

# Induktive Knüppelvorwärmung als eine Möglichkeit zur Bereitstellung von Regelenergie

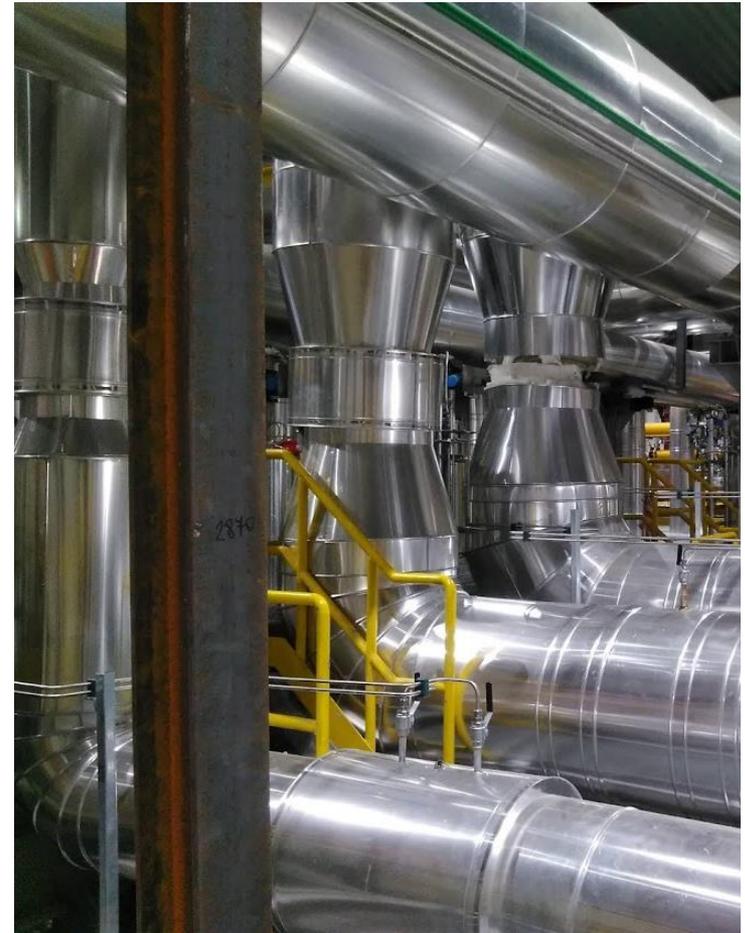


**Prof. Dr.-Ing. Marc Hölling**

**Dr.-Ing. Matthias Weng**

# Inhalt

- Motivation
- Induktive Vorwärmung:
  - Fuel Switch
  - Hybrid Heating
- Simulationsmodell
- Fallbeispiel ArcelorMittal Hamburg
- Power-to-Steel
- Zusammenfassung



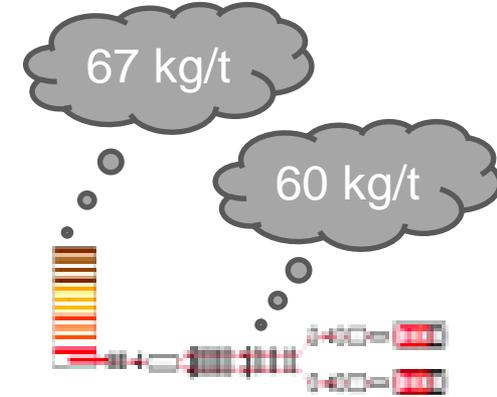
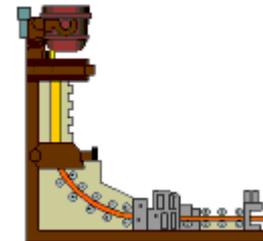
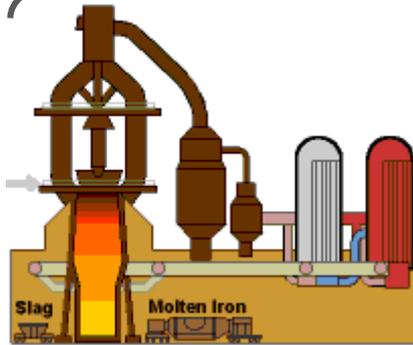
# Motivation

- Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa bis 2050 um mindestens 80 %
- Dekarbonisierung\* aller Industriezweige
- Große Herausforderungen für die dt. Stahlindustrie
  - ca. 57 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr
  - 7 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands
- Hauptanteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Erzreduktion (Koks im Hochofen und Erdgas in der Reduktionsanlage)

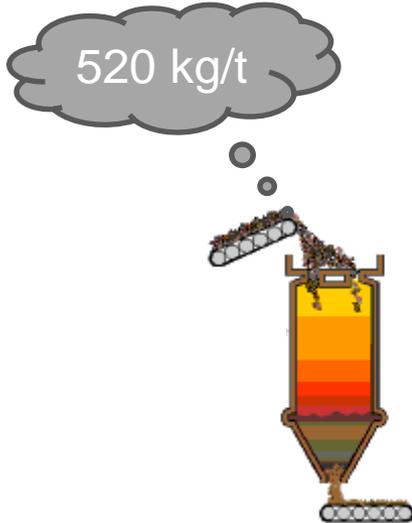
\*: oder Abschaffung !?!

# Herstellungsrouten 2019 (mit spez. CO<sub>2</sub>-Emiss.)

1.500 kg/t



520 kg/t

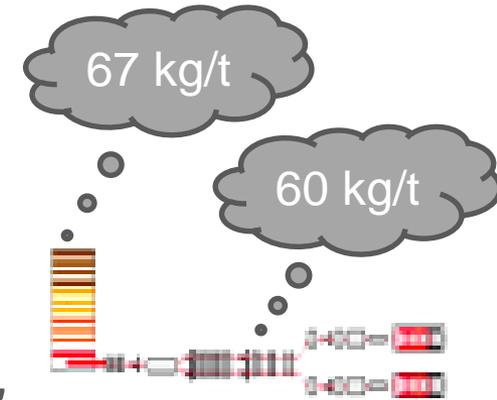
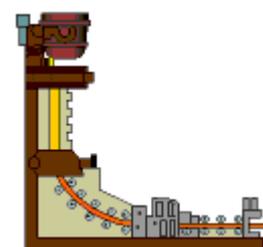
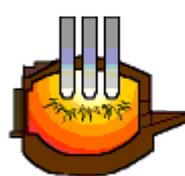


≈ 20 %

Schrott

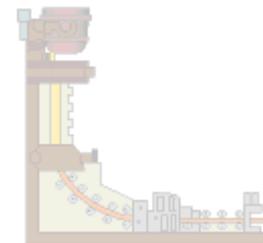
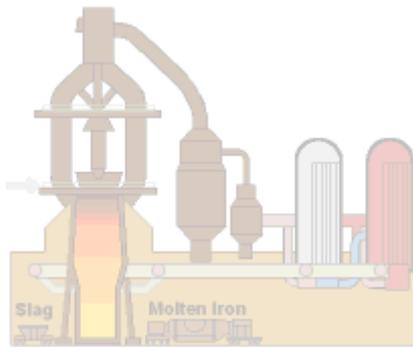


0...100 %



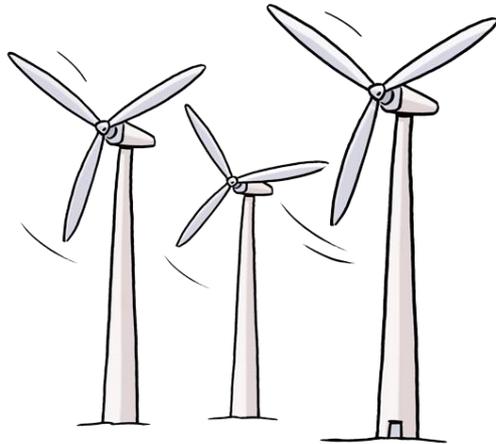
440 kg/t

Nach langem, schwerem Kampf...



- Klimaschutzziele sind mit Hochofen nicht zu erreichen  
→ Einsatz von Koks
- Keine Akzeptanz von CCS/CCU...

# Elektrostahl und Direktreduktion in 2050



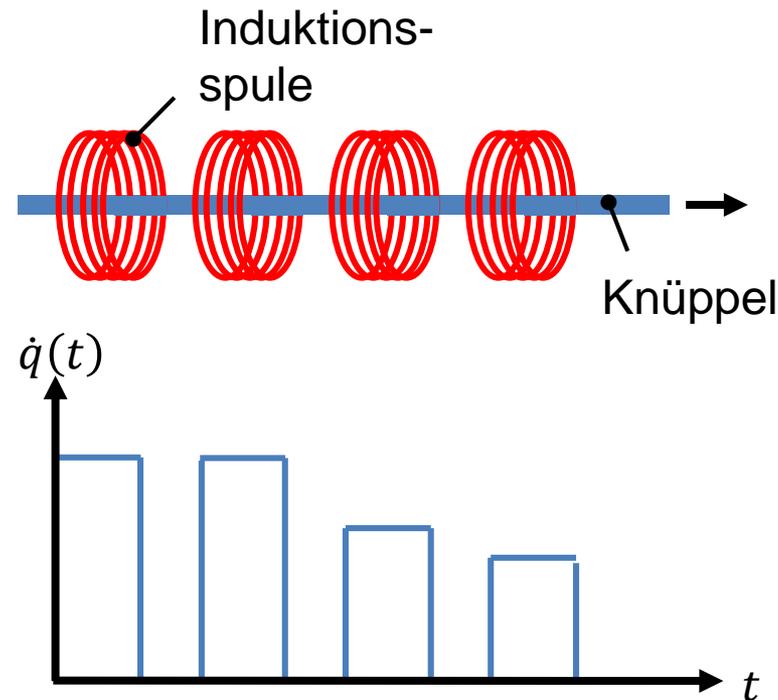
- Betrieb des E-Ofens mit 100% EE  
→ Energiewende!
- Reduktionsanlage mit **Windwasserstoff** statt Erdgas [1, 2]
- Vorwärmung über **Induktion**



# Induktive Vorwärmung

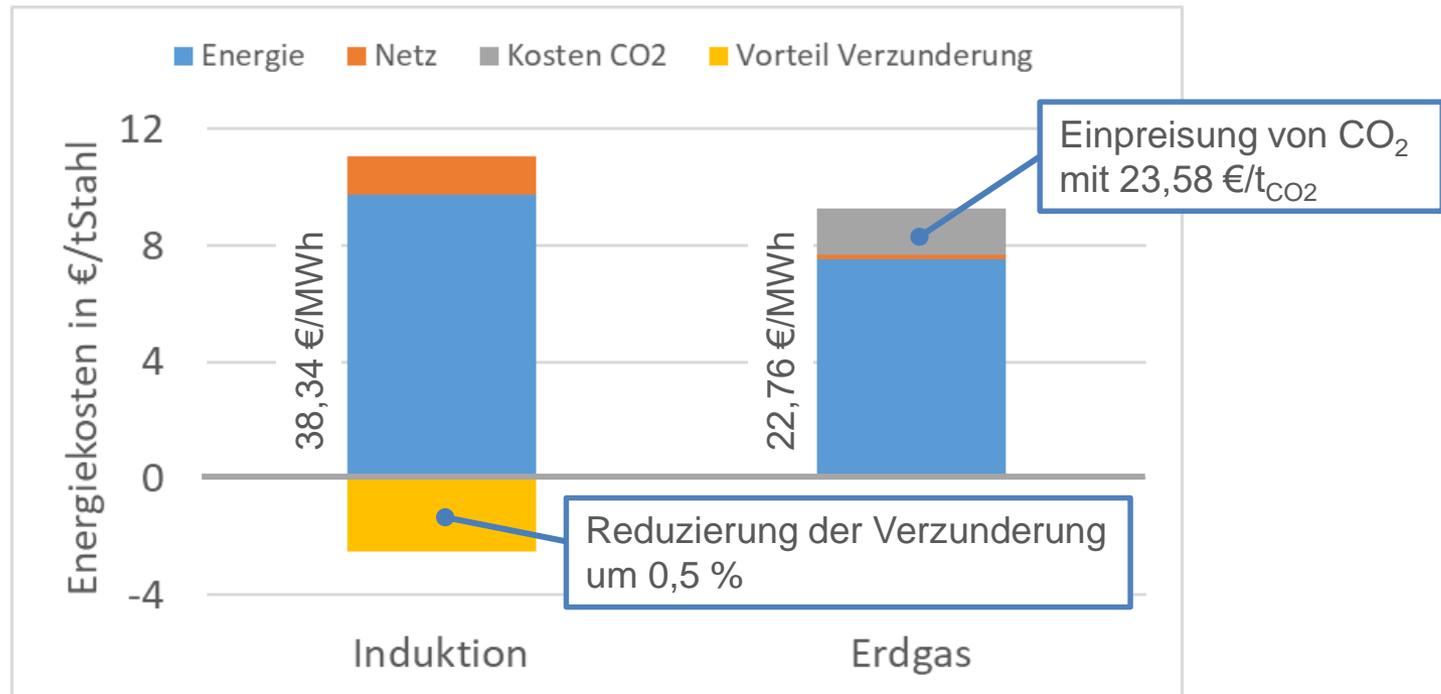


# Induktive Vorwärmung



- Erzeugen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern  
→ Wirbelströme im Bereich der Werkstoffoberfläche
- Ausgereifte Technik, meist für Heißeinsatz zwischen Gießanlage und Walzwerk [3]

# Induktive Vorwärmung: