

Erstellung einer Prozessregelung zur Optimierung des Temperaturverlaufs bei der Schnellabkühlung von Präzisionsband

Nico Rademacher, Dominik Büschgens, Moritz Eickhoff, Herbert Pfeifer – IOB, RWTH Aachen University
Christian Kühnert, Thomas Bernard – Fraunhofer IOSB, Karlsruhe

Vergütung von Präzisionsbändern ($t < 0,25$ mm)

- steigende Nachfrage nach dünnen Präzisionsbändern
 - Herausforderung an Prozessstabilität
 - Erzielung der Produktqualitäten (z.B. Ebenheit, Oberfläche)
 - Prozessparameter für jedes Coil unterschiedlicher Abmessungen individuell
- martensitisches Abschrecken von Präzisionsbändern kritisch
 - Ebenheit beeinflusst
 - Phasenumwandlung (Festigkeitserhöhung + Volumenvergrößerung)
 - Temperaturgradienten
 - Temperatur über Bandbreite nicht kontrolliert
 - Dehnungsunterschiede beim Abschrecken
 - Ebenheitsfehler
 - Rand- und Mittenwellen

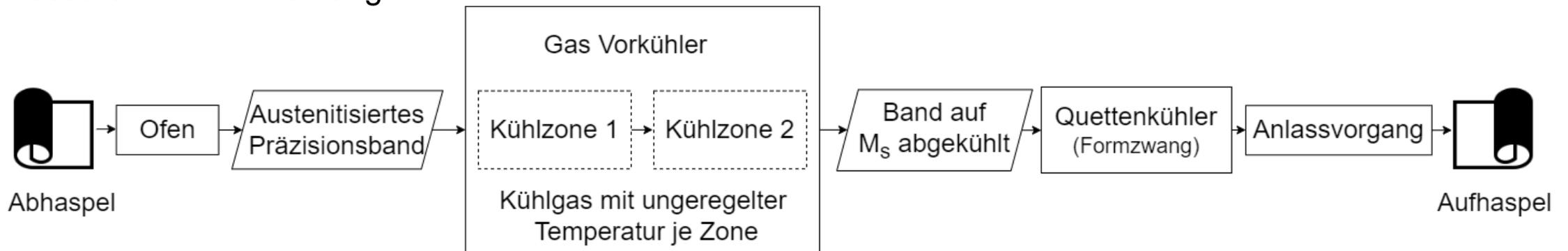
Produktbeispiel
Schersfolie für
Rasierklingen



Vergütung von Präzisionsbändern ($t < 0,25 \text{ mm}$)

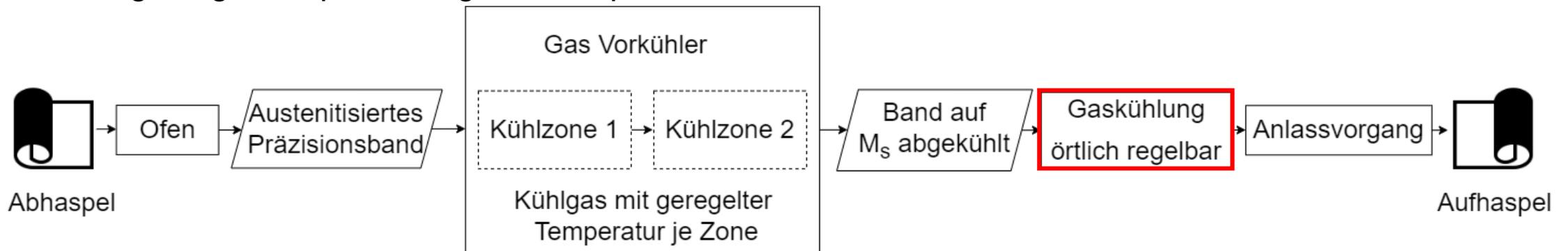
State of the Art - Anlagentechnik

- Austenitisierungsofen
- Gas - und mechanische Kühlung zum Abschrecken des Stahls (Martensitumwandlung)
 - unregelmäßige (Zonen-) Gaskühlung mit H_2 oder H_2/N_2 – Gemisch
 - Vorkühlung auf M_s
 - mechanischer Quettenkühlung
 - martensitische Umwandlung mit Wasser gekühlten Platten (Kontakt mit Bandoberfläche)
 - „Kontrolle“ der Ebenheit durch Krafteinwirkung & Formzwang
- Anlassofen mit Endkühlung



Entwicklung neuartiger Anlagentechnik

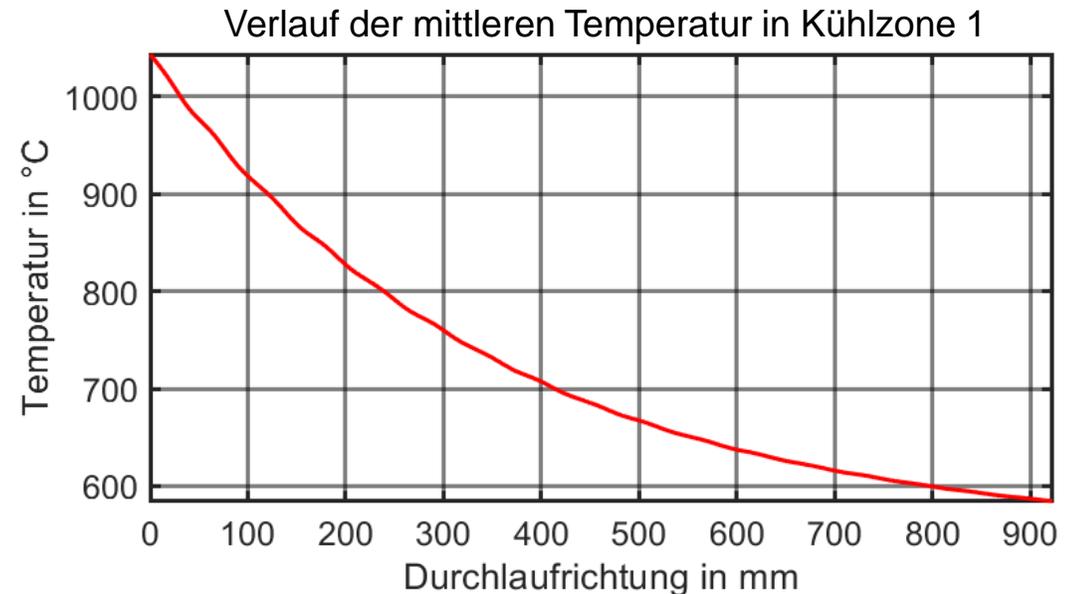
- Homogenisierung der Temperaturverteilung innerhalb der Gas-Vorkühlung
 - zwei Kühlzonen mit Prozessregelung (Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit regelbar)
 - Homogenisierung der Temperatur vor Martensitumwandlung
- Örtlich regelbare, berührungslose Gaskühlung statt Quettenkühlung
 - gezielte Einstellung von Temperaturgradienten über Bandbreite während Martensitumwandlung
 - Lokal einstellbare Abkühlung
 - ausgelegt durch Versuche & Simulationen
- Prozessregelung zur Optimierung des Temperaturverlaufes



Temperaturmodell zur Berechnung des Temperaturverlauf in der Gaskühlstrecke

Finite-Differenzen-Modell (Entwicklung IOB)

- Grundlage der Prozessregelung
- Abkühlverlauf über Bandbreite in jeweiligen Kühlzonen
 - Temperaturverteilung über Bandbreite und Durchlaufrichtung zu jedem Zeitpunkt in der Anlage
 - Rechnung für Zonen einzeln oder kombiniert
- Randbedingungen
 - Temperaturverlauf nach dem Austenitisieren (über Bandbreite)
 - Wärmeübergangsverteilung (experimentelle Messungen)
 - Düsensystem Vorkühler
 - örtlich regelbarer Kühler
- Vergleich mit kommerzieller Software (COMSOL Multiphysics®)



Modellparameter:

- Bandbreite und -dicke
- Materialdaten
- Bandgeschwindigkeit
- Kühlgastemperaturen in Zonen
- Düsenaustrittsgeschwindigkeit Gas

Erstellung einer Prozesssteuerung der Kühlstrecke

Optimierung mittels Versuchen am FD-Simulationsmodell

- Prozesssteuerung auf Basis des FD-Modells
- Zwei Optimierungsziele im Prozess:

– Band nach Kühlzone 2 bei $\bar{T}_{ABS}^{MIN} = 350 \text{ °C} > M_S$

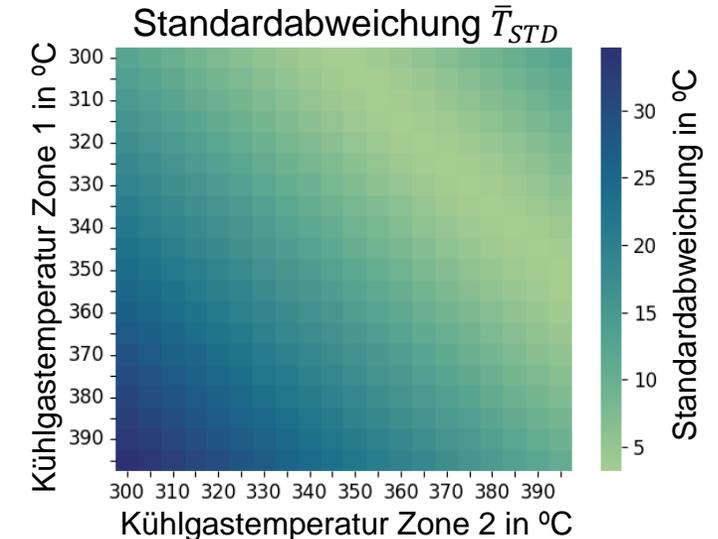
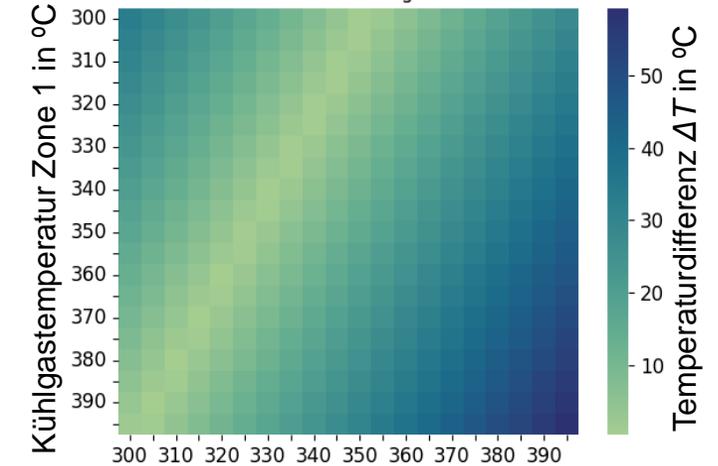
$$\bar{T}_{ABS}^{MIN} = \min |\bar{T} - 350\text{°C}| \text{ für } \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_k$$

– Geringe Temperaturdifferenz (Standardabweichung) \bar{T}_{STD}^{MIN} über Bandbreite nach Kühlzone 2

$$\bar{T}_{STD}^{MIN} = \min \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (T_k - \bar{T})^2}$$

- Gesteuert über Kühlgastemperaturen
 - Bandparameter & Kühlgeschwindigkeiten vorgegeben

Absolutfehler \bar{T}_{ABS} | Mittlere Temperatur Zone 2 – 350 °C |

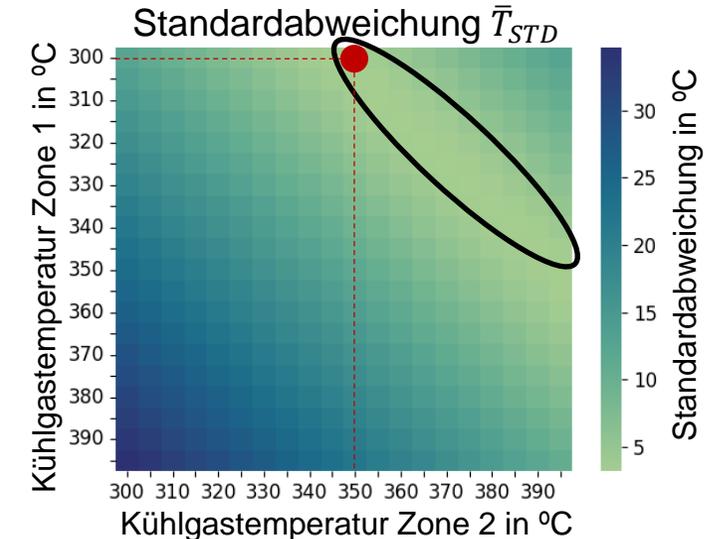
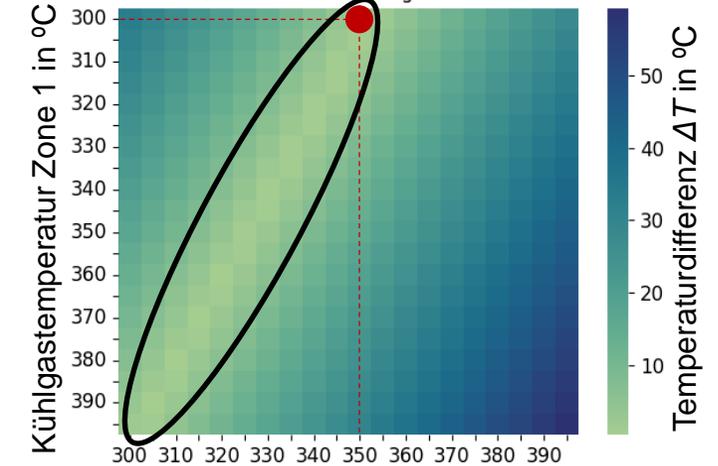


Erstellung einer Prozesssteuerung der Kühlstrecke

Optimierung mittels Versuchen am FD-Simulationsmodell

- Untersuchung zweier Szenarien:
 - starkes Kühlen einer Zone
 - gleichmäßiges Kühlen über beide Zonen
 - Gastemperatur $T_{Gas, Zone} = 300 \text{ °C} - 400 \text{ °C}$
- Optimum mit geringstem Absolutfehler \bar{T}_{ABS} und geringster Standardabweichung \bar{T}_{STD} :
 - Kühlgas Zone 1: $T_{Z1} = 300 \text{ °C}$
 - Kühlgas Zone 2: $T_{Z2} = 350 \text{ °C}$
- Band wird in Zone 1 stark abgekühlt und in Zone 2 stabilisiert
 - kein Unterschreiten von M_s
 - Temperatur über Bandbreite homogenisiert nach Zone 2 vor Martensitumwandlung

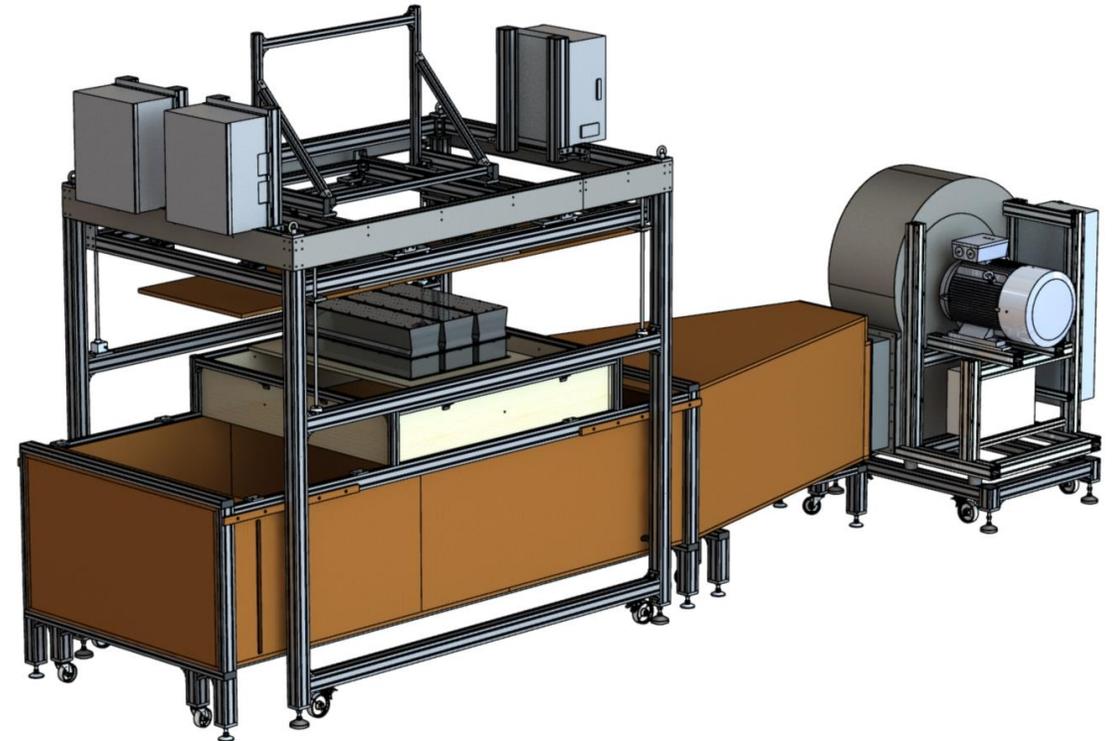
Absolutfehler \bar{T}_{ABS} | Mittlere Temperatur Zone 2 – 350 °C |



Prüfstand zur Entwicklung einer regelbaren, berührungslosen Gaskühlung

alter Prüfstand am IOB

- Experimentelle Messung der Temperatur- und Wärmeübergangsverteilung un geregelter Düsensysteme
- Messung Düsenfeld Vorkühler
 - Ergebnisse im FD – Modell verwendet
- Umbau zur Untersuchung von regelbaren Düsenanordnungen



Prüfstand zur Entwicklung einer regelbaren, berührungslosen Gaskühlung

Neuer Prüfstand zur Regelung der Temperaturverteilung

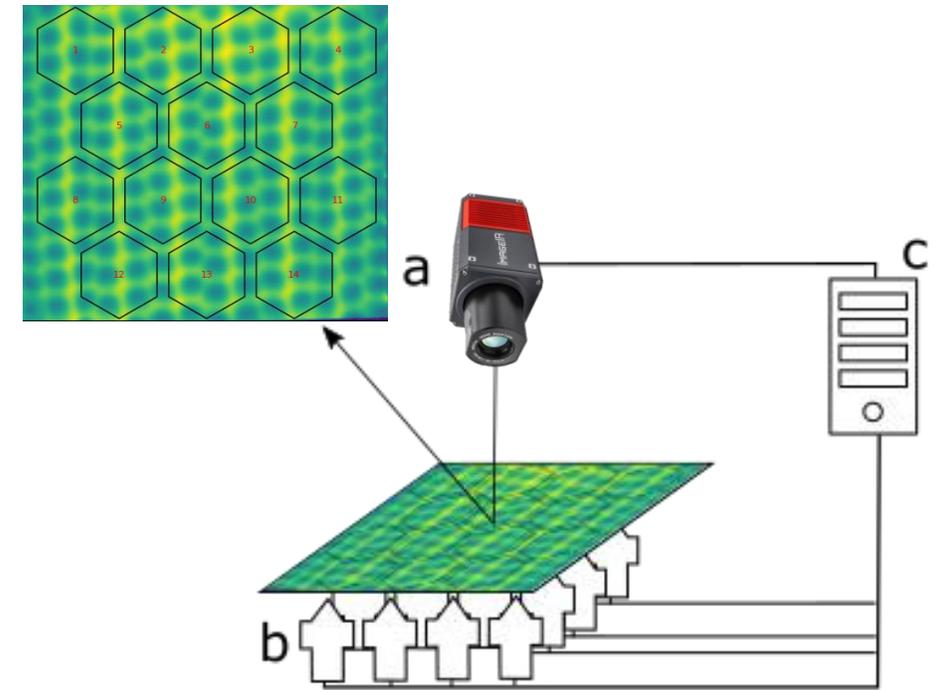
- Regelbares Düsenfeld (in 15 Zonen aufgeteilt)
 - Volumenstromregelung ($V_{\max} = 1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pro Zone)
 - Prozessregelung integriert
- Industrieventilator
 - max. Druckerhöhung: 22.800 Pa
 - max. Volumenstrom: 15.000 m³/h
- Umfangreiche Messtechnik
 - Gesamt-Volumenstrommessung
 - Temperaturmessung
 - Druckmessung
- Experimentelle Messung un geregelter und regelbarer Düsensysteme
 - PIV-Integration



Regelung der Temperaturverteilung mittels Prüfstand

Ziel: Beeinflussung der Temperaturverteilung

- Temperaturverteilung am Band gezielt regelbar
 - Abkühlung lokal einstellen z.B. geringere Kühlung der Bandkanten
- Auswahl relevanter Bereiche der Temperaturverteilung
 - Temperatur Ist-Werte und Volumenstrom als Regelgröße
- Prozessregler steuert Ventile & Düsen des Bereiches an
 - Volumenstrom einstellbar über Stellventile
 - Düsenaustrittsgeschwindigkeit und äquivalent konv. Wärmeübergang im jeweiligen Bereich steuerbar
- Aufnahme von konvektiven Wärmeübergangsverteilungen
 - örtlich unabhängige konvektive Wärmeübergänge einstellbar
 - Verwendung in FD-Modell (Berechnung des Abkühlverhaltens in Anlage)
 - Temperaturverteilung für Verformungssimulationen

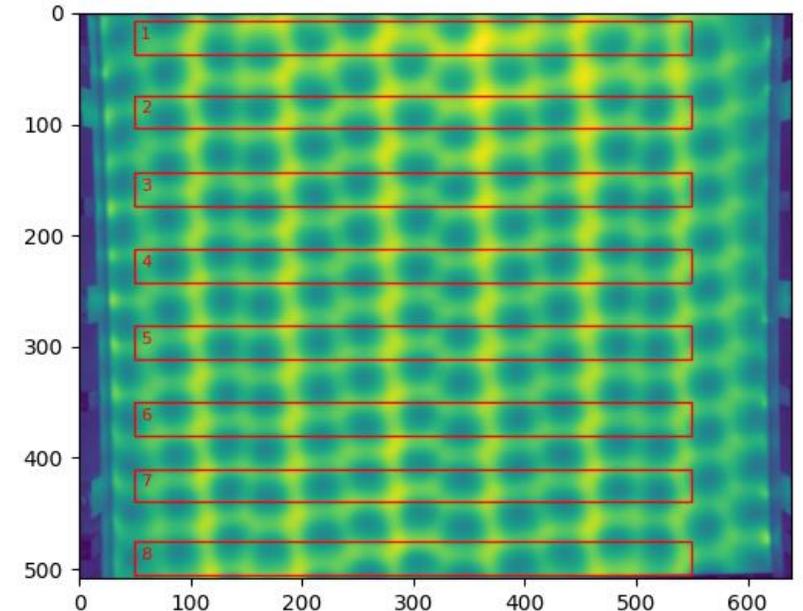


Schema des Versuchsaufbaus mit (a) Thermokamera, (b) erhitztem Metallband und steuerbarem Düsenfeld und (c) Computer mit Regelungssoftware

Identifikation des dynamischen Verhaltens

Sprungversuche zur Systemidentifikation

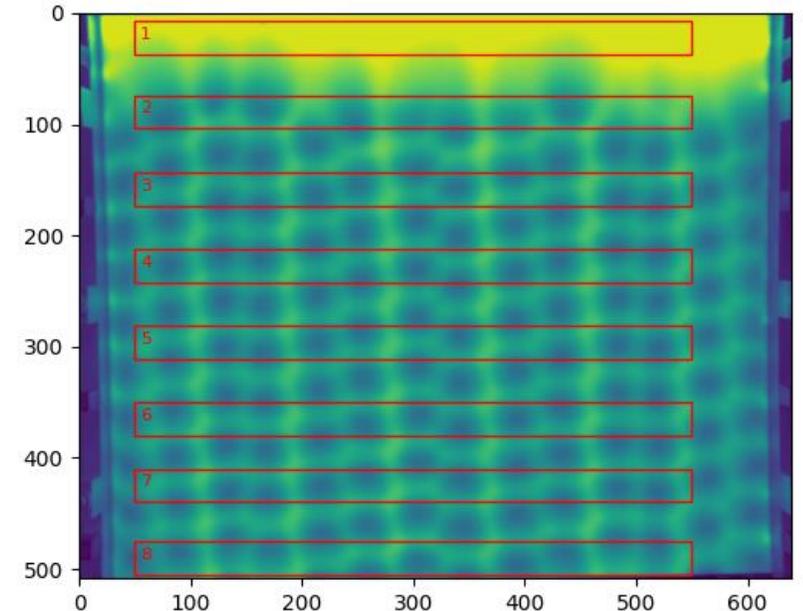
- Messung des Temperaturverhaltens über Bandbreite
 - bei ungeregeltem Düsenfeld
 - Definition von rechteckigen Bereichen im Kamerabild
 - Berechnung der mittleren Temperaturen in Rechtecken
- Abdeckung der äußeren Bandkante
 - Simulation vom abruptem Abschalten der Kühlung an einer Bandkante
 - Wechsel des Arbeitspunkt (Erwärmung an Kante)
 - Identifikation des Regelverhaltens anhand Sprungantwort des Systems
 - Informationen über dynamische Eigenschaften
 - Erstellung eines mathematischen Modells der Regelstrecke



Identifikation des dynamischen Verhaltens

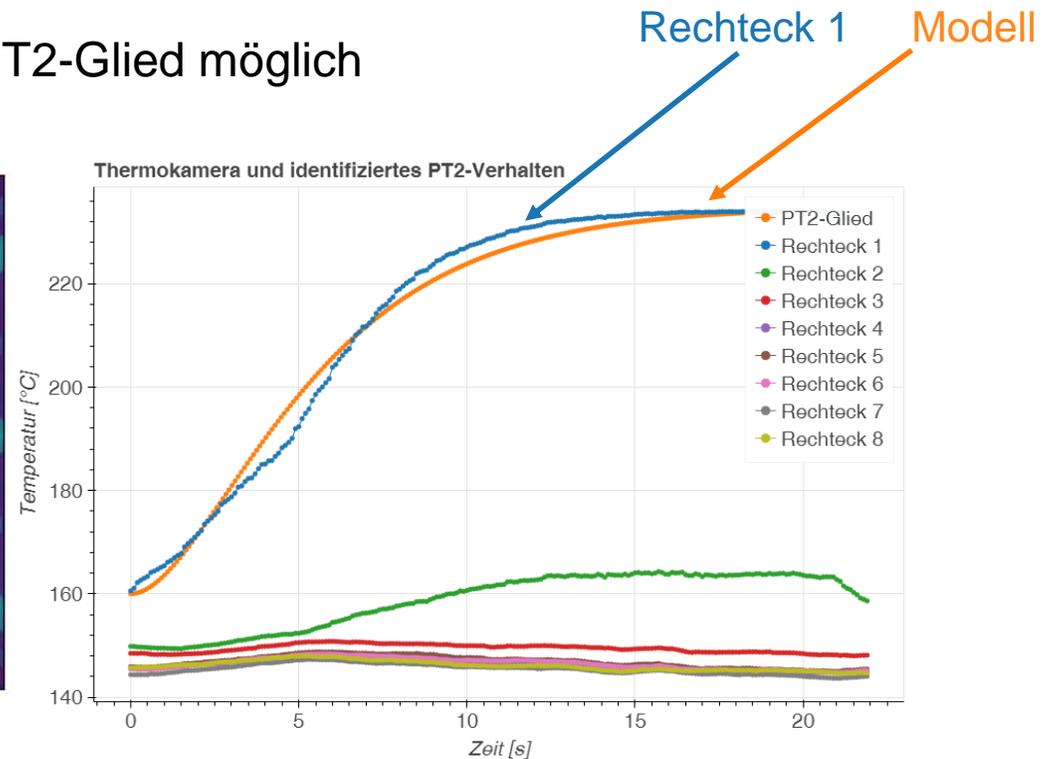
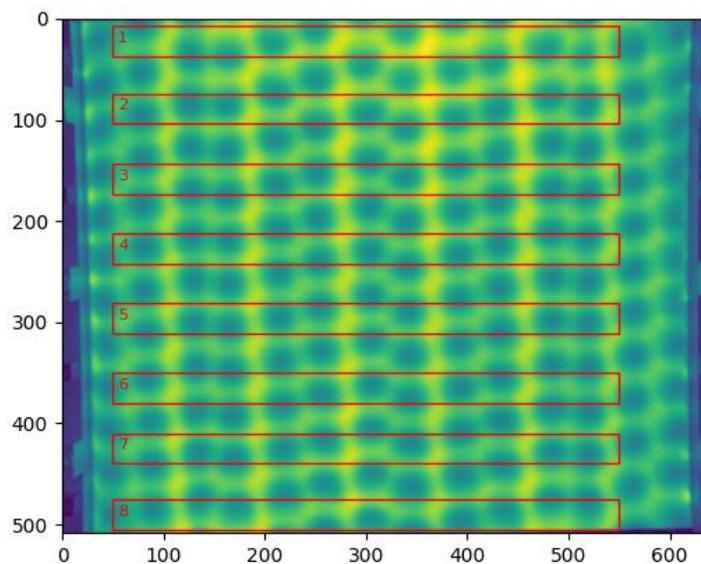
Sprungversuche zur Systemidentifikation

- Messung des Temperaturverhaltens über Bandbreite
 - bei ungeregeltem Düsenfeld
 - Definition von rechteckigen Bereichen im Kamerabild
 - Berechnung der mittleren Temperaturen in Rechtecken
- Abdeckung der äußeren Bandkante
 - Simulation vom abruptem Abschalten der Kühlung an einer Bandkante
 - Wechsel des Arbeitspunkt (Erwärmung an Kante)
 - Identifikation des Regelverhaltens anhand Sprungantwort des Systems
 - Informationen über dynamische Eigenschaften
 - Erstellung eines mathematischen Modells der Regelstrecke



Sprungversuche zur Systemidentifikation

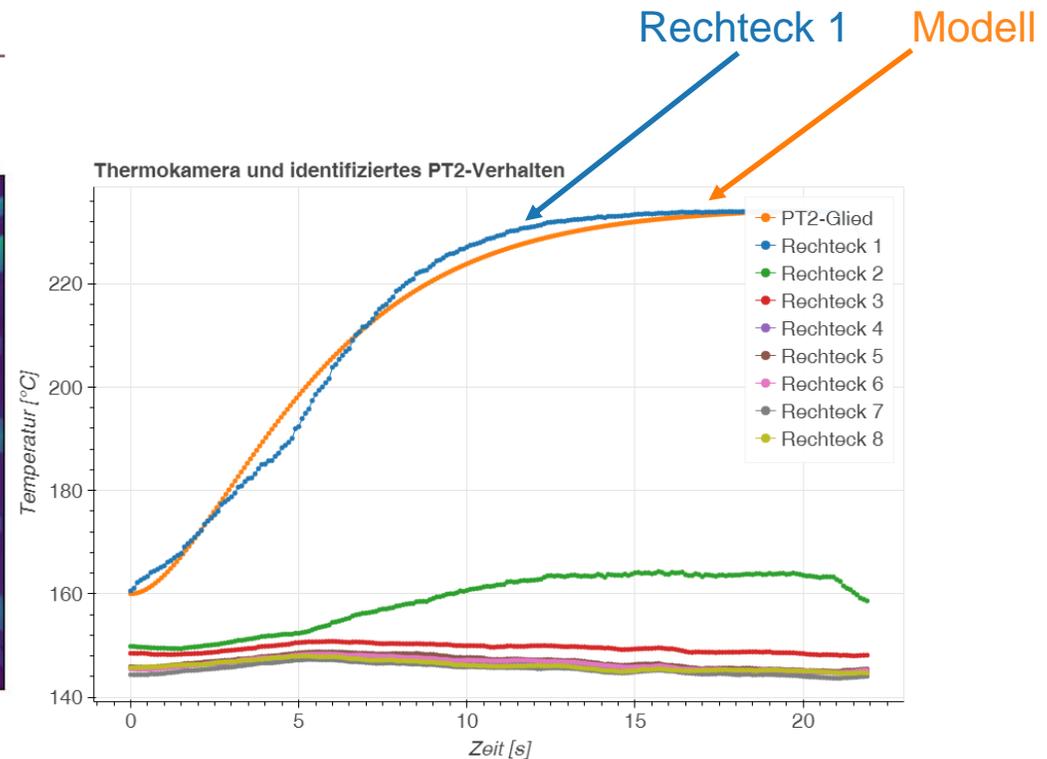
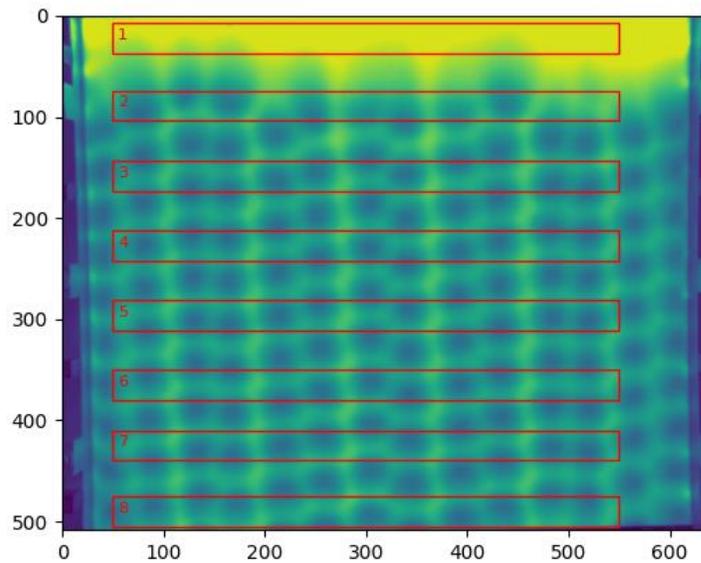
- Temperatur in Rechteck 1 und 2 erhöhen sich durch Abdeckung an Bandkante
 - Temperaturen beginnen zu schwanken und nähern sich neuem Arbeitspunkt an
- Annäherung des dynamischen Verhaltens über PT2-Glied möglich



Sprungversuche zur Systemidentifikation

- Übertragungsfunktion als Grundlage der Regelparameter:
 - mit Verstärkungsfaktor $k = 75$; Zeitkonstanten: $T_1 = 2,26 \text{ s}$, $T_2 = 3,62 \text{ s}$

$$G(s) = \frac{k}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} = \frac{75}{8,198 \text{ s}^2 + 5,885 \text{ s} + 1}$$



Zusammenfassung und Ausblick

- Berechnungsmodelle als Grundlage der Prozessregelung
 - Validierung mittels Referenzmodell
 - Verwendung für Prozessregelung
- Prüfstand zur Untersuchung einer individuell regelbaren Kühlzone
 - Aufbau und Test von regelbaren Kühlzonen
 - Definierung einer optimierten Düsenanordnung und Ansteuerung
 - Simulation von Bandverformung durch örtlich abhängige Temperatur- oder Wärmeübergangsverteilungen
 - Vorversuche mit Prozessregelung
 - Sprungversuche zur Systemidentifikation der Regelung
- Umsetzung an Produktionsanlage
 - regelbare Kühlzone konstruiert nach Versuchsergebnissen und Simulationen
 - ausgestattet mit umfangreicher Messtechnik
 - In-Line Bandtemperaturmessung (pyrometrisch)
 - In-Line Ebenheitsmessung
 - Regelung an Anlage getestet und durch künstliche Intelligenz optimiert

Vielen Dank Für Ihre Aufmerksamkeit

Nico Rademacher, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter – Industrieofentechnik

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik
RWTH Aachen University
Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen
www.iob.rwth-aachen.de
rademacher@iob.rwth-aachen.de
+49 241 80 25939