

## Prozessmodellierung des Drahtpatentierens im Hinblick auf die Abkühlung im Bleibad und dessen Alternativen

J. Hof, D. Büschgens, H. Pfeifer

18. Oktober 2023

**4. Aachener Ofenbau- und  
Thermoprozess-Kolloquium**  
17. und 18. Oktober 2023

**IOB**

Institut für  
Industriefenbau  
und Wärmetechnik

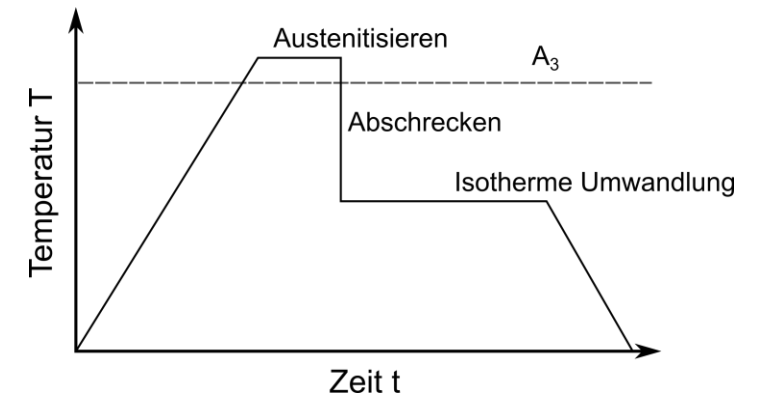
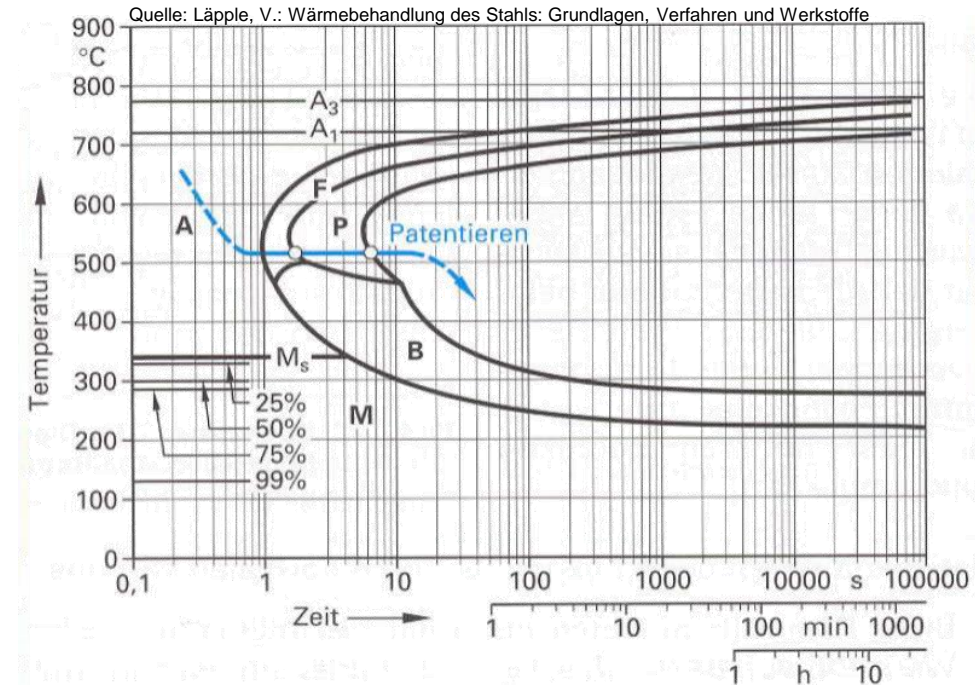
**RWTHAACHEN  
UNIVERSITY**

