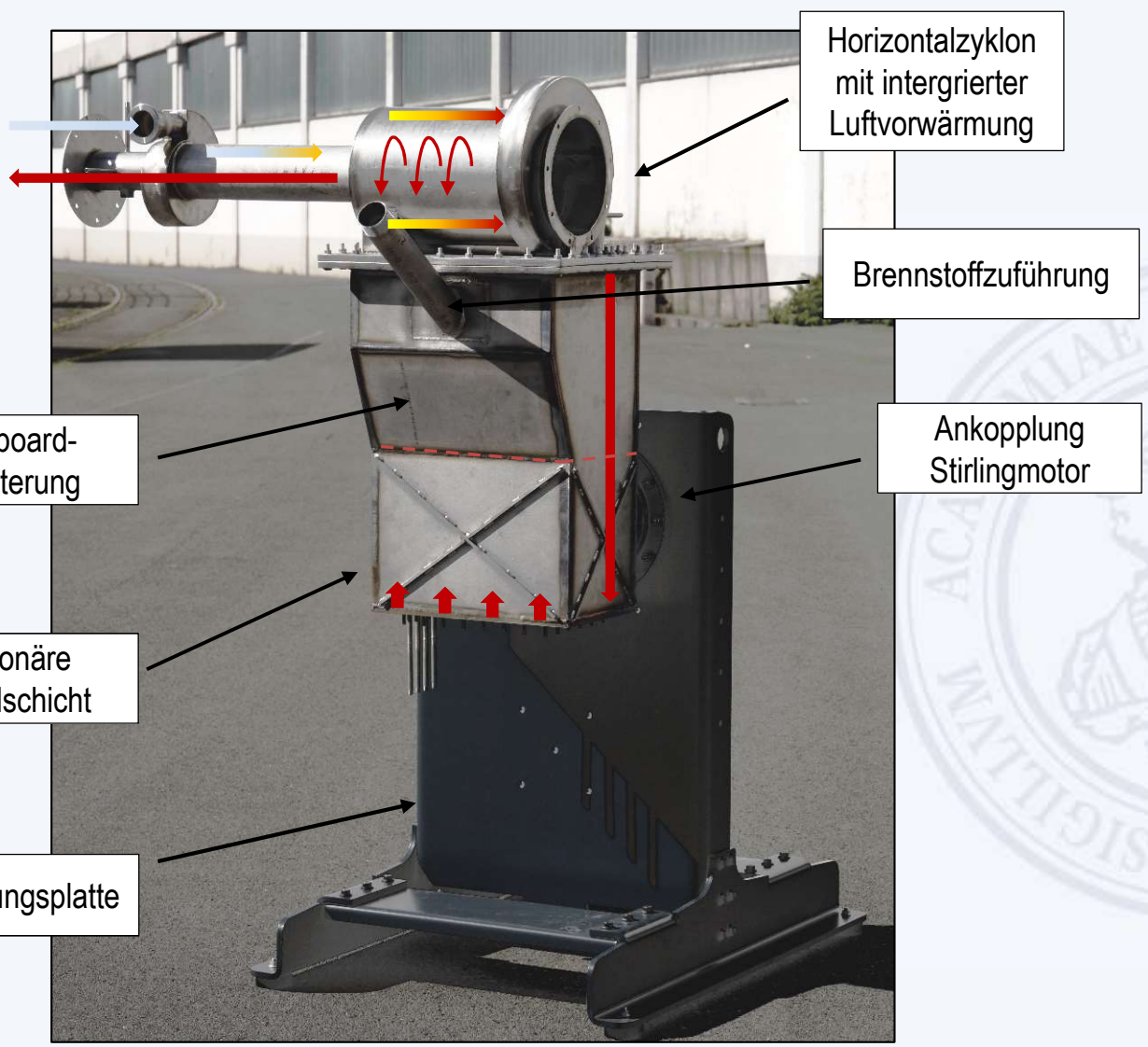
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Scale-up bestehender Laboranlage

	Laboranlage	Pilotanlage
Thermische Leistung		
Elektrische Leistung		
Stirlingmotor		
Arbeitsgas		
Aufstellungsort		
Versuchsbetrieb		

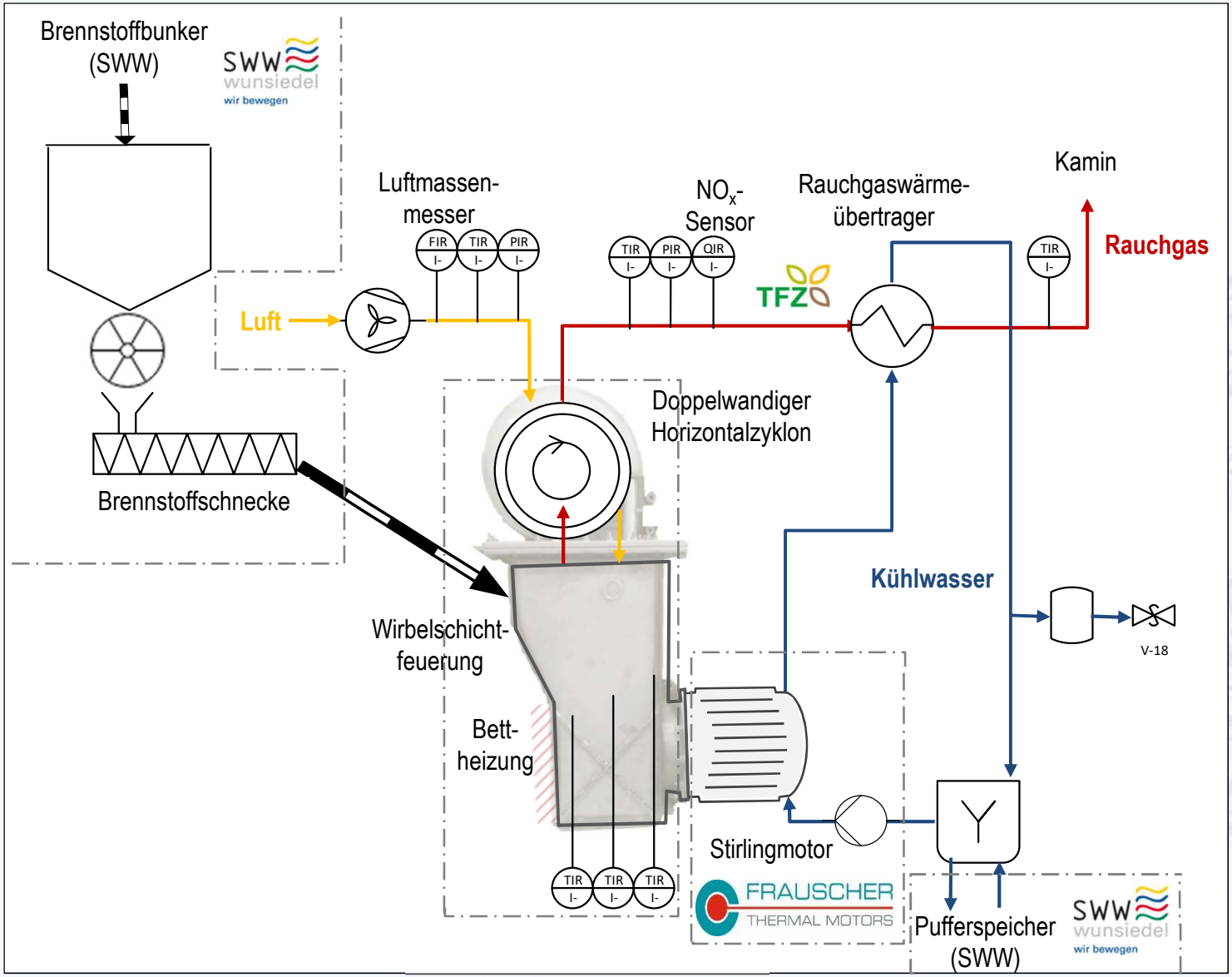
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Aufbau der Pilotanlage



