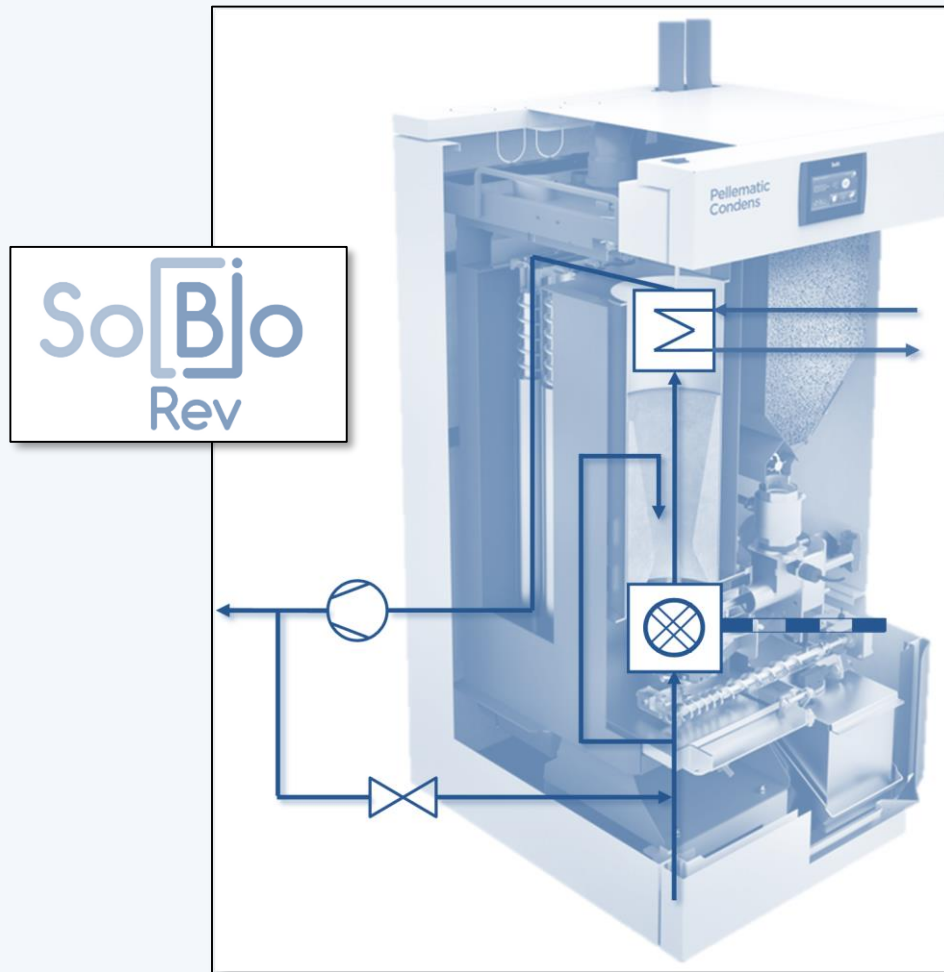


Reduktion der Emissionen und Steigerung der Effizienz eines KWK-Pelletkessels durch Primärmaßnahmen



Maximilian Weitzer, M. Sc.
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Fürther Str. 244f, 90429 Nürnberg
Phone: +49 911 5302 9022
Fax: +49 911 5302 9030
Email: maximilian.weitzer@fau.de



Motivation

SolBio-Rev

Konzept

Ergebnisse

Fazit

1. Motivation

2. Das EU-Projekt SolBio-Rev

3. Pelletkessel Konzept

4. Versuchsergebnisse mit Primärmaßnahmen

5. Fazit und Ausblick



Motivation

- Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Biomasse ermöglicht **flexible** und **effiziente** Nutzung biogener Brennstoffe
- **Organic Rankine Cycles** als Technologie zur Stromerzeugung im kleinen Leistungsbereich etabliert



Versuchsaufbau des Pelletkessels mit Gas Analysator im Labor des Lehrstuhls

Herausforderungen

- Verringerung der **spez. Investitionskosten**
- Hoher **Brennstoffausnutzungsgrad**
- Reduktion der **Kesselemissionen**

Entwicklungsziele

- Entwicklung eines flexiblen und effizienten KWK-Systems
- Verringerung der Umweltbelastung
- Beitrag zur Dezentralisierung der Energieerzeugung

Laufzeit: Mai 2019 – April 2023

Das EU-Projekt SolBio-Rev

Solar **Biomass** Reversible system

*“The SolBio-Rev project will develop an innovative **renewable energy system** based on a novel and creative **heat pump-based configuration**, for the production of **heating, cooling and electricity** according to the daily and seasonal energy demand of buildings in different european climatic zones.”*



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 814945.



Das Konzept von SolBio-Rev

Technologie im Überblick

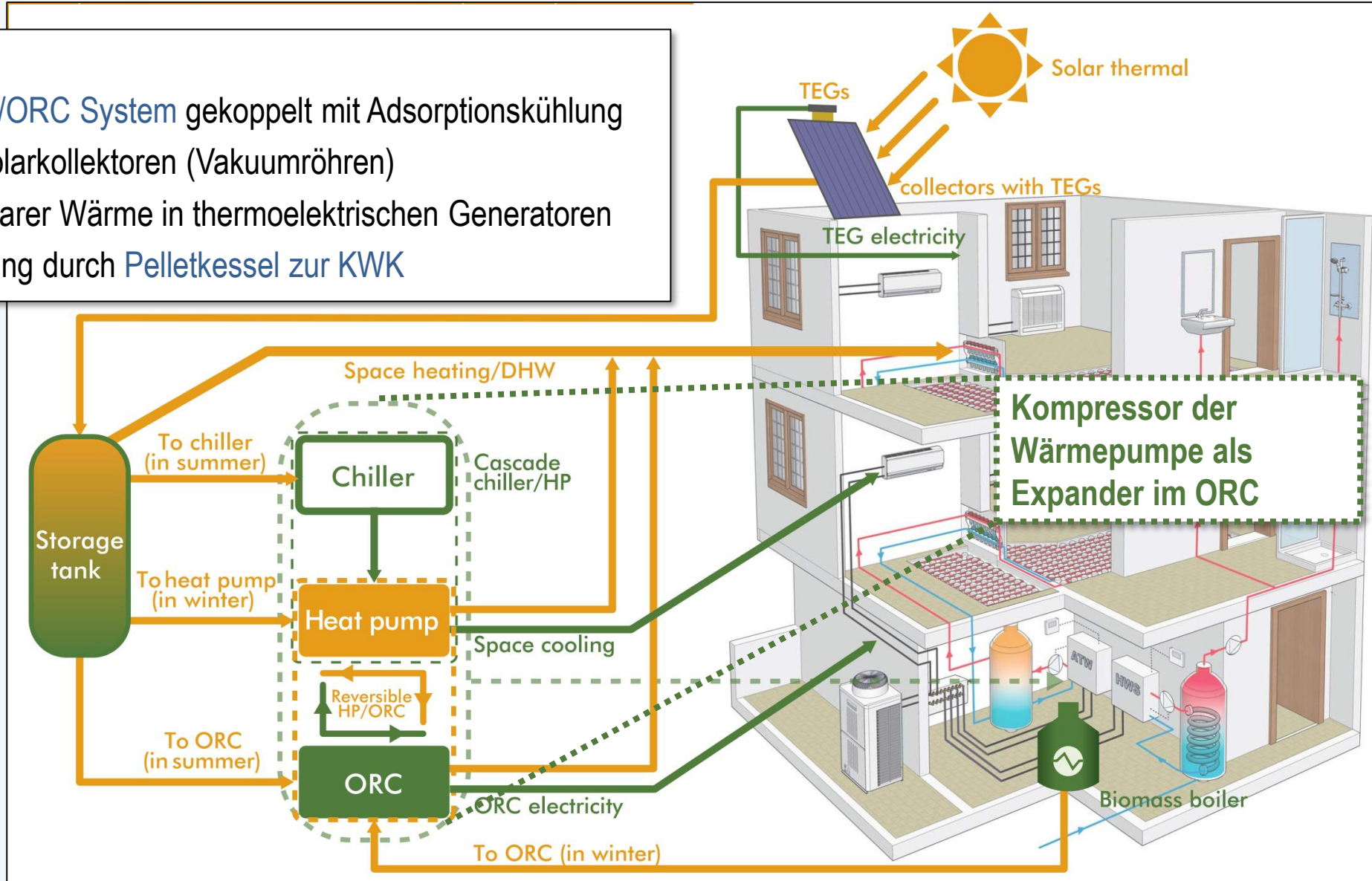
- Reversibles Wärmepumpen/ORC System gekoppelt mit Adsorptionskühlung
- Wärmeversorgung durch Solarkollektoren (Vakuumröhren)
- Nutzung überschüssiger solarer Wärme in thermoelektrischen Generatoren
- Zusätzliche Wärmeversorgung durch Pelletkessel zur KWK



Energiequellen:
Solarenergie und
Holzpellets



Deckung von bis zu 70%
 des Energieverbrauchs
 in Gebäuden

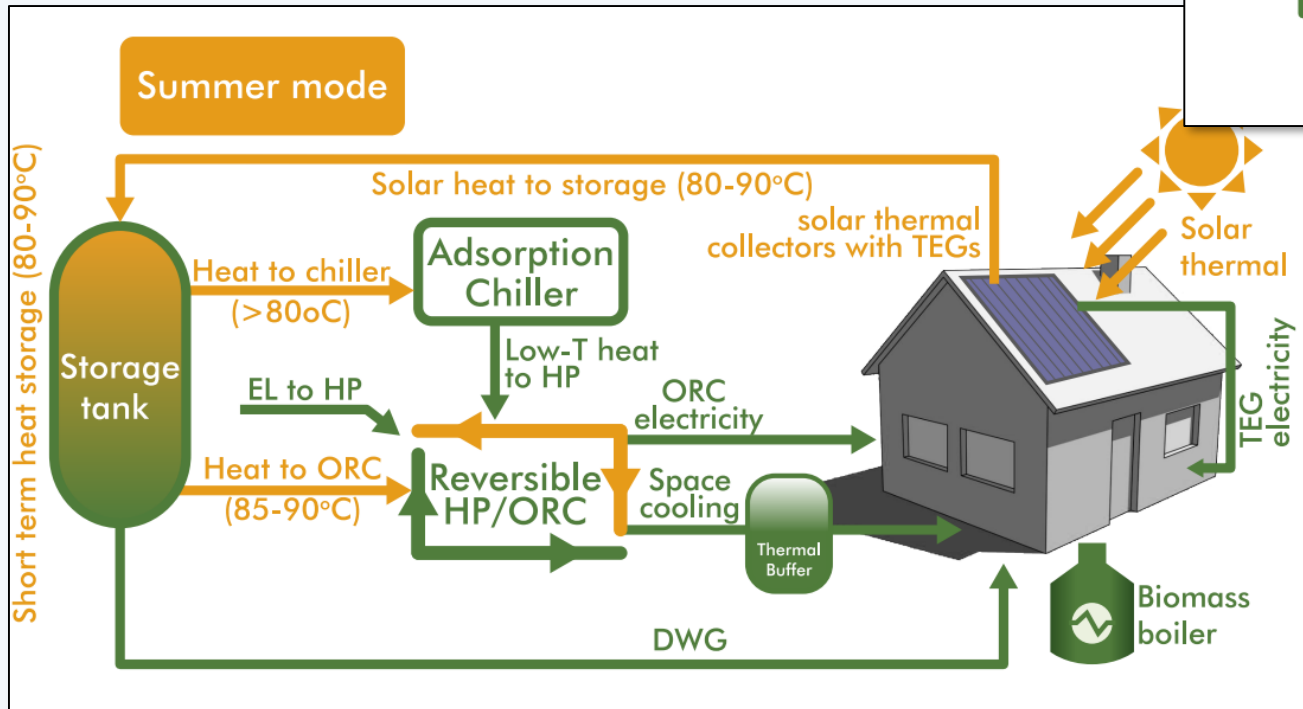


Das Konzept von SolBio-Rev

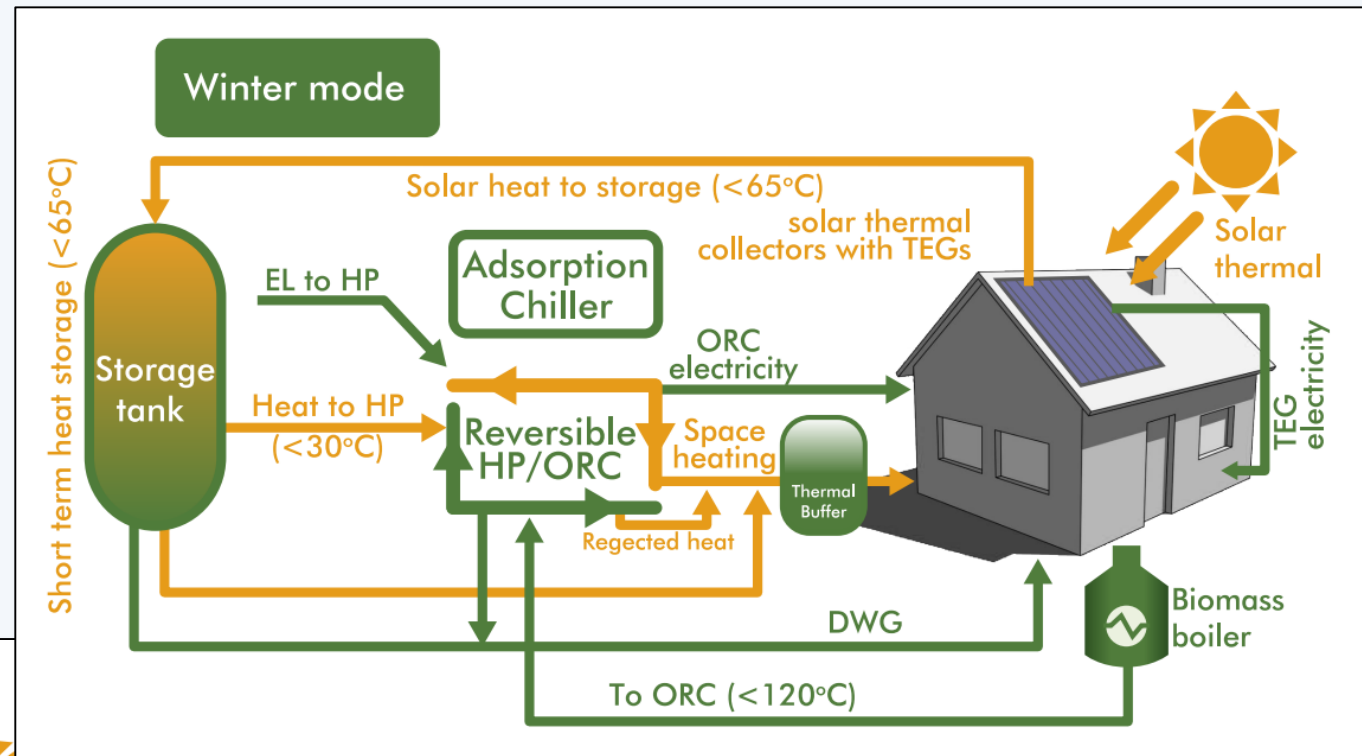


Sommerbetrieb

- Solare Wärme speist Pufferspeicher
→ Versorgung mit Warmwasser
- **Priorität:** Gebäudekühlung
- Nutzung zusätzlicher Wärme im ORC



Fließschema des SolBio-Rev Systems im Sommerbetrieb



Fließschema des SolBio-Rev Systems im Winterbetrieb



Winterbetrieb

- Nutzung solarer Wärme für Warmwasser und Heizen
- Wärmepumpe nutzt Niedertemperaturwärme
- Zusätzlich: **KWK-Pelletkessel**

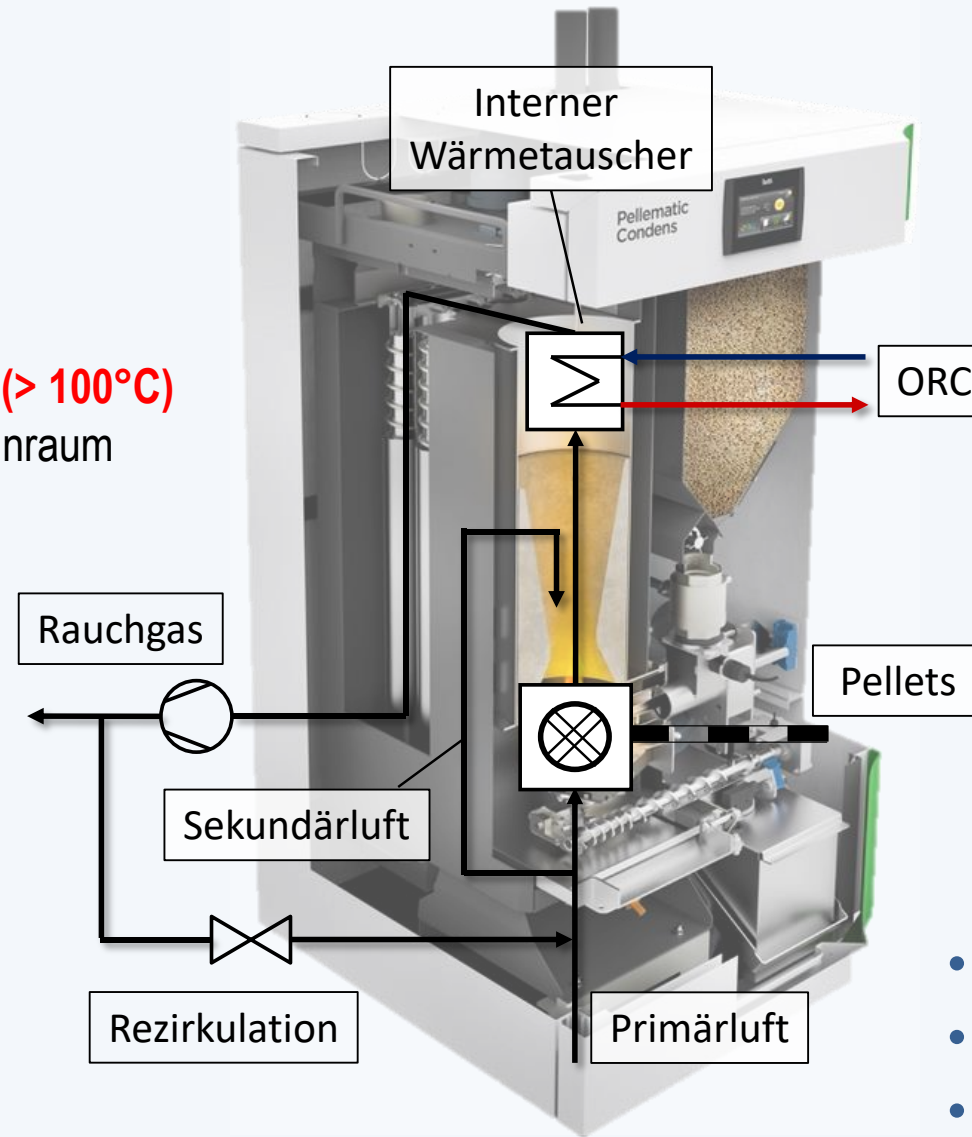
Pelletkessel Konzept

Interner Wärmetauscher

- Entscheidend für ORC Wirkungsgrad:
Wärmezufuhr auf **hohem Temperaturniveau ($> 100^{\circ}\text{C}$)**
→ Integration eines Wärmetauschers im Brennraum
- Flexible Wärmebereitstellung auf definiertem Temperaturniveau

Rauchgasrezirkulation

- Vermeidung lokaler Hotspots und Ascheschmelzen
→ **Reduktion der Emissionen**
- Verringeretes Verbrennungsluftverhältnis
→ **Steigerung des Kesselwirkungsgrads**

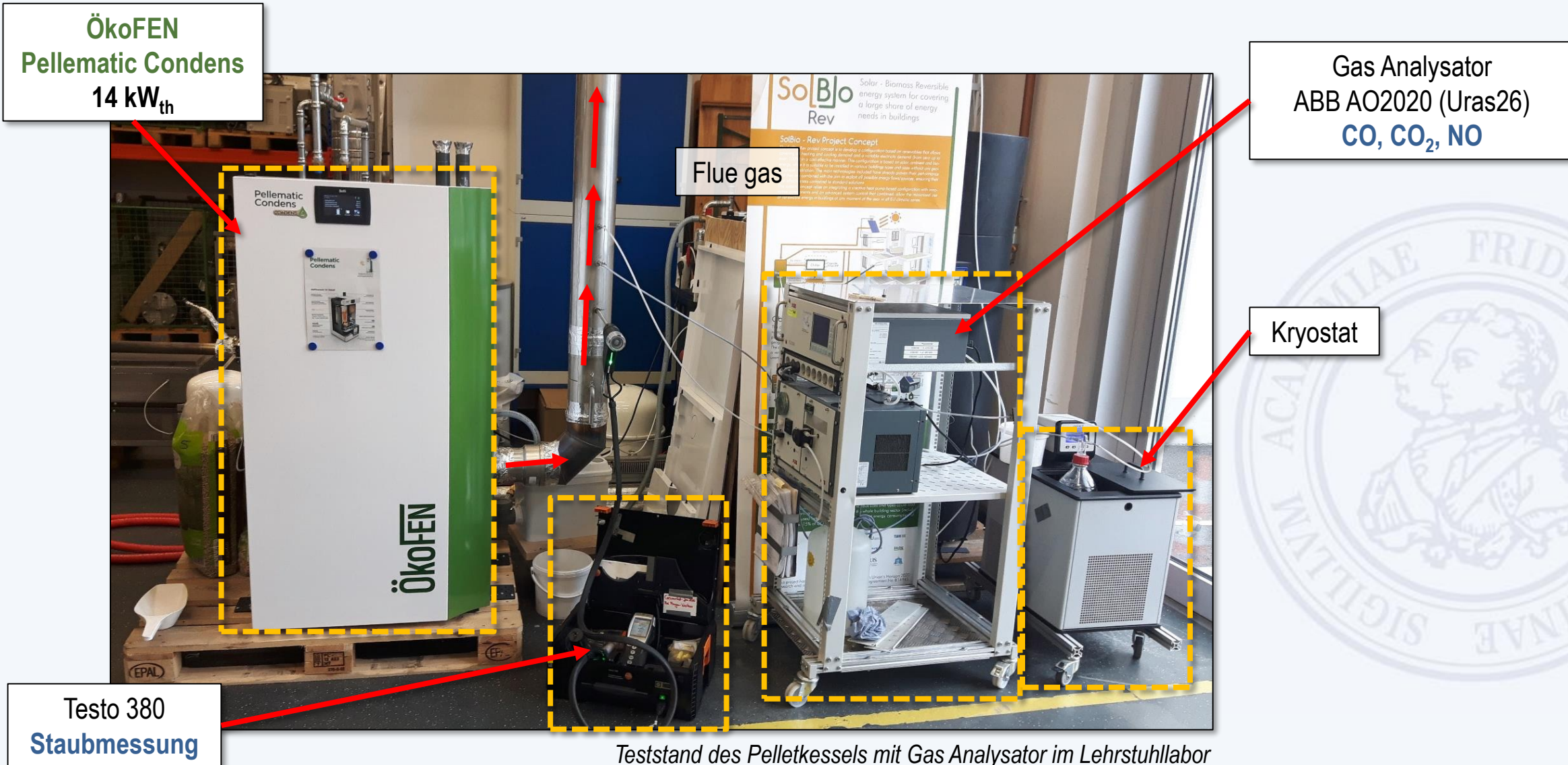


Schema eines ÖkoFEN Pelletkessels mit internem Wärmetauscher und Rauchgasrezirkulation

Ziele

- Hoher Brennstoffausnutzungsgrad
- Erhöhter Stromertrag im ORC
- Reduktion der Emissionen

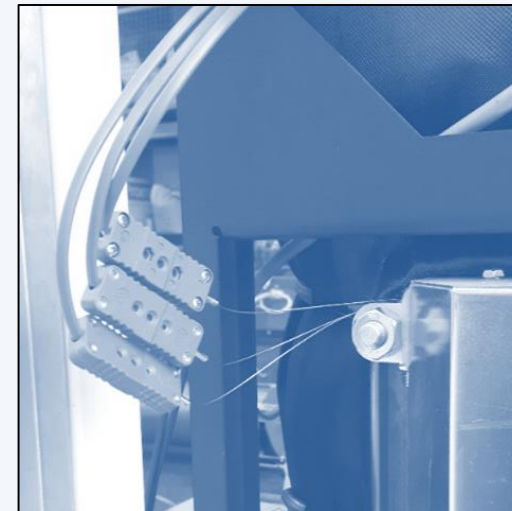
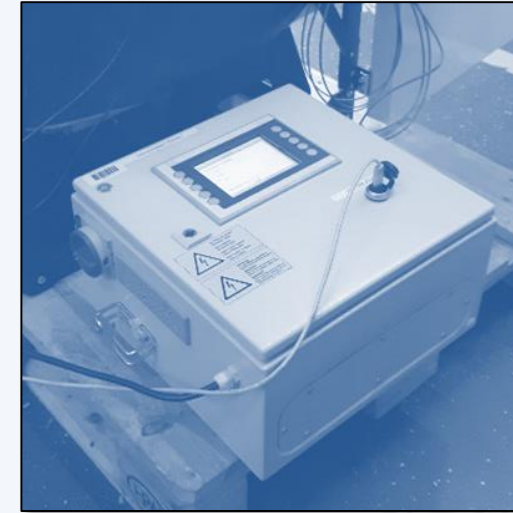
Versuchsaufbau im Labor



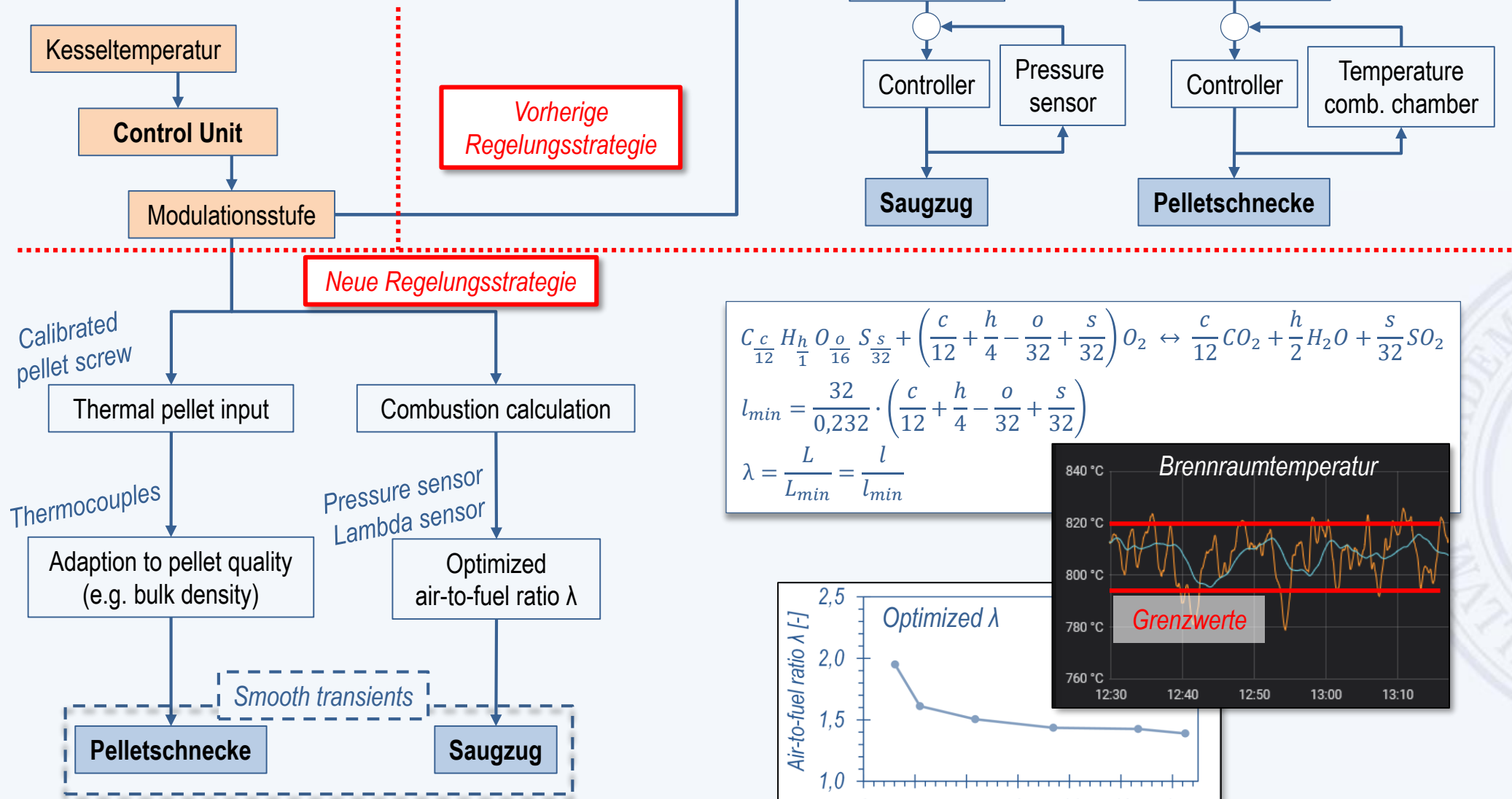
Teststand des Pelletkessels mit Gas Analysator im Lehrstuhllabor

Vorgehensweise

- I
- II
- III
- IV
- V
1. Versuchsreihen mit unmodifiziertem Pelletkessel
2. Schrittweise Optimierung und Versuchsreihen
 - a. **Rauchgasrezirkulation**
Einstellung der Rauchgasrezirkulation über Regelventil
 - b. **Luftstufung**
Reduzierende Atmosphäre in Primärzone und Sekundärluftrohr für turbulente Nachverbrennung
 - c. **Neue Regelungsstrategie**
Verbesserte Regelungsstrategie basierend auf:
 - a. *Verbrennungsrechnung*
 - b. *Anpassung an Pelletqualität*
 - c. *Optimierte Lastwechsel für Modulationsbetrieb*
3. Versuchsreihen mit Rauchgasrezirkulation, Luftstufung und neuer Regelungsstrategie



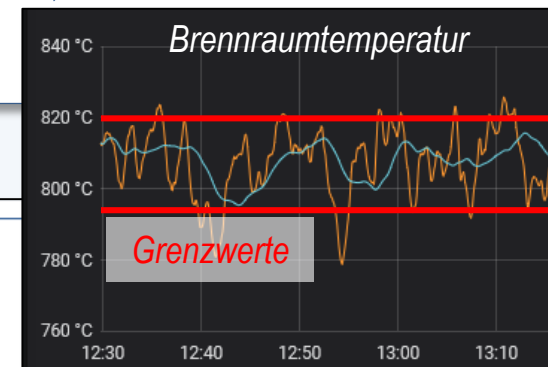
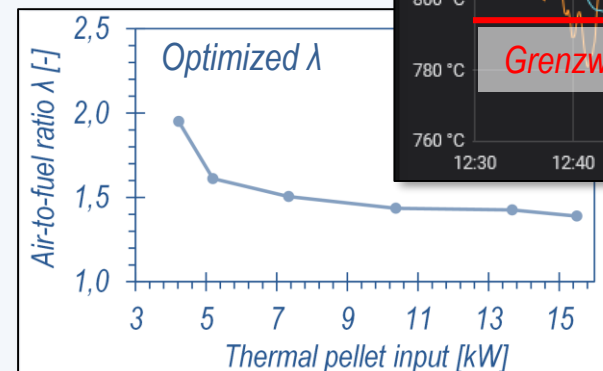
Regelungsstrategie



$$C_{\frac{c}{12}} H_{\frac{h}{1}} O_{\frac{o}{16}} S_{\frac{s}{32}} + \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right) O_2 \leftrightarrow \frac{c}{12} CO_2 + \frac{h}{2} H_2O + \frac{s}{32} SO_2$$

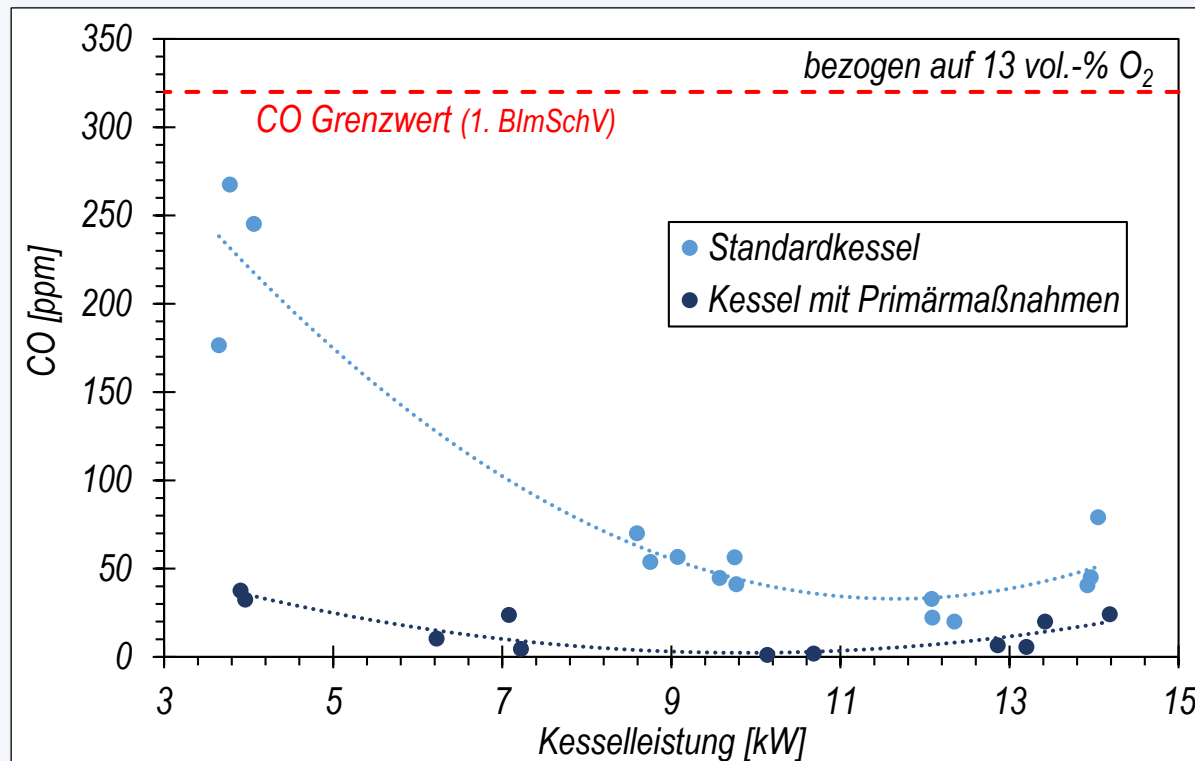
$$l_{min} = \frac{32}{0,232} \cdot \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right)$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}} = \frac{l}{l_{min}}$$



Ergebnisse – CO Emissionen

- CO Grenzwert (1. BImSchV): 320 ppm/m³
- Minimum der CO Emissionen von ~12 kW auf ~10 kW verschoben (erhöhter Volumenstrom und geringere Verweilzeit durch Rezirkulation)
- **Teillast:** ungleichmäßige Brennstoffzufuhr (schwankendes Verbrennungsluftverhältnis)
- **Nennlast:** Geringe Verweilzeit im heißen Brennraum (hoher Volumenstrom durch Rezirkulation)

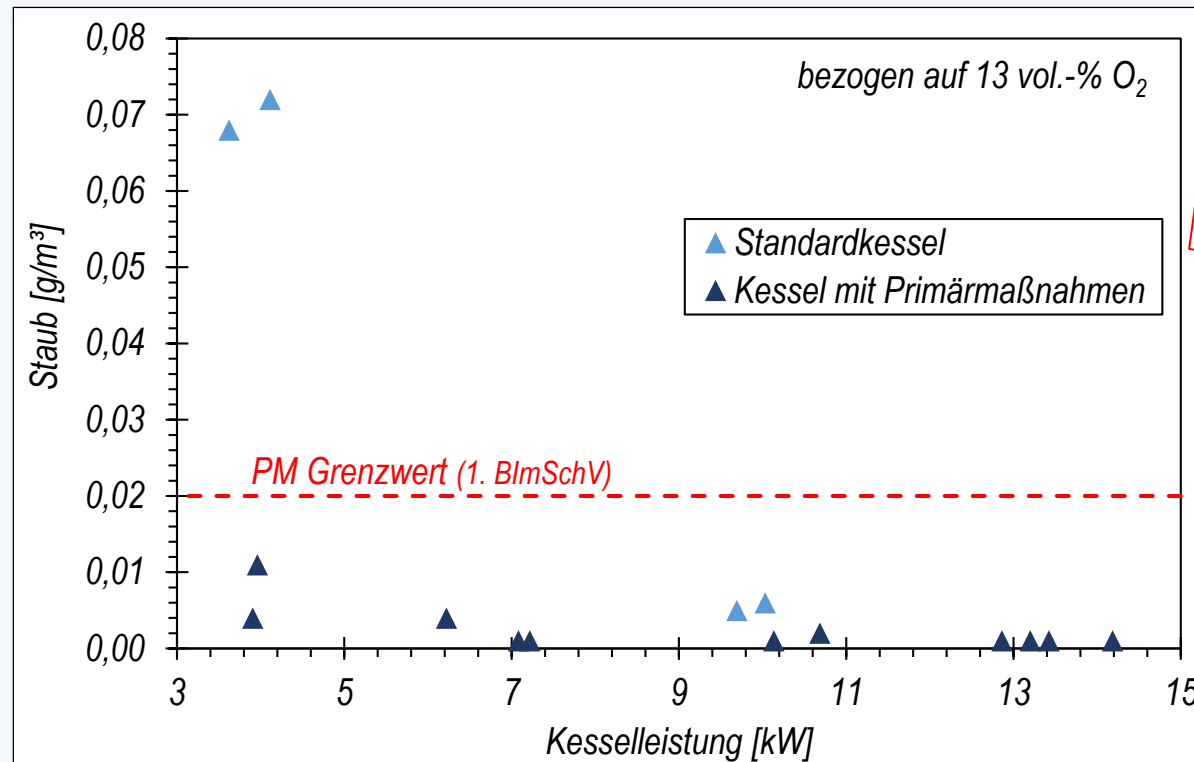


Signifikante Reduktion der CO Emissionen durch Rezirkulation, Luftstufung und neue Regelung

CO Emissionen bezogen auf 13 vol.-% O₂
(gemessen nach VDI 4207-2)

Ergebnisse – Staubemissionen

- Grenzwert Staubemissionen (1. BImSchV): 20 mg/m³
- Positive Korrelation zwischen Staub und CO Emissionen
- Staubemissionen **< 2 mg/m³** über weiten Leistungsbereich
- Etwas höhere Emissionen bei Teillast (*geringere Brennraumtemperatur und unvollständiger Ausbrand*)

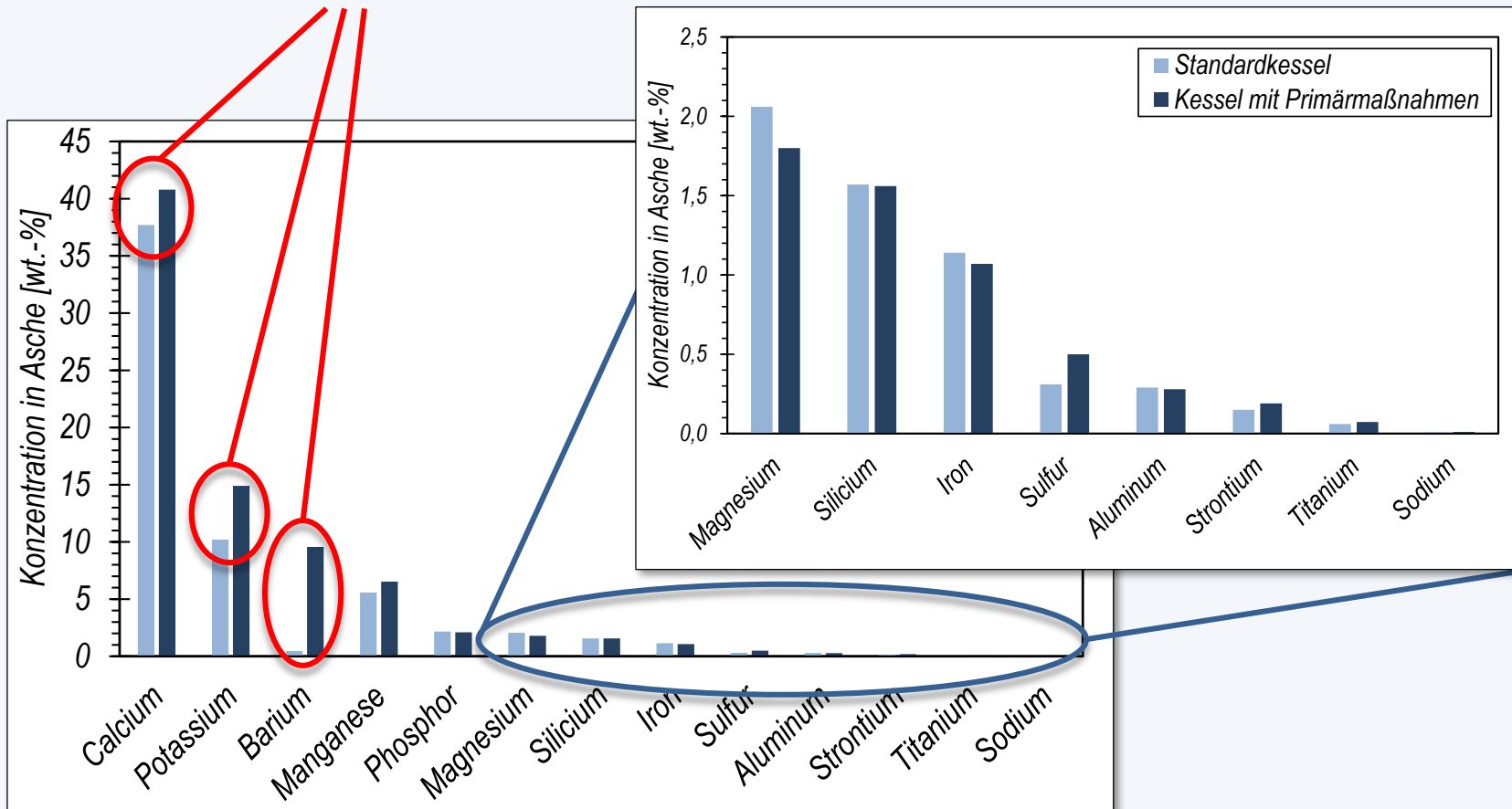


Deutlich geringere Staubemissionen durch Rezirkulation, Luftstufung und Regelung

Staubemissionen bezogen auf 13 vol.-% O₂
(gemessen nach VDI 4207-2)

Ergebnisse – Ascheanalyse (RFA)

- Staubemissionen durch Primärmaßnahmen erheblich reduziert
- Rezirkulation und Luftstufung führen zu geringeren Temperaturen am Rost
 - Mehr anorganische Aschebestandteile verbleiben als feste Bestandteile in der Asche
 - **Weniger anorganische Aschebestandteile (z.B. Kalium) werden als Aerosole emittiert**



Röntgenfluoreszenzanalyse der Asche;
beide Proben nach stationärem Versuch
bei 10 kW entnommen

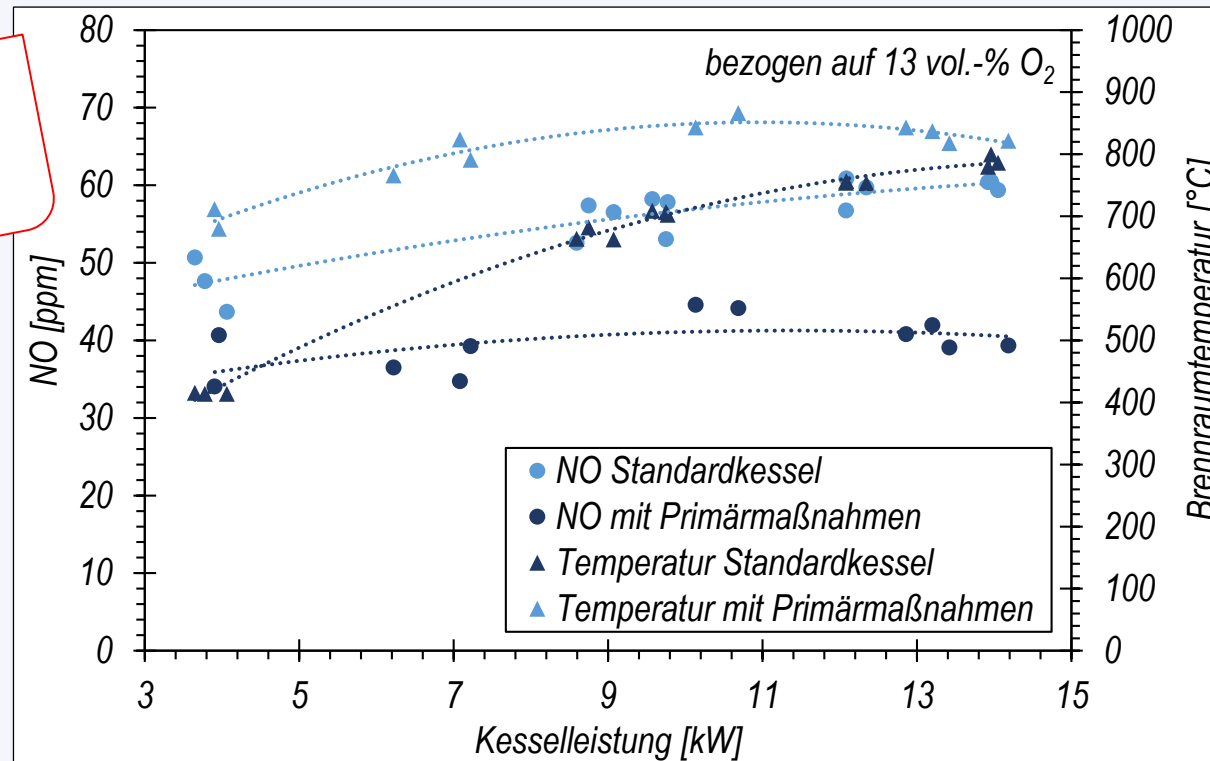
Ergebnisse – NO Emissionen

- NO_x Emissionen fester Brennstoffe vor allem durch Brennstoff-NO_x bestimmt
- Deutliche Korrelation zwischen NO und Brennraumtemperatur (*thermisches NO_x*)
- **Rauchgasrezirkulation und Luftstufung führen zu geringeren NO_x Emissionen**
(geringere Temperaturen und reduzierende Atmosphäre in Primärzone)

Verringerte NO Emissionen
durch Rezirkulation,
Luftstufung und Regelung

→ NO Reduktion um 20-30 %

NO Emissionen bezogen auf 13 vol.-% O_2



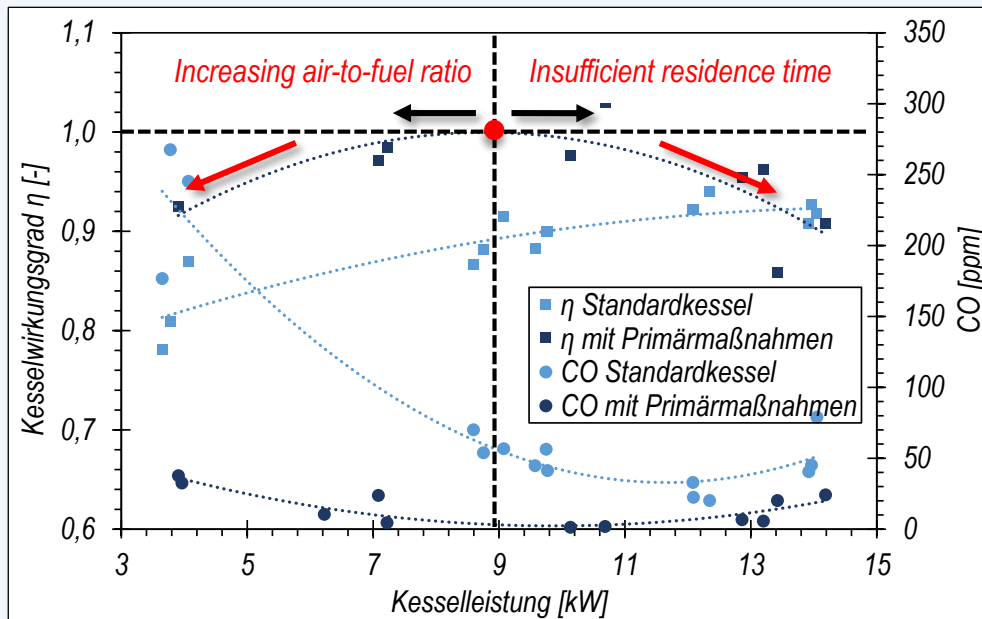
Ergebnisse – Kesselwirkungsgrad

- Kesselwirkungsgrad

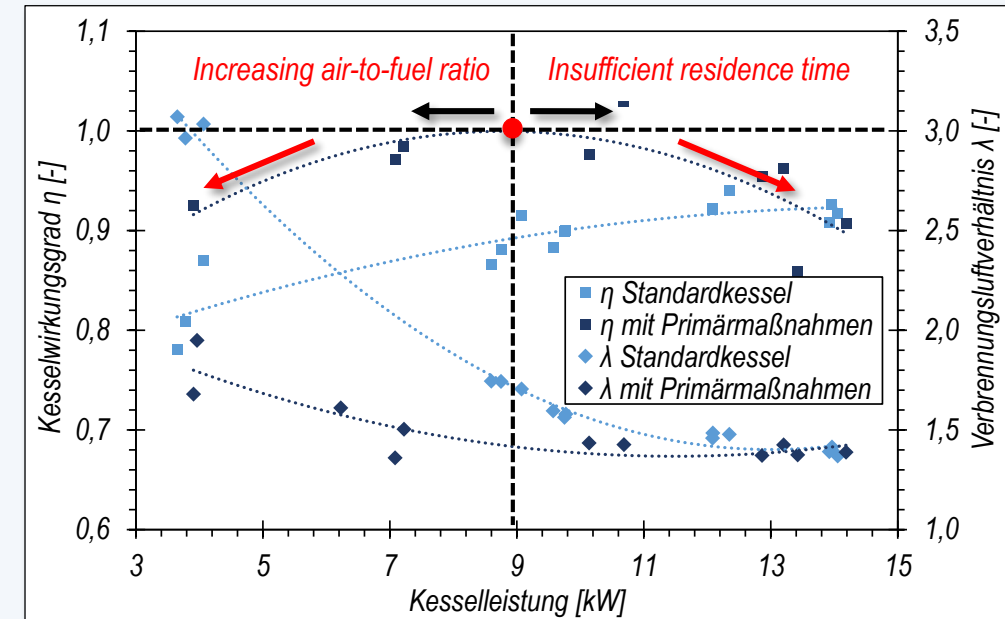
$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{water}} \cdot c_p \cdot \Delta T}{\dot{m}_{\text{pellets}} \cdot H_u}$$

- Rezirkulation und Luftstufung verbessern Kesselwirkungsgrad (reduziertes Verbrennungsluftverhältnis)

$$\dot{Q}_{\text{Rauchgas}} = \dot{m}_{\text{rg}} \cdot c_{p,\text{rg}} \cdot T_{\text{rg}}$$



Boiler efficiency and CO emissions



Boiler efficiency and air-to-fuel ratio

- Wirkungsgradmaximum korreliert mit Minimum der CO Emissionen
- Bei hohen Kesselleistungen führt Rezirkulation zu unvollständigem (veringerte Verweilzeit)

Zusammenfassung und Ausblick



Kickoff SolBio-Rev

- Aufbau der Pilotanlagen
- Integration einer intelligenten Regelung

Zwei Prototypanlagen
in Nürnberg und Athen

Mai 2019

Mai 2019 – April 2021

Mai 2021 – April 2022

Mai 2022 – April 2023

Entwicklungsphase

- Entwicklung der SolBio-Rev Komponenten
→ Pelletkessel mit internem Wärmetauscher und Rezirkulation
- Entwicklung einer lastabhängigen Regelungsstrategie für reduzierte Emissionen und hohen Wirkungsgrad
- Auslegung und Fertigung eines internen Wärmetauscher zur KWK mit einem ORC
- Laborversuche und Optimierung des Kessels



- Zwölfmonatiger Feldtestbetrieb
- Messdatenanalyse und Optimierung der Prototypen
- Interpretation der Ergebnisse

SolBio-Rev Vorteile

- Erhöhte Flexibilität
- Anwendbarkeit in verschiedenen Gebäudearten
- Hohe Jahresauslastung
- Kompaktheit durch reversibles System