# Drahtpatentieren

## Prozessablauf

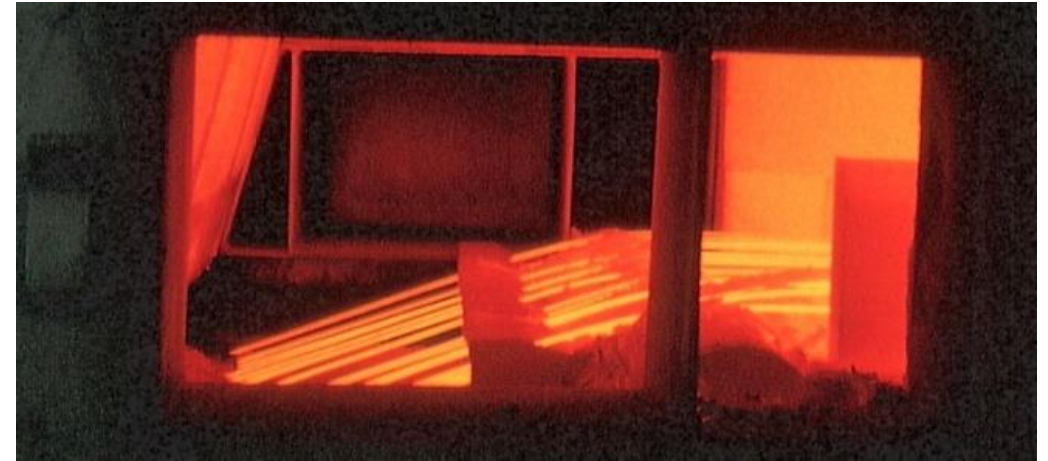
- Notwendiger Prozessschritt zur Herstellung von Produkten mit geringen Drahtdurchmessern
  - Seile bzw. Seilkerne
  - Federn
  - Reifencord
  - ...
- vorbereitende Wärmebehandlung bei der Weiterverarbeitung von Draht (Kaltziehen)
- Wesentliche Prozessschritte des Drahtpatentierens:
  - Erwärmung bzw. Austenitisierung
  - Abkühlung
  - isotherme Umwandlung

**Ziel:** feinlamellarer Perlit (Sorbit) – hohe Duktilität bei gleichzeitig hoher Festigkeit



## Stand der Technik

- Austenitisierung i.d.R. in offen beheizten Öfen
  - bis zu 30 Drähte unterschiedlicher Durchmesser parallel im gleichen Ofen
  - Steuergröße: Drahtgeschwindigkeit
  - Unterschiedliche Atmosphären zur Einstellung der Oxidation auf der Drahtoberfläche
- Anschließende Abkühlung und isotherme Umwandlung erfolgt im Bleibad
  - Hohe Abkühlrate
  - Umwandlungstemperatur für isotherme Haltephase sehr gut einstellbar
  - Abdeckung des Bleibads mit Kohle zur Verringerung der Wärmeverluste
  - Umgang mit Blei erfordert hohes Maß an Sicherheitsmaßnahmen



## Forschungsvorhaben

- Verwendung von Blei in Zukunft in Prozessumgebungen weiterhin möglich?
  - TRGS 505 in DE
  - REACH-Liste in EU
- Prozessalternativen für die Abkühlung und isotherme Umwandlung von Stahldraht im Bleibad?
  1. Evaluation des aktuellen Stands der Technik
    - Prozessmodell
    - Messungen an Anlagen
  2. Suche nach Prozessalternativen
    - Literaturrecherche
  3. Bewertung der vorhandenen Alternativen
    - Ökologische, technische, ökonomische Umsetzbarkeit und Vergleich zum Stand der Technik