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Gesamtanlagenkonzept



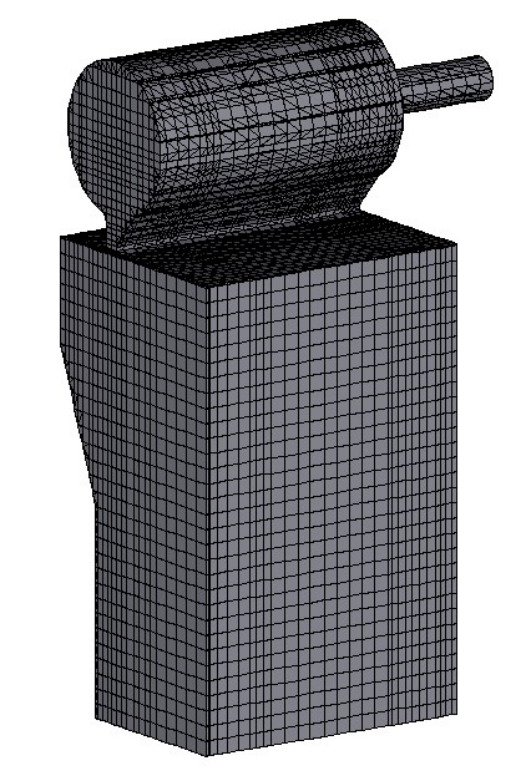
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Simulation der Pilotanlage mit Barracuda VR

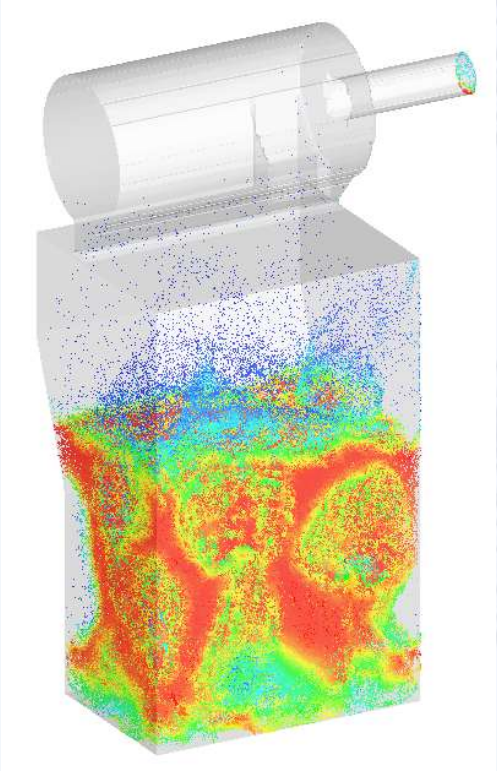
- MP-PIC-Methode erlaubt gegenüber der konventionellen CFD die Betrachtung hochbeladener Partikelströmung auf Basis von Partikelclustern
- Etabliertes Tool zur Optimierung und Auslegung von Wirbelschichten

BARRACUDA VIRTUAL REACTOR®
Changing how fluidized bed reactors are designed and optimized
cpfd

Modellbildung und Vernetzung



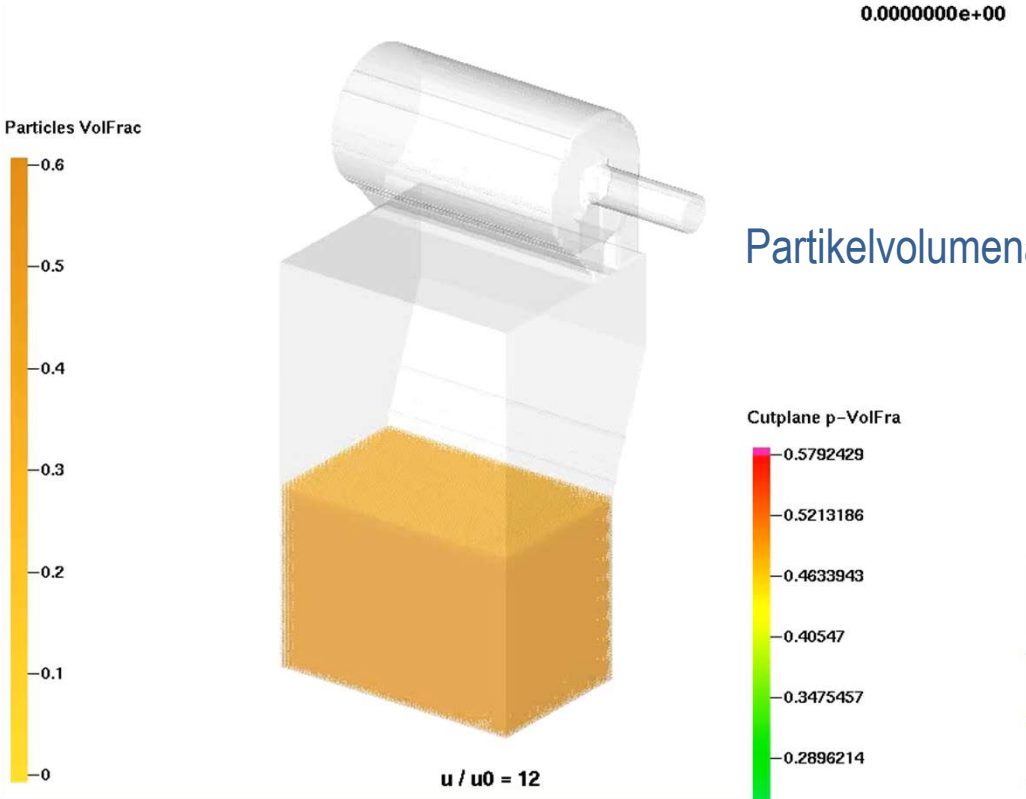
Simulation von Partikelströmung



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

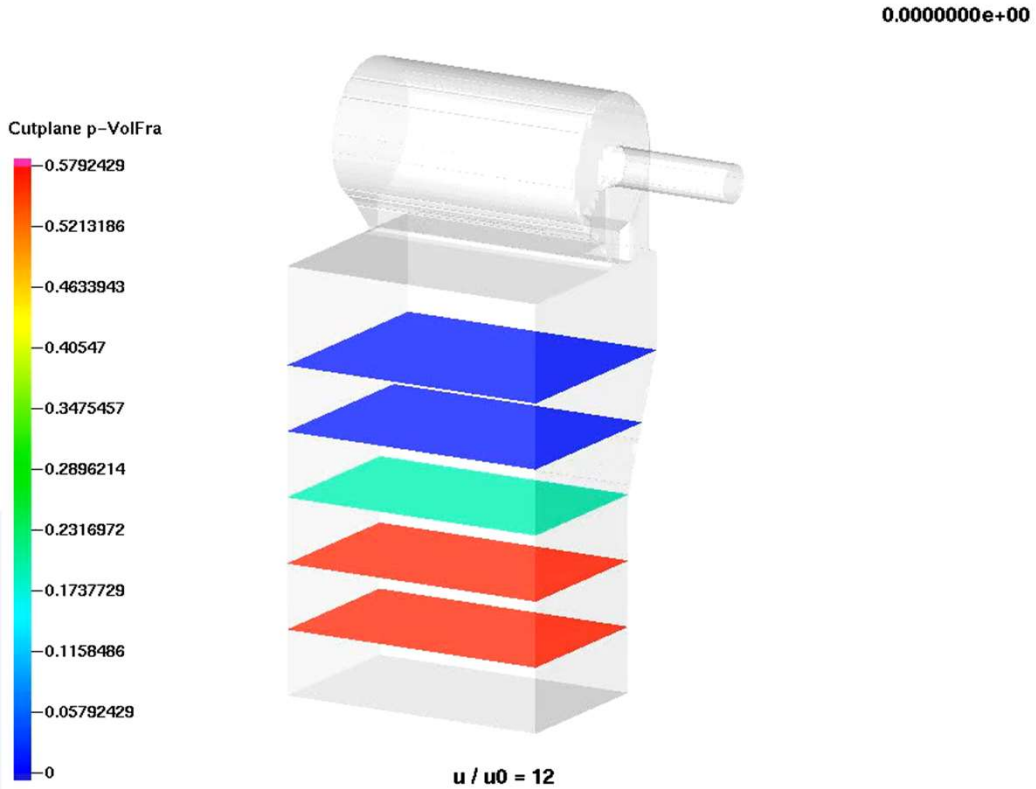
Simulation der Pilotanlage mit Barracuda VR

Partikelverteilung bei Fluidisierung 12



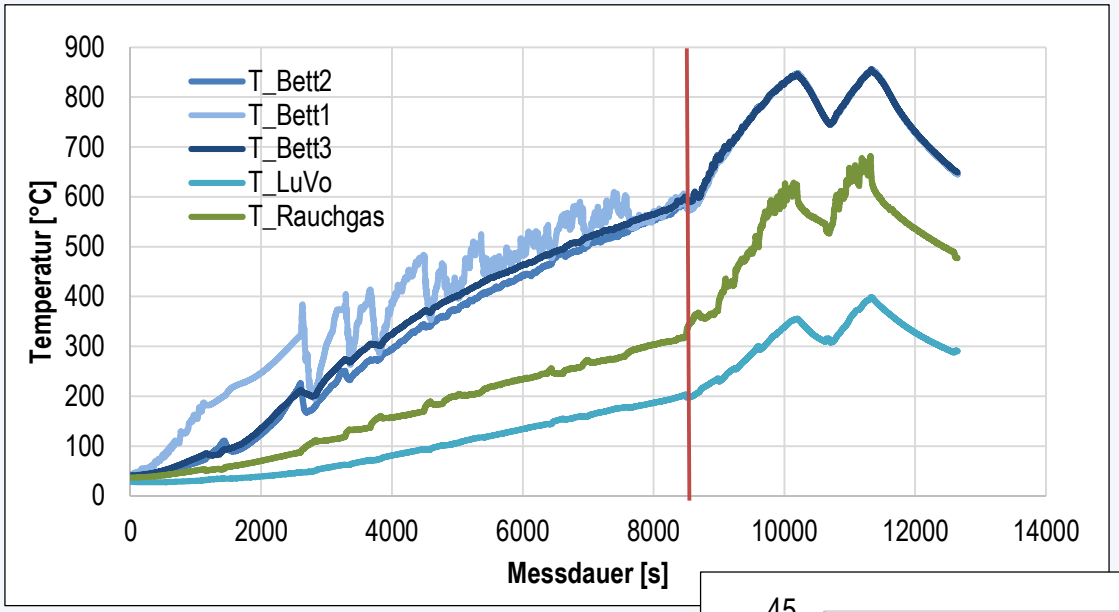
- Erweitertes Freeboard zeigt verminderten Partikelaustrag in Zyklon

Partikelvolumenanteil auf verschiedenen Reaktorhöhen



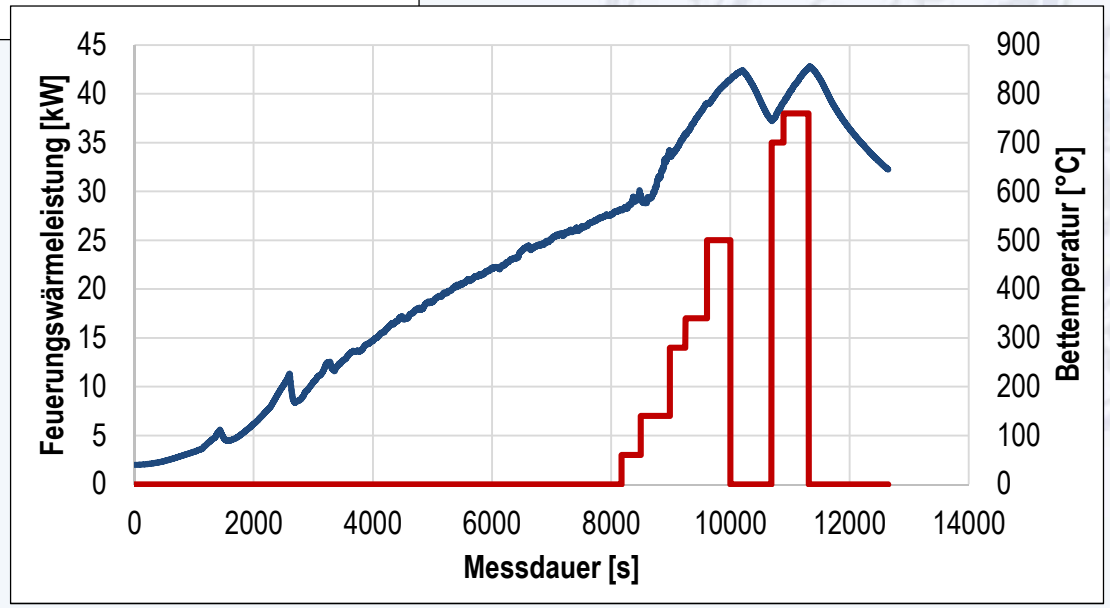
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Inbetriebnahme der kleinskaligen Wirbelschicht



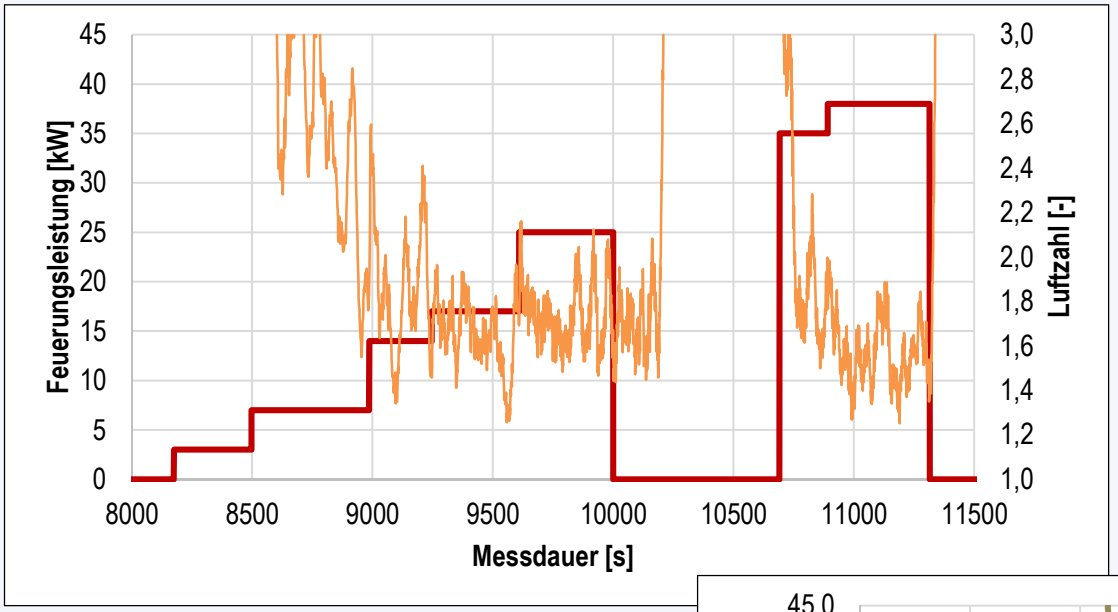
- Aufheizverhalten der Wirbelschicht stetig ohne Probleme
- Druckverlust über Zyklon, Luftverteiler Wirbelschicht im 30 mbar Bereich

- Starke Betttemperaturerhöhung ab Zugabe von Holzpellets
- Fehlende Wärmesenke im Bett begrenzt Brennstoffzugabe



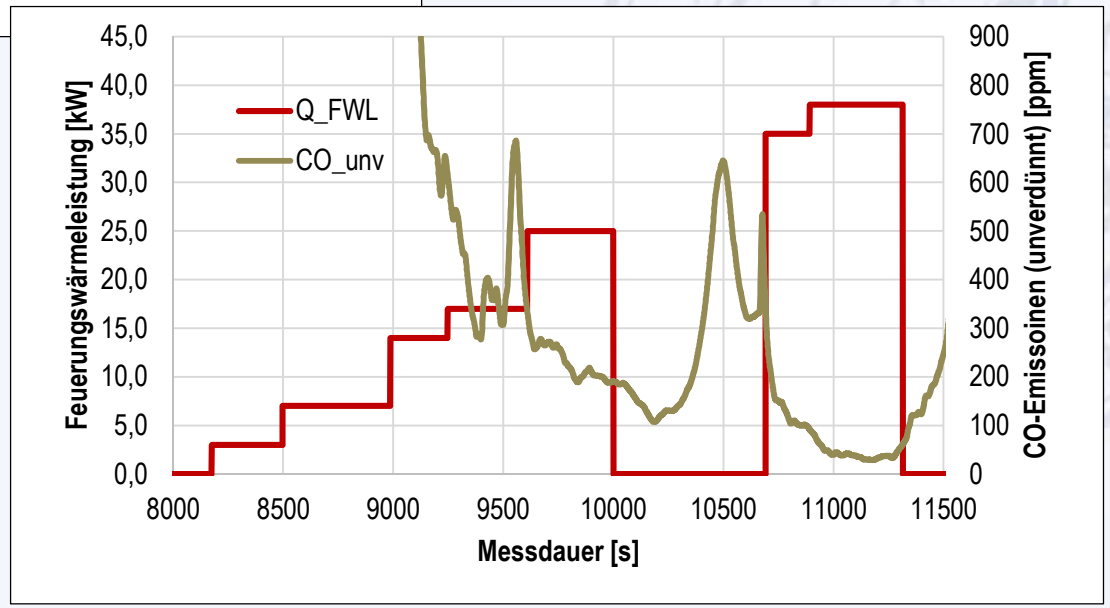
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Inbetriebnahme der kleinskaligen Wirbelschicht



- Lambda schwankt bei instationärer Feuerungsleistung zwischen 1,3 und 2

- CO-Emissionen bereits bei instationärem Betrieb unter 300 ppm
- Weiteres Senkungspotential durch Horizontalzyklon im stationären Betrieb



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Motivation
Grundlagen
Projektvorstellung
Pilotanlage
Ausblick

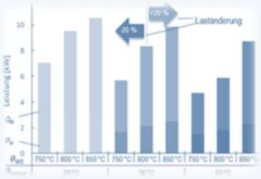
5. Zusammenfassung & Ausblick

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Zusammenfassung & Ausblick

I
II
III
VI
V

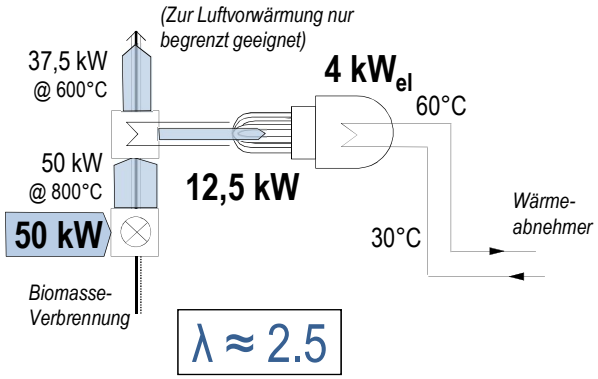
- Emissions- und Leistungsmessungen an bestehender 30 kW_{th} Laboranlage mit 3 kW_{el} Stirlingmotor (Sunmachine) wurden erfolgreich abgeschlossen
- Up-Scale zur 50 kW_{th} Pilotanlage gekoppelt mit 5 kW_{el} Stirlingmotor (FTM) wurde durchgeführt und mit Simulationen validiert
- Pilotanlage wurde im Laborumfeld aufgebaut und instrumentiert
- Erste Inbetriebnahme der kleinskaligen Wirbelschicht ist erfolgt



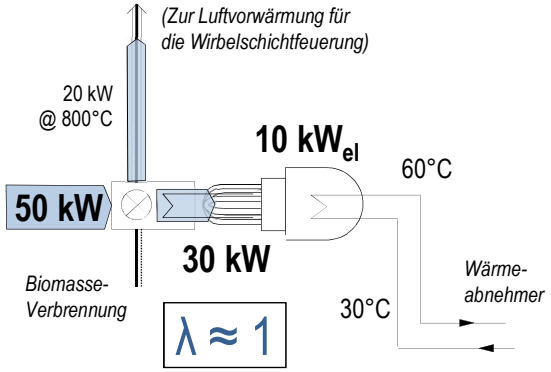
- Inbetriebnahmetests in Laborumgebung gekoppelt mit neuem Stirlingmotor
- Installation in Feldtestumgebung am Standort in Wunsiedel
- Langzeittest mit verschiedenen holzartigen Brennstoffen und Reststofffraktionen

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Stirling-Motor mit herkömmlichen Feuerungen



Stirling-Motor mit einer **gekühlten Feuerung**



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Projektablauf

Laufzeit: 01. September 2017 – 31. August 2020

I
II
III
VI
V

Arbeitspaket 1

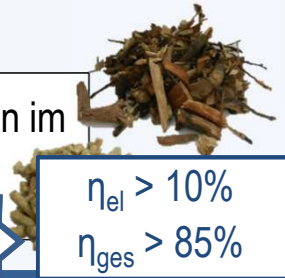
Aufbau & Inbetriebnahme der Pilotanlage

M1

Erfolgreiche Inbetriebnahme

Arbeitspaket 2

Feldtest mit verschiedenen Brennstoffen im Heizkraftwerk der SWW



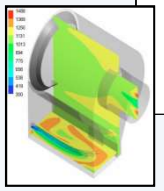
M2

η_{el} > 10%
η_{ges} > 85%

2017 | 2018 | 2019 | 2020

M3

CO < 400 mg/m³
Feinstaub < 0,02 mg/m³



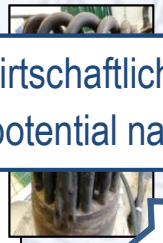
Arbeitspaket 3

Experimentelle und numerische Untersuchung von Horizontalzyklonen zur Staubabscheidung

Wirtschaftlichkeit & Marktpotential nachgewiesen

Arbeitspaket 4

Lebensdauernachweis von Tauchheizflächen



M4

Arbeitspaket 5

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Marktpotential, Vorbereitung der wirt. Verwertung