

# **Modellbasierte Regelung eines Voralterungs-ofens unter instationären Bedingungen**

**2. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium  
10. - 11. Oktober 2019 in Aachen**

**Dipl.-Ing. Simon Künne**

**OTTOJUNKER**  
WE UNDERSTAND METALS

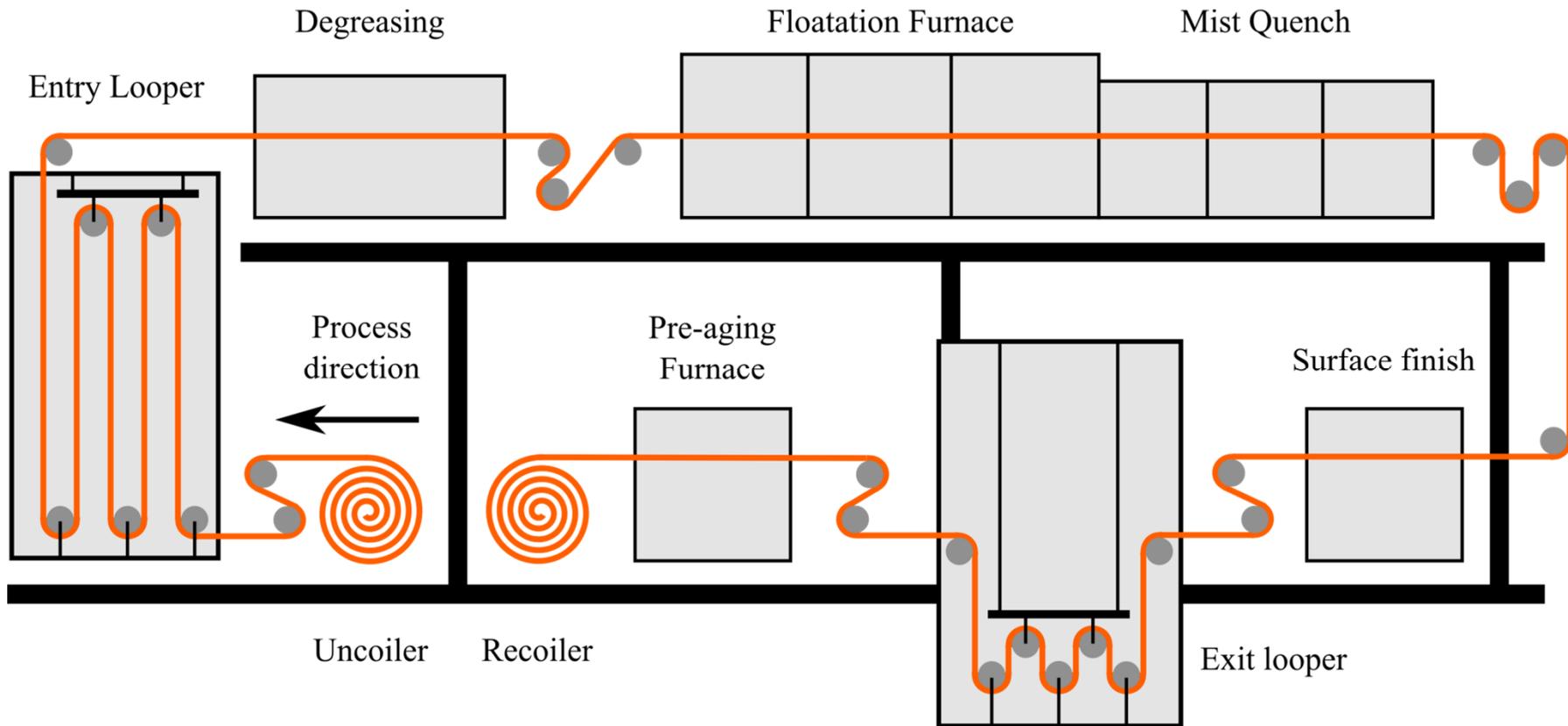
# Inhalt

---



- *Motivation / /Einführung*
- Methoden
- Ergebnisse

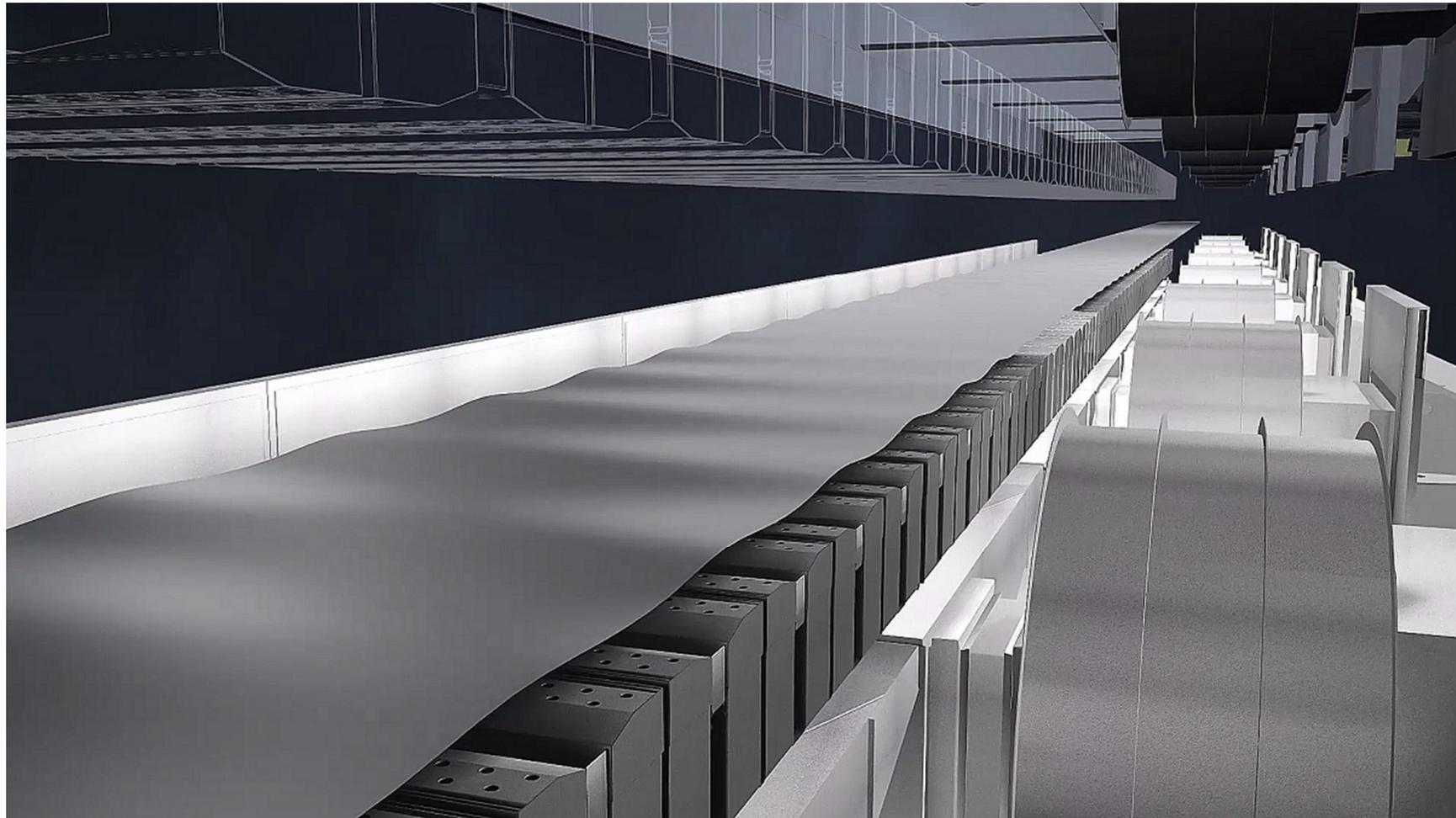
# Schematische Darstellung Bandbehandlung



# Voralterungsöfen in der Werksmontage



# Anlage & Prozess



# Inhalt

---



- Motivation / /Einführung
- *Methoden*
- Ergebnisse

# Grundlagen Modellierung

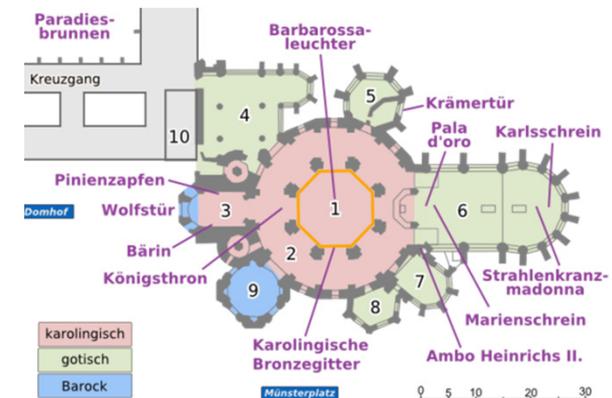
- Ein Modell ist ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit
  - Es werden nur die wichtig erscheinenden Teile abgebildet
  - Zusammenhänge werden vereinfacht
  - Detailgrad je nach Anforderung – genau genug aber nicht zu aufwändig
  - Ein Modell ist nur unter bestimmten Randbedingungen gültig
- Modelle sind bestenfalls gültig aber niemals wahr



Foto des Aachener Doms



3D-Modell



Schematische Zeichnung

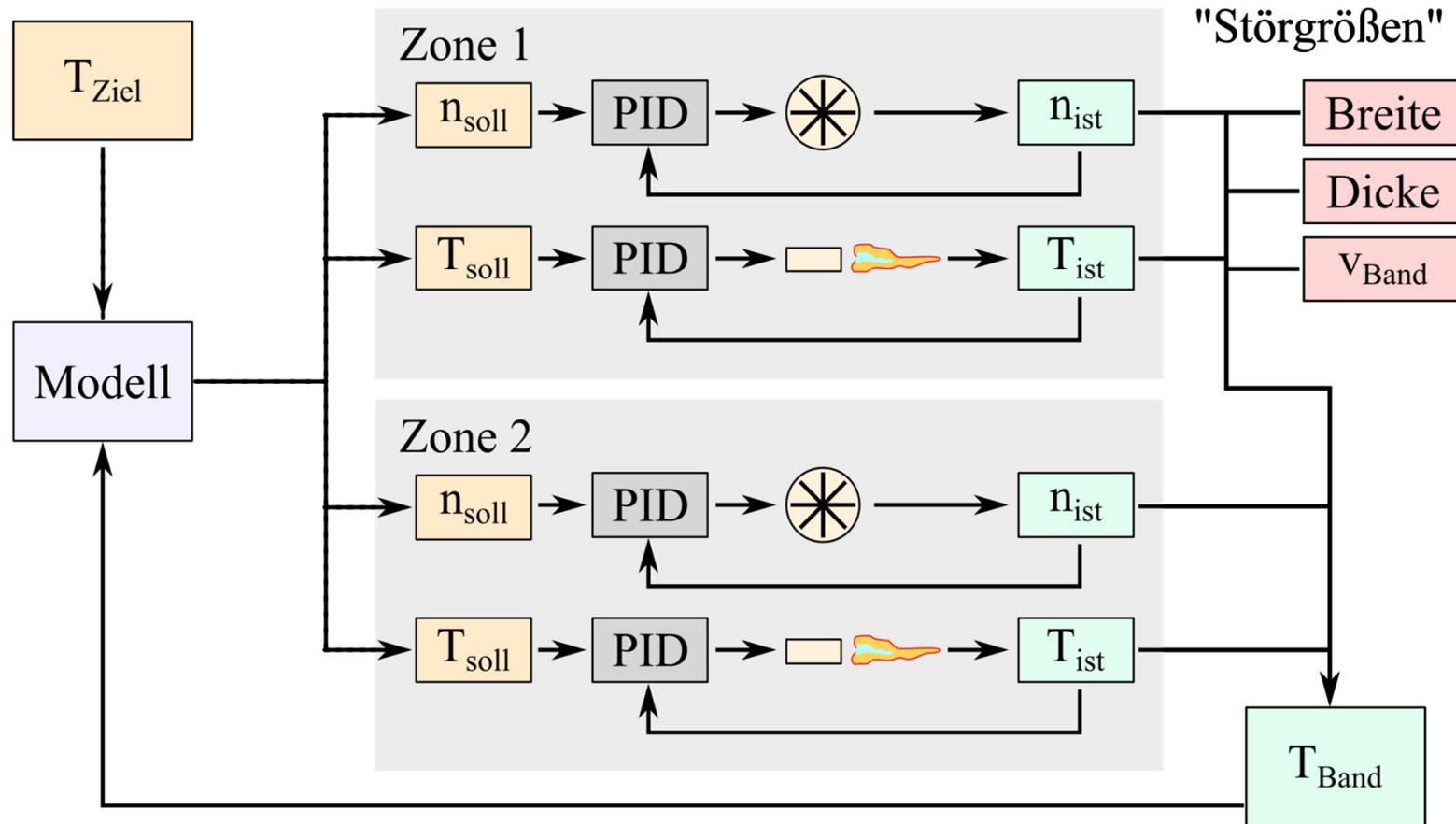
# Ein Modell ist nur so gut wie seine Daten

Deshalb: Messungen durchführen und Modelle validieren



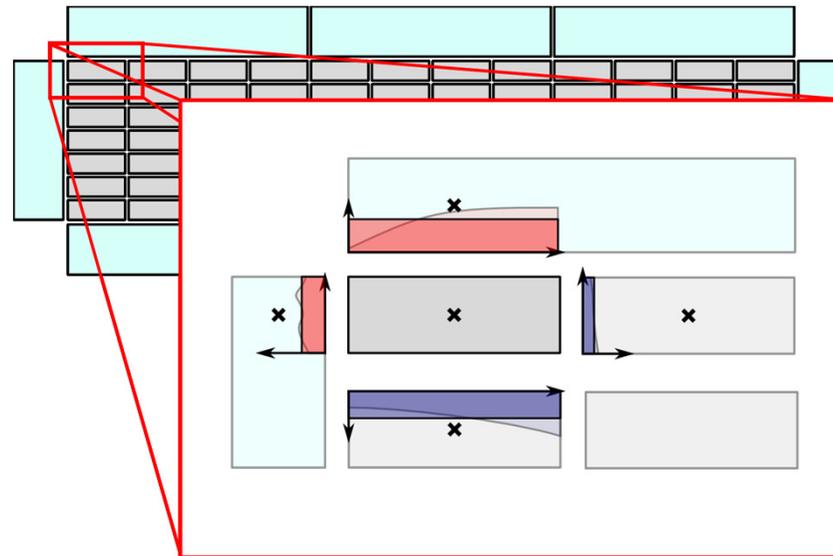
# Modellbasierte Regelung

Konventionelle Regelung wird Anforderungen nicht gerecht



# Finite Volumen Methode

- Numerisches Verfahren zur Lösung von Erhaltungsgleichungen
- 1) Erzeugen eines Gitters
- 2) Aufstellen der integralen Erhaltungsgleichungen
- 3) Numerische Integration
- 4) Approximation der Funktionswerte
- 5) Lösung des Gleichungssystems

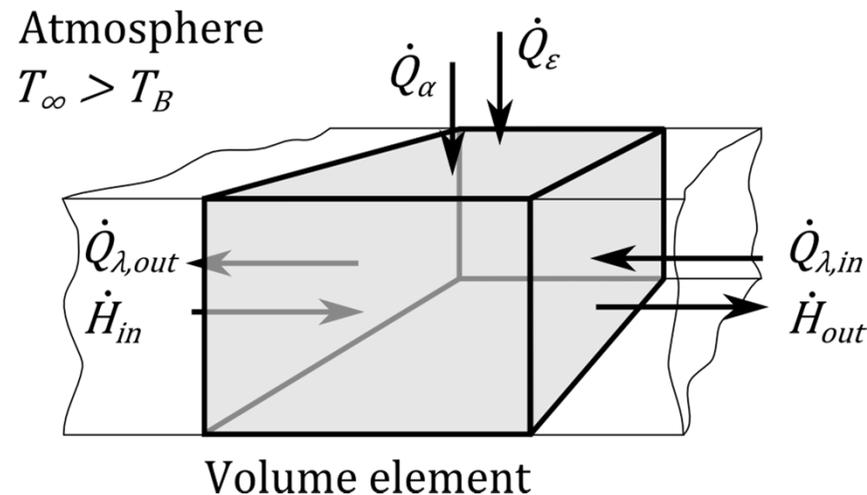


# Baukastensystem als Software

- Jeder Prozess in einem Industrieofen lässt sich auf diese Weise abbilden

- Volumen werden über Randbedingungen verknüpft

- Konvektion
- Wärmeleitung
- Strahlung
- Enthalpieströme
- Quellterme



- Energiebilanz

$$0 = \sum_x \dot{Q}_x + \sum_x \dot{H}_x + \frac{dT}{dt} \rho V c_p$$

# Übersicht Enthalpieströme

- **Enthalpie**

- $H = U + pV$

- **Innere Energie**

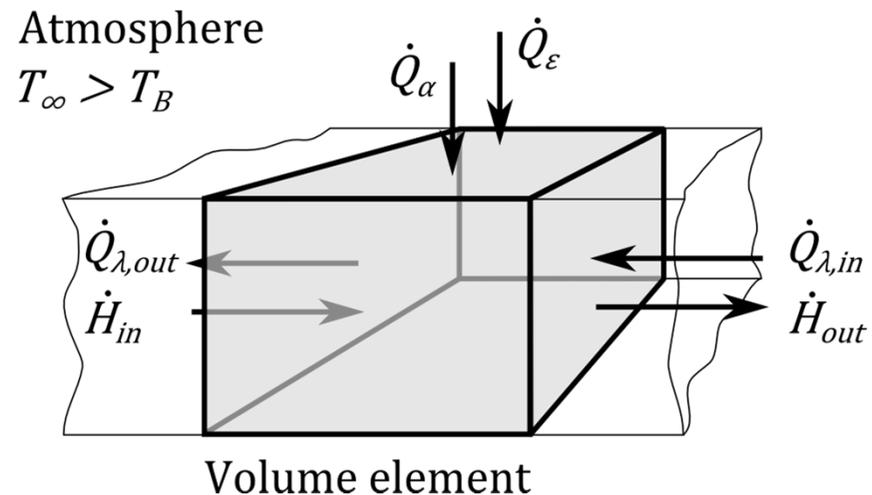
- $U = Q + W$

- $\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}$

- $\dot{W} = 0$

- **Enthalpiestrom**

- $\dot{H} = \dot{H}_{in} - \dot{H}_{out} = \dot{m}c_p \frac{\Delta T}{\Delta x} = \dot{m}c_p \cdot \frac{dT}{dx}$



# Wärmeübergangskoeffizient



- Vereint eine komplexe Theorie in einer einzigen Zahl
  - geometrische Randbedingungen
  - Strömungsfeld
  - Temperaturfeld
- Ähnlichkeitstheorie: Einführung dimensionsloser Kennzahlen
  - Nußelt-Zahl: Beschreibung des Wärmeübergangs.
$$\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda}$$
  - Reynolds-Zahl: Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften
$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$
  - Prandtl-Zahl: Materialeigenschaft, Verhältnis von Strömungsgrenzschicht zu Temperaturgrenzschicht
$$\text{Pr} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

# Wärmeübergangskoeffizient

- Für ein konkretes System kann die Gleichung der Nußelt-Zahl umgestellt und für zwei Betriebspunkte gleichgesetzt werden

$$\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

$$\frac{\text{Nu}_0 \cdot \lambda_0}{\alpha_0} = \frac{\text{Nu}_1 \lambda_1}{\alpha_1}$$



$$\alpha_1 = \alpha_0 \cdot \frac{\text{Nu}_1}{\text{Nu}_0} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$$

- Die Nußelt-Zahl ist abhängig von:
  - Geschwindigkeitsfeld
  - Temperaturfeld
  - Geometrie
- Empirischer Ansatz:  $\text{Nu} = G \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n$

# Wärmeübergangskoeffizient

- Ausgehend von einem Referenzpunkt kann der konvektive Wärmeübergang aktuell berechnet werden

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_0} \right)^m \cdot \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_0} \right)^n \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad \text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta} \quad \text{Pr} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

- Damit kann das Temperaturprofil des Bandes für beliebige Betriebspunkte der Anlage berechnet werden
- Haupteinflussgrößen in den Anlagenteilen sind
  - Ventilator Drehzahl / Fluidgeschwindigkeit (im Prozess)
  - Temperatur (im Rezept)
  - Zusammensetzung des Fluids (Luft / Schutzgas)

# Übersicht Quellterme



- **Brenner**

- **Feuerungstechnischer Wirkungsgrad**  
 $\eta = \eta(\lambda, T_{AG})$
- **Durchmischung der Edukte**

$$\dot{Q}_{Brenner} = \dot{m}_G \cdot H_G \cdot \eta$$

- **Ventilatoren**

- **Fluideistung vollständig zu Wärme**
- **Bei konstantem Volumenstrom auch konstante Fluidgeschwindigkeit**
- **Bei konstanter Drehzahl ist  $P_{Fluid}$  nur von der Temperatur abhängig**

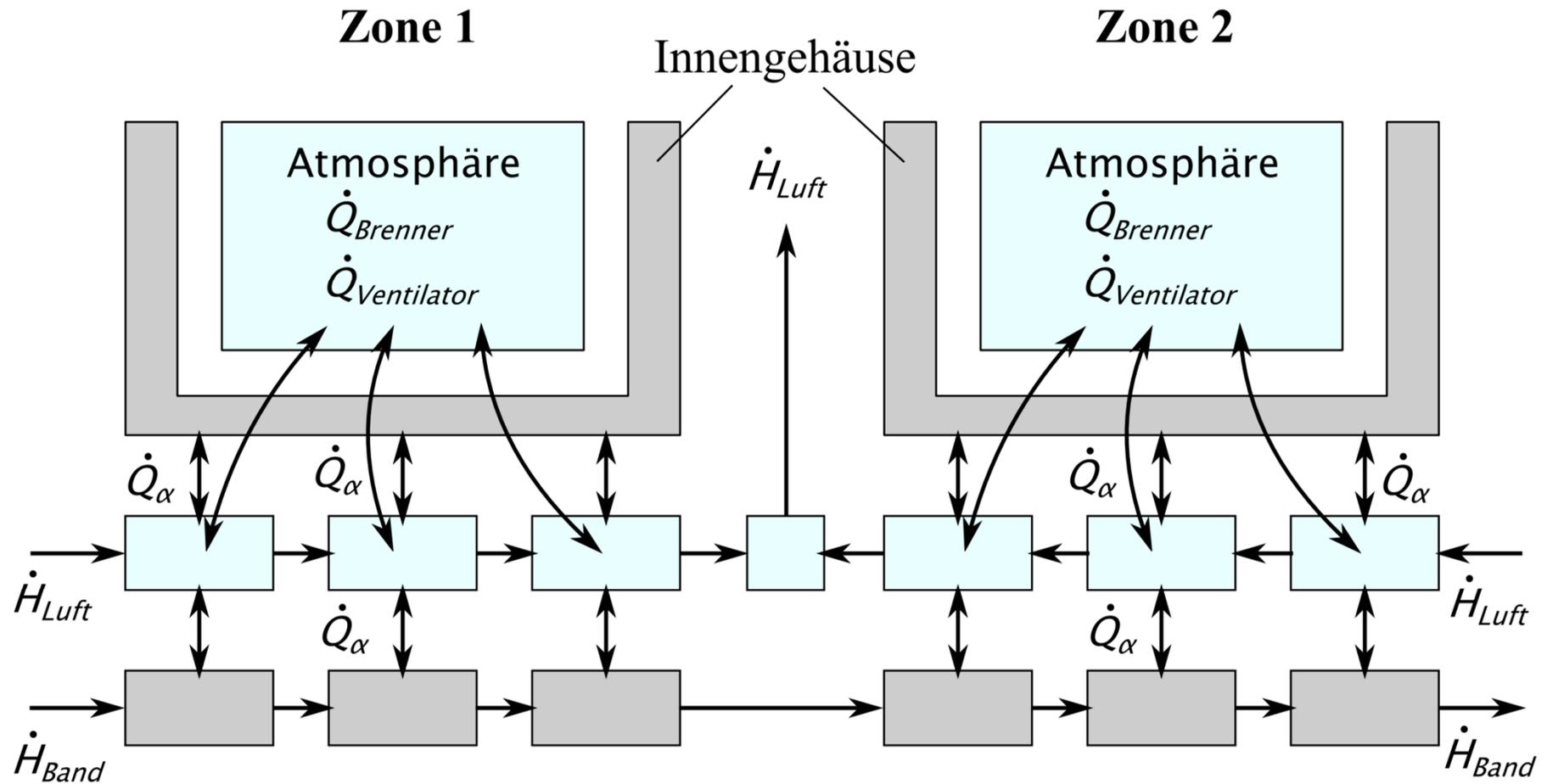
$$\dot{Q}_{Ventilator} = P_{Fluid} = \dot{V} \cdot \Delta p_t$$

$$\Delta p_t = \Delta p_{st} + \Delta p_{dyn}$$

$$\Delta p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_G^2$$

$$\rho \propto \frac{1}{T}$$

# Das Modell des Voralterungssofens



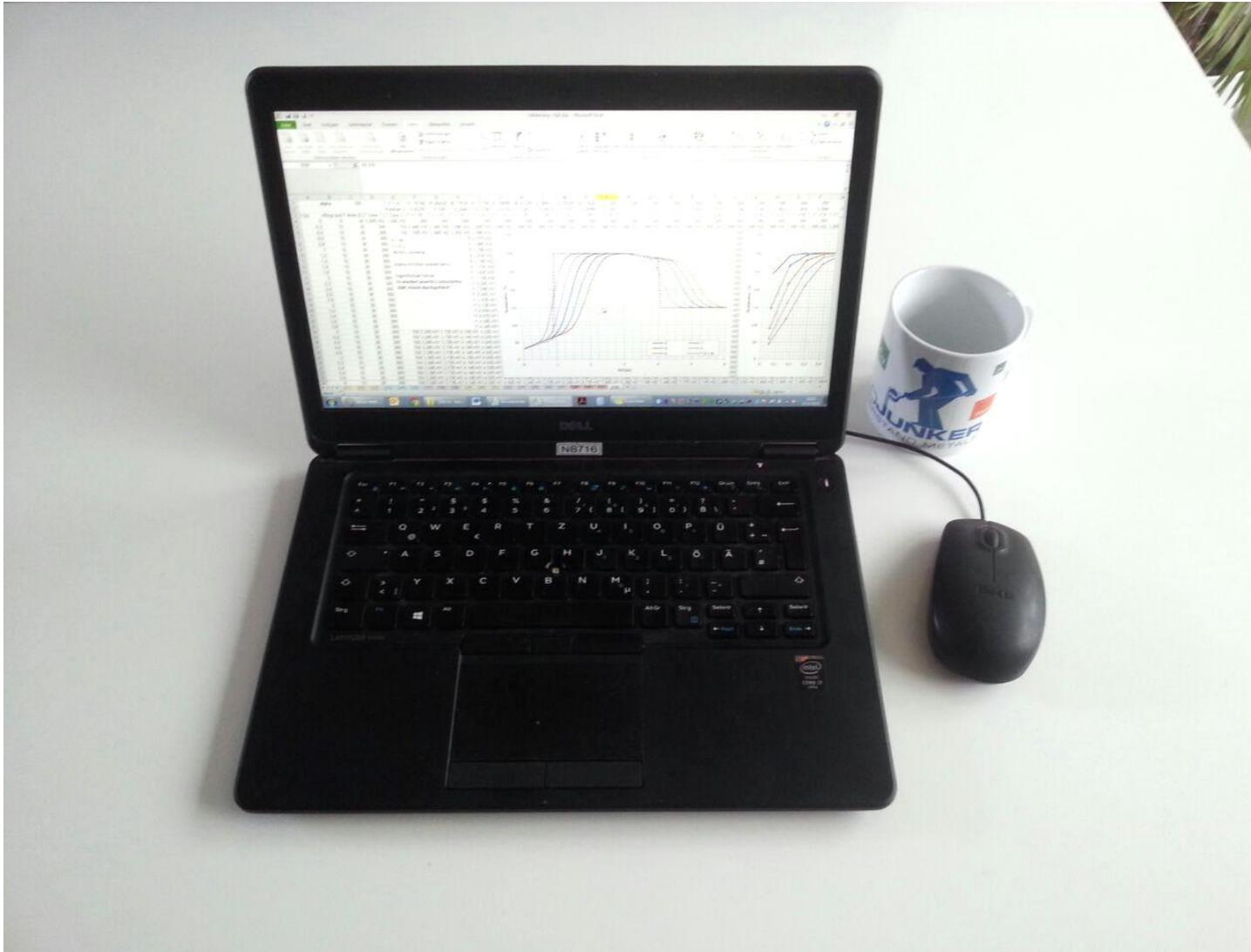
# Inhalt

---

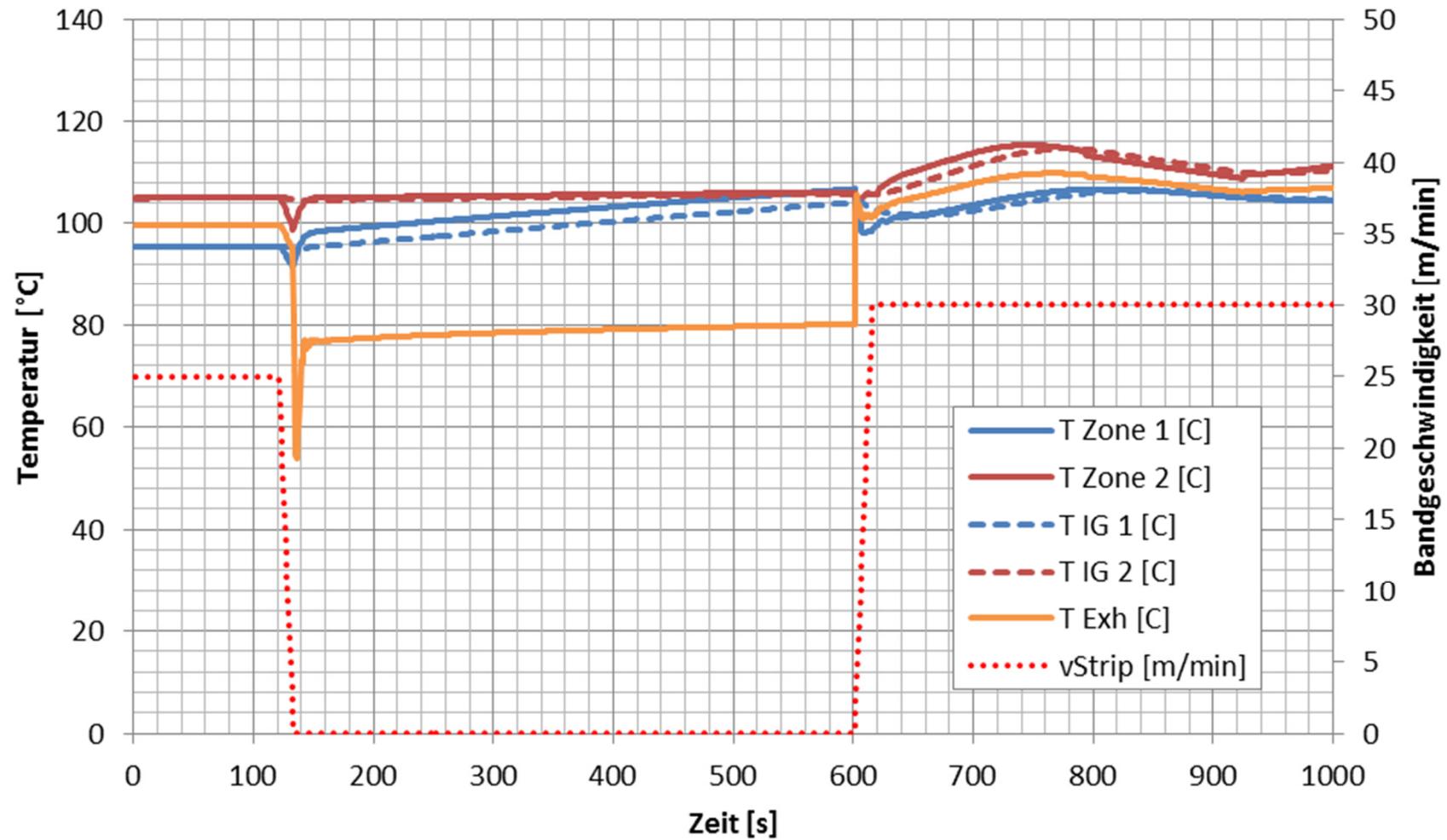


- Motivation / /Einführung
- Methoden
- *Ergebnisse*

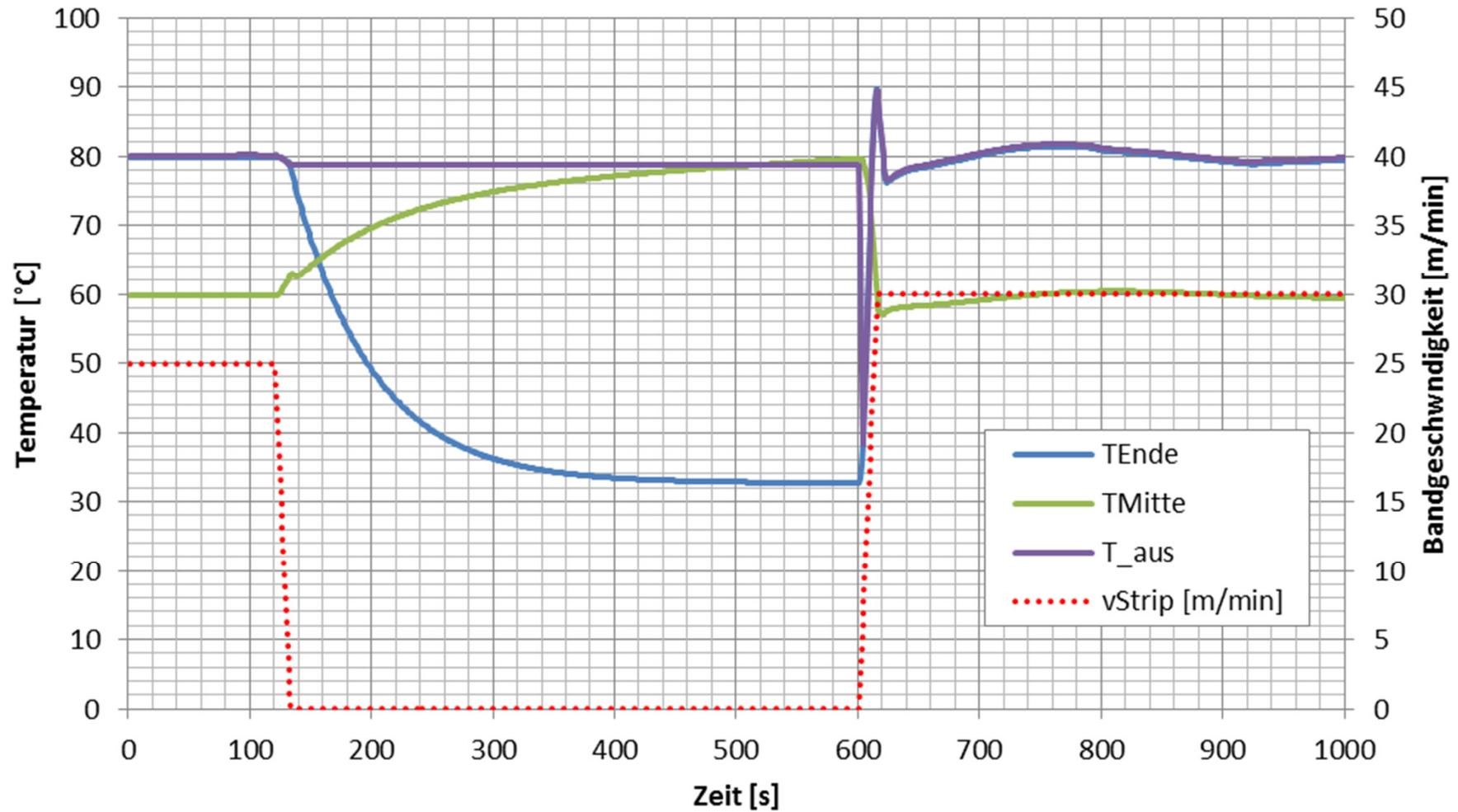
# Rechencluster



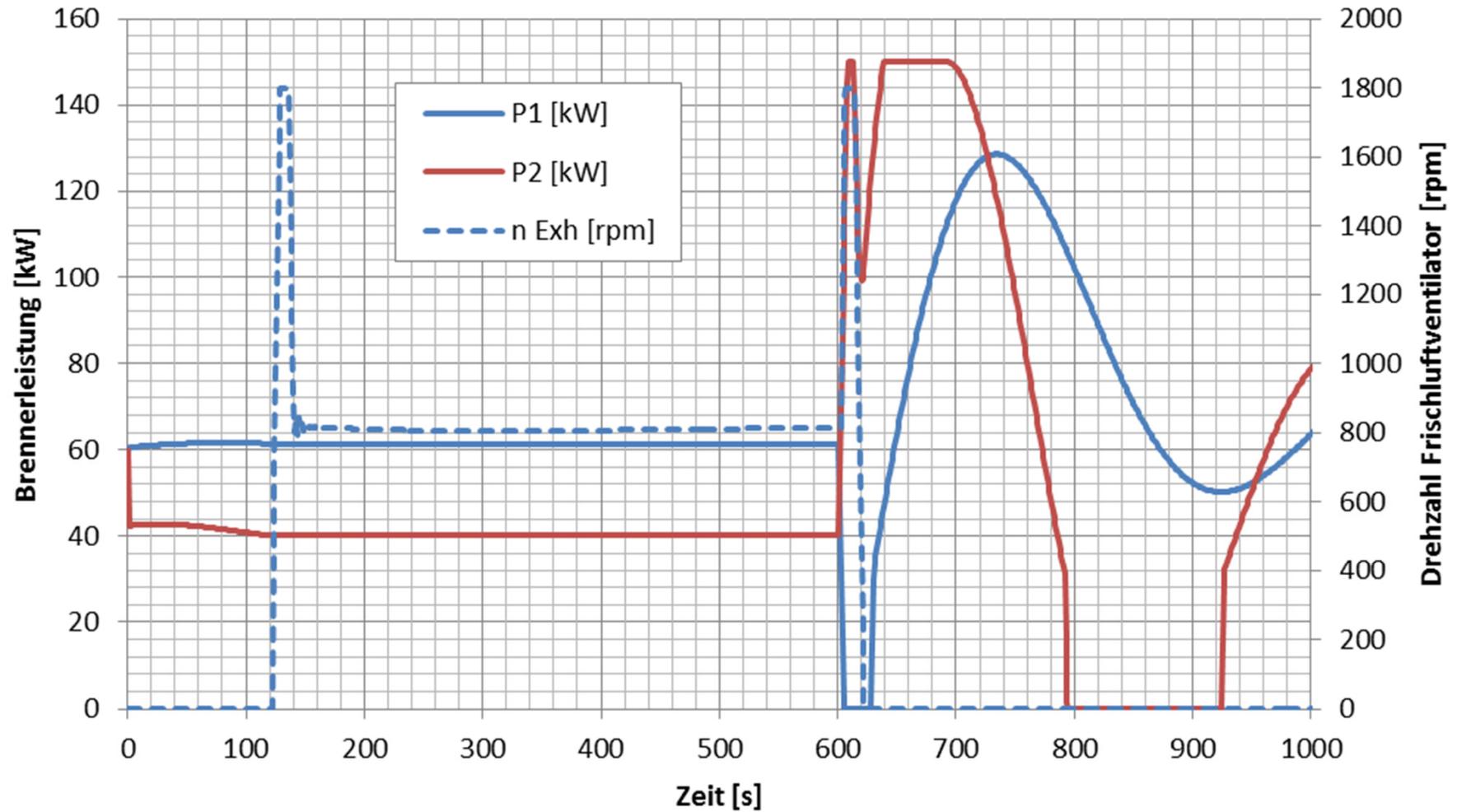
# Prozesstemperaturen beim Coilwechsel



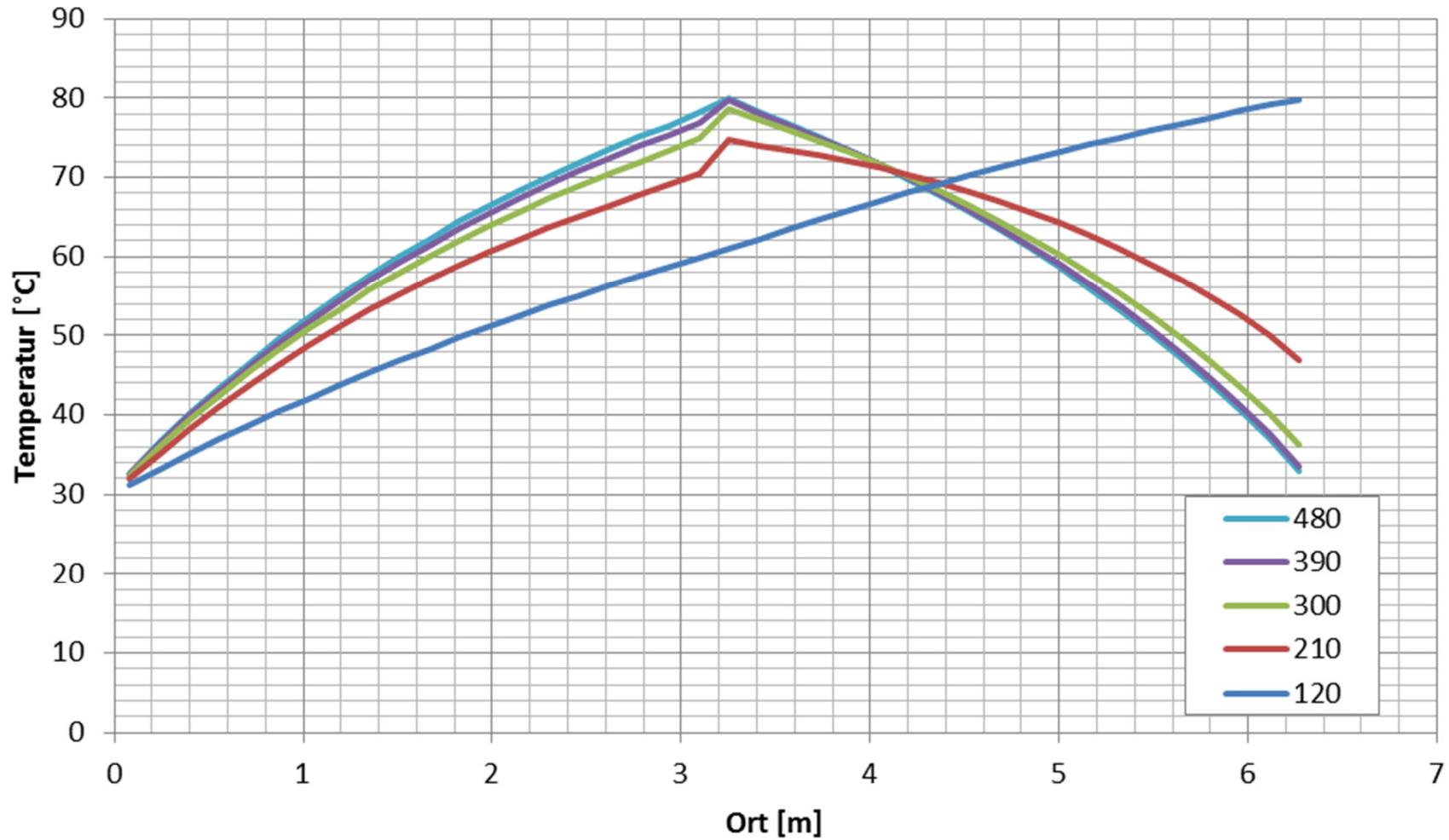
# Bandtemperatur an verschiedenen Positionen



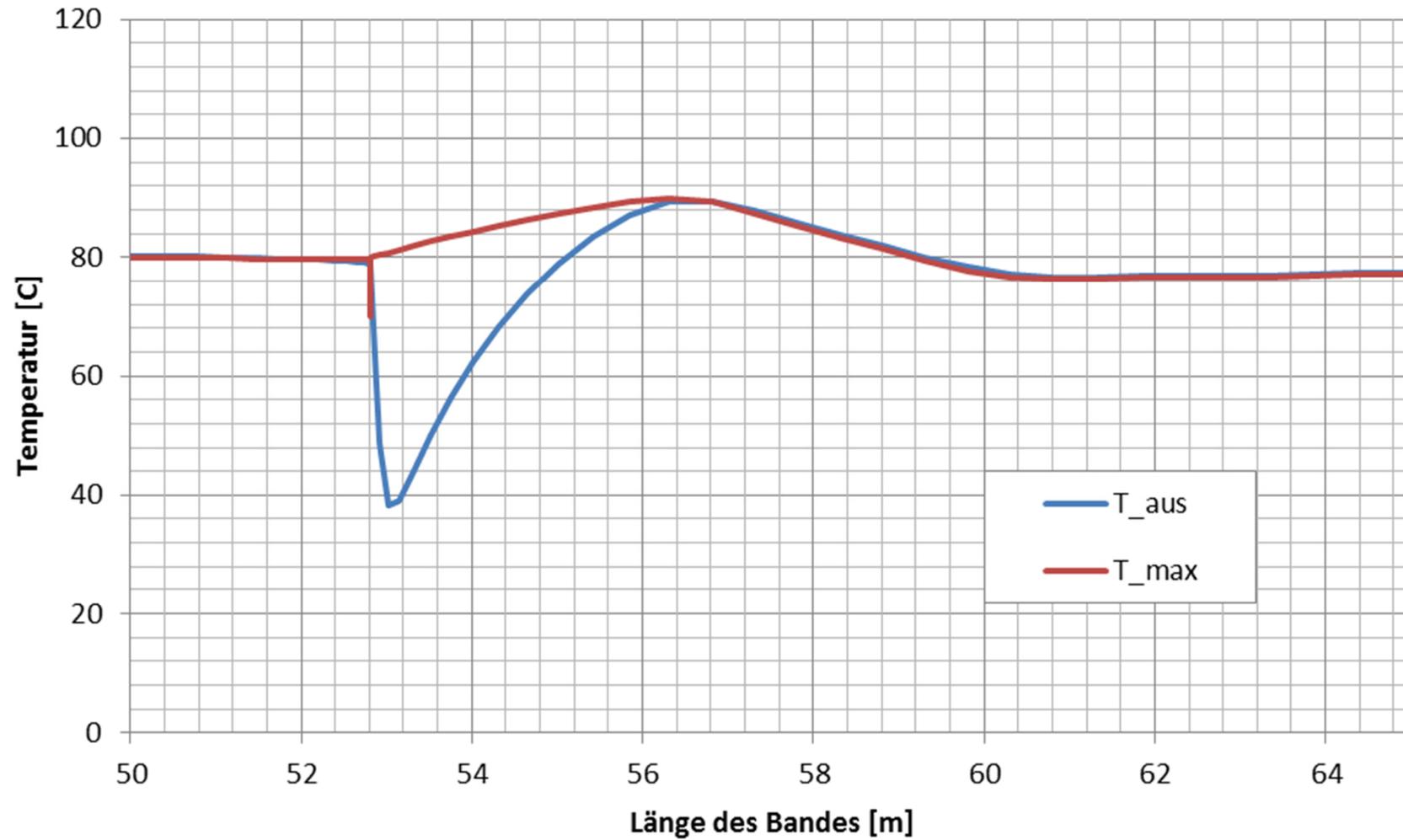
# Brennerleistung und Frischluft



# Bandtemperatur im Ofen zu verschiedenen Zeitpunkten



# Austrittstemperatur entlang der Bandlänge



# Fazit & Ausblick

---



- **Kontinuierliche Qualitätskontrolle durch virtuellen Sensor**
- **Temperaturprofil des gesamten Bandes bekannt und zu weiteren Verarbeitung in geeigneter Form verfügbar („Industrie 4.0 ready“)**
- **Im Rahmen der Vernetzung (Industrie 4.0) kann die modellbasierte Regelung im Vorhinein auf Geschwindigkeitsänderungen reagieren.**
  - **Temperatur kann unter Ausnutzung der Freiheit bei der Wahl der Ventilator Drehzahl angepasst werden.**
  - **Temperatur reagiert nur träge, Ventilatoren lassen sich schnell ansteuern.**
- **Verteilung der Frischluft und Regelverhalten noch zu optimieren**

# Kontakt



Dipl. Ing.

**Simon Künne**

Forschung und Entwicklung | Thermoprozessanlagen

R&D Manager | Thermoprocessing Plants

OTTO JUNKER GmbH

Jägerhausstr. 22 | 52152 Simmerath-Lammersdorf | Germany

Telefon: +49 2473 601 304 E-Mail: [ksi@otto-junker.de](mailto:ksi@otto-junker.de)

Telefax: +49 2473 601 670 Web: [www.otto-junker.de](http://www.otto-junker.de)