Technische Regeln für Gefahrstoffe	Blei	TRGS 505
--	------	----------

Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung, wieder. Sie werden vom

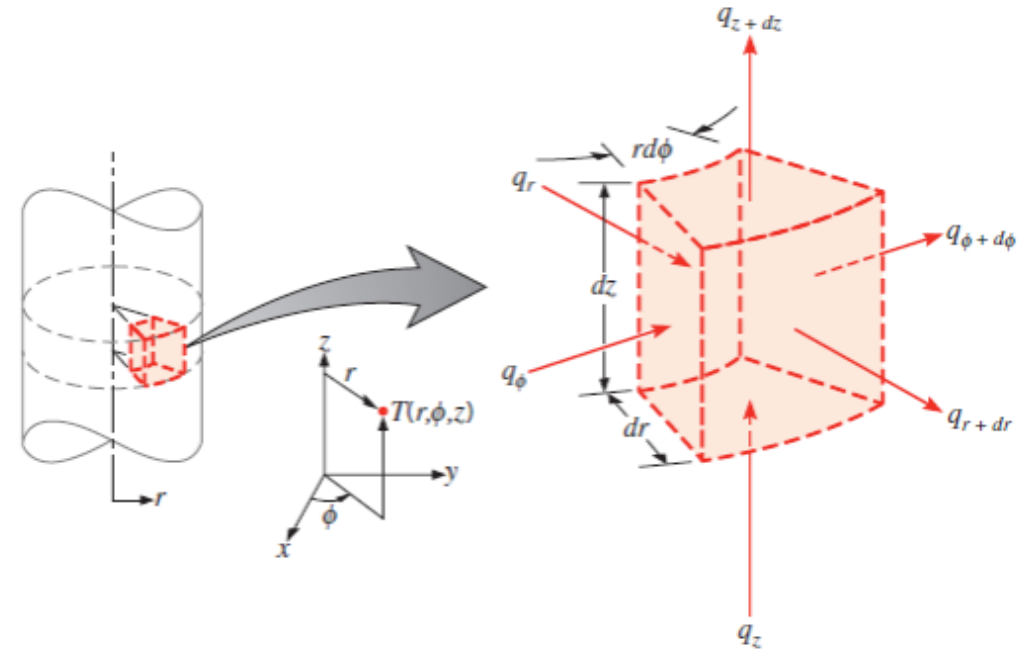
### Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS)

ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gegeben. Diese TRGS konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.



## Aufbau des Modells

- 2D Finite-Differenzen-Modell des Drahts
  - Radius und Durchlaufrichtung modelliert
  - Umfangsrichtung vernachlässigt
- Randbedingungen:
  - Symmetrie an Drahtanfang, -ende und -mitte
  - Wärmeübergang an der Außenseite des Drahtes
- Temperaturabhängige Stoffwerte verwendet
  - Unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte
- Zeitliche Diskretisierung mit Heun-Verfahren und adaptiver Zeitschrittweite umgesetzt



$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \cancel{\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right)} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Quelle: Bergmann et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer

## Erwärmung des Drahts im Ofen

- Bedingungen für die Wärmeübertragung an der Drahtaußenseite in Abhängigkeit der Drahtposition entlang der Anlage
- Konvektiver Wärmeübergang im Ofen in Abhängigkeit der Draht- und Strömungsgeschwindigkeit (Nu-Beziehungen, Ar-Zahl)
- Emissionsgrad aktuell mit festem Wert angenommen
- Zonenlänge und -temperatur entlang des Ofens variabel einstellbar

## Wärmeübergang im Bleibad

- Abkühlung im Bleibad ist entscheidender Prozessschritt zur finalen Einstellung des Gefüges
  - Korrekte Abbildung der aktuellen Bedingungen für späteren Vergleich der Prozessalternativen wichtig
- Im Modell aktuell mit Wärmeübergangskoeffizienten aus der Literatur hinterlegt
  - Quellen teilweise mehrere Jahrzehnte alt
- Experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangs im Bleibad notwendig
  - Versuchsaufbau zur Messung an industriellen Anlagen

Quelle: Lueg, W. ; Pomp, A.: Abkühlgeschwindigkeiten und Wärmeübergangszahlen beim Patentieren von Stahldraht in verschiedenen Kühlmitteln, 1941

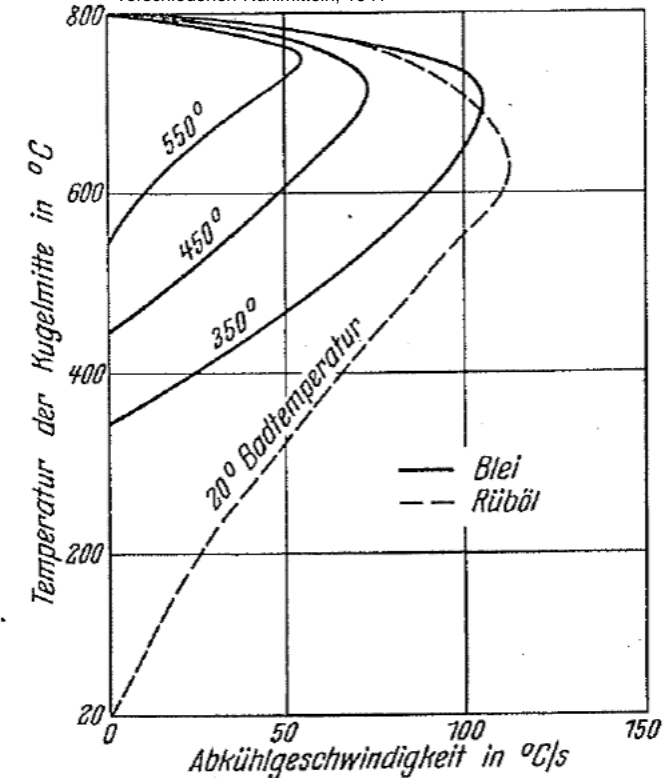
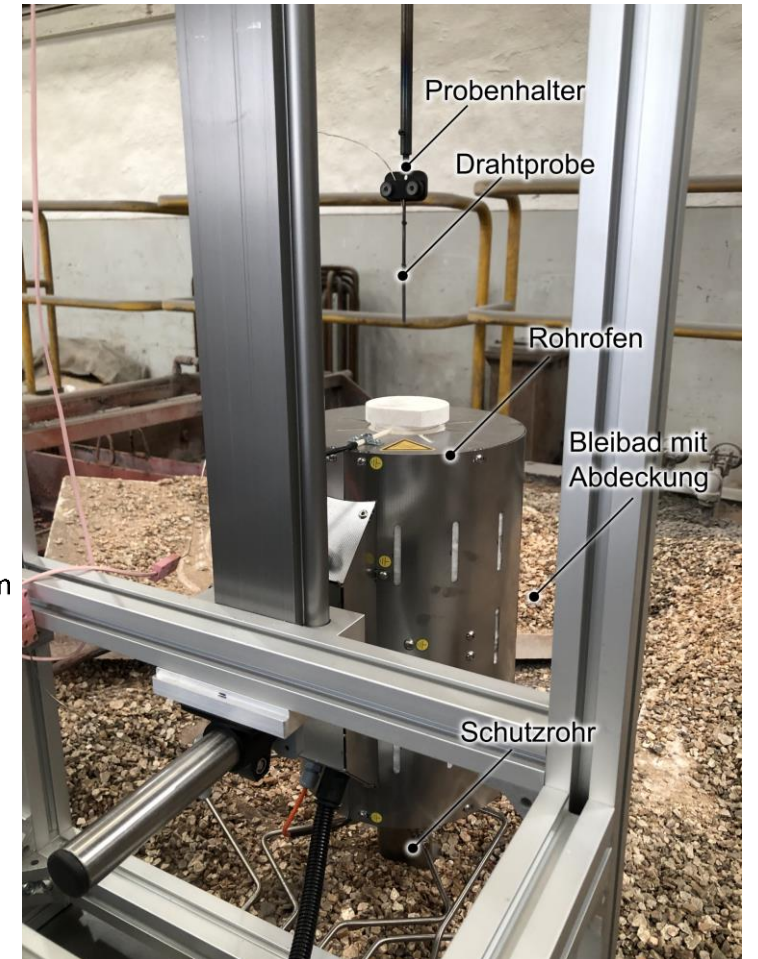
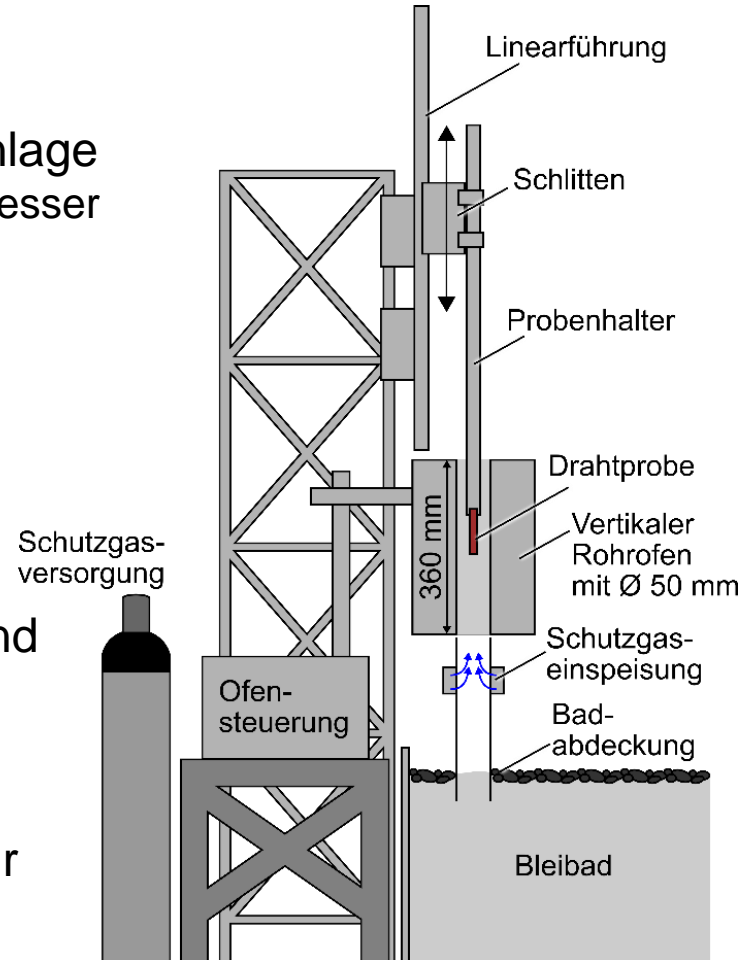


Bild 6. Abkühlvermögen von Blei bei 350, 450 und 550° Badtemperatur (12-mm-Stahlkugel, Anfangstemperatur 800°).

# Wärmeübergangskoeffizient

## Versuchsaufbau

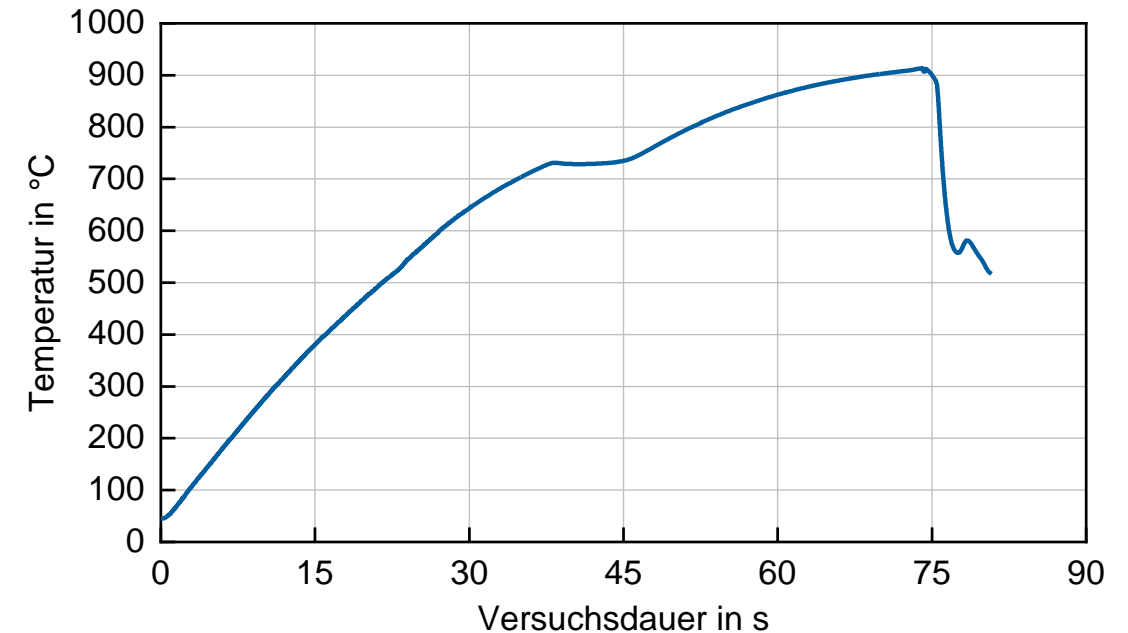
- Bestimmung des WÜK an industrieller Anlage
  - Unterschiedliche Stahlgüten und Durchmesser untersucht
- Erwärmung der Drahtproben in Rohrofen
- Anschließend Probentransport ins Bleibad über Linearführung mit Traverse
- Bestimmung der Drahttemperatur während des Versuchsdurchlaufs über Thermoelemente in Drahtmitte
- Schutzrohr und Schutzgaseinspeisung für definierte Atmosphäre





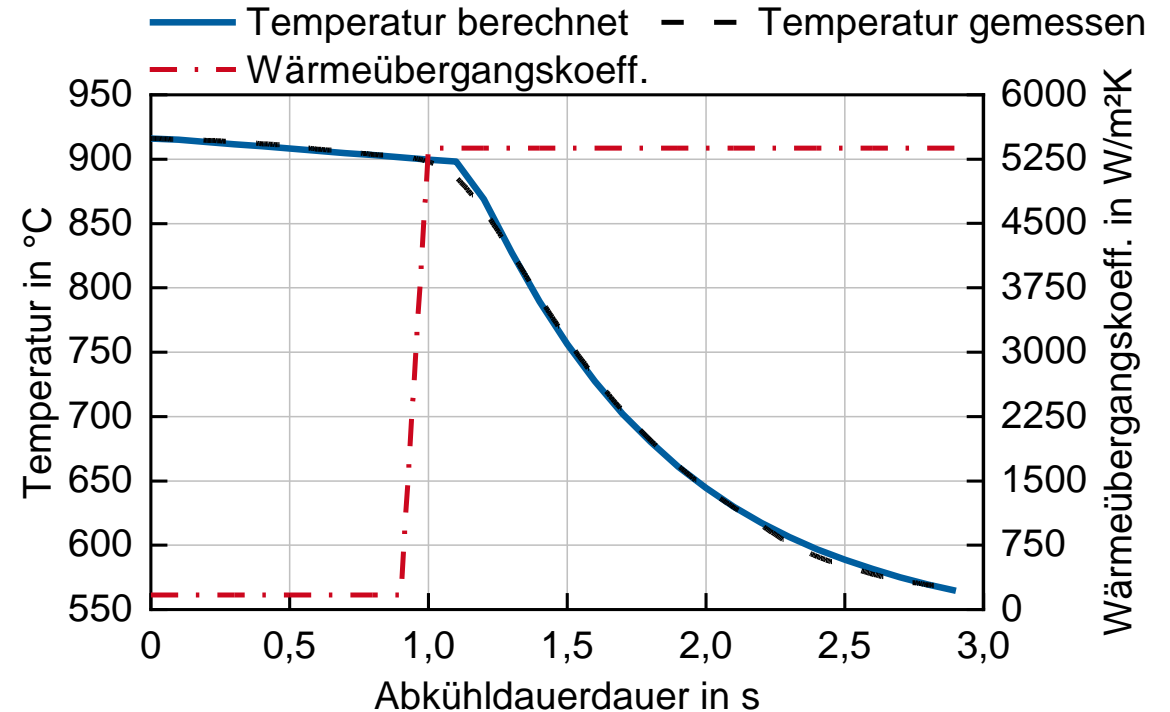
## Erste Messergebnisse

- Randbedingungen der Versuchsdurchführung:
  - Bleibadtemperatur: ~ 530 °C
  - Rohrofentemperatur : 1100 °C
  - Zieltemperatur vor Abkühlung: 910 °C
  - Eintauchgeschwindigkeit ins Bleibad: 222 mm/s
- Ausgeprägte Verzögerung bzw. Wiedererwärmung im Bereich der Gefügeumwandlungen
- Hohe Abkühlgeschwindigkeit bzw. hoher Wärmeübergangskoeffizient im Bleibad sichtbar



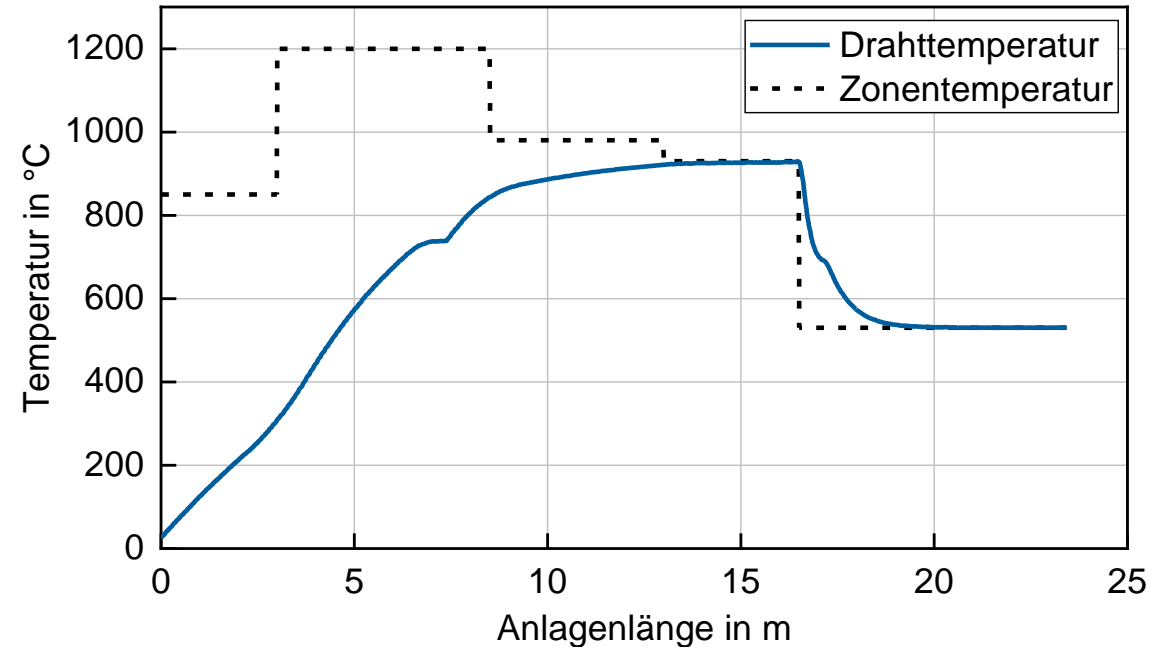
## Auswertung

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten im Bleibad über iterative Berechnung
  - Bleibadtemperatur während der Versuchsdurchführung gemessen
  - Berechnung der Temperatur im Drahtinneren durch Wärmeleitung (FD-Modell) mit initialem WÜK
  - Bestimmung der Abweichung und ggf. erneute Berechnung mit angepasstem Wärmeübergangskoeffizient
  - Wiederholung bis gemessene und berechnete Temperatur im Drahtinneren übereinstimmen
- Geringere Abkühlgeschwindigkeiten vor Eintauchen ins Bleibad
- Wärmeübergangskoeffizient von etwa 5400 W/m<sup>2</sup>K im Bleibad



## Anwendung

- Berechnung der Erwärmung von beliebigen Drahtdurchmessern im Ofen mit frei wählbaren Zonentemperaturen und -längen
- Temperaturabhängige Stoffdaten für 3 Stahlgüten (C50D, C70D, C88D) integriert
- Modell aktuell in Matlab umgesetzt
  - Rechenzeit knapp 70 s
  - Modell kann zur Vorberechnung oder zur Optimierung bestehender Prozesse verwendet werden



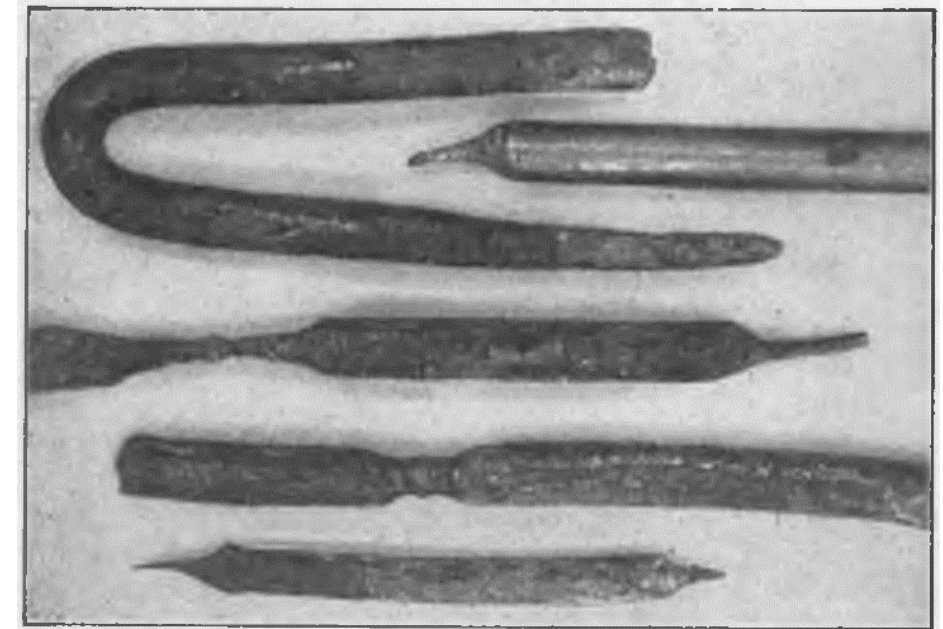
	Vorwärmzone	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Temperatur in °C	850	1200	980	930
Länge in m	3,0	5,5	4,5	3,5

## Anforderungen

- **Ökologische Aspekte**
  - Toxizität
  - Belastung der Umwelt durch Herstellung/Verwendung/Entsorgung
  
- **Ökonomische Aspekte**
  - Anschaffungs- und Betriebskosten
  - Umbau des Anlagenkonzepts
  - Wirtschaftsstandort Deutschland
  
- **Technische Aspekte**
  - Gefordertes Gefüge weiterhin einstellbar
  - Einbindung in vorhandene Infrastruktur
  - Umsetzung in der industriellen Praxis möglich

## Naheliegende Möglichkeiten

- Salzbadpatentieren:
  - Verwendung von Nitraten statt Blei zur Abkühlung
  - Vergleichbare Abkühlraten und Gefüge
  - Keine Veränderung des bisherigen Prozessablaufs notwendig
  - Korrosion von Draht und Wanne durch Salze
  - Zusammensetzung des Bades muss fortlaufend geprüft werden
- Wirbelschichtpatentieren:
  - Partikel in umgebender Strömung für bessere Wärmeübertragung
  - Konzepte umfassen zwei separate Wirbelbetten
    - Schnelle Abkühlung im ersten Wirbelbett
    - Haltephase und Umwandlung in zweitem Wirbelbett
  - Nur dünnere Abmessungen (< 6 mm) auf diese Weise patentierbar



Quelle: Wüstl, H.; Schwertner, F.: Verwendung von Nitratschmelzen beim Durchlaufpatentieren von Stahldraht für hochbeanspruchte Federdrähte, 1944

## Weitere Möglichkeiten

- Carboxymehtylcellulose:
  - Abkühlung mit wässriger Carboxymehtylcellulose (CMC) möglich
  - Nicht toxisch und biologisch abbaubar
  - Abkühlgeschwindigkeit nicht ausreichend für identisches Gefüge zur Bleipatentierung
- Sprühkühlung, Nebelkühlung, Wasserbad
  - Benötigte Abkühlraten potentiell erreichbar
  - Große prozesstechnische Herausforderungen
- Weitere Metallschmelzen
- ...?

## Zusammenfassung

- Prozessmodell zur Beschreibung der Drahterwärmung und Abkühlung beim Drahtpatentieren im Bleibad erstellt
- Experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten im Bleibad an industriellen Anlagen
- Ermittlung von Prozessalternativen

## Ausblick

- Weiterentwicklung des bestehenden Prozessmodells
- Weitere Messungen zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten
- Beurteilung und Empfehlung von Prozessalternativen

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

**Dr.-Ing. Jan Hof**

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik  
RWTH Aachen University  
Kopernikusstr. 10  
52074 Aachen

Tel.: +49 241 80 26069

E-Mail: [hof@iob.rwth-aachen.de](mailto:hof@iob.rwth-aachen.de)

Thinking the Future  
Zukunft denken



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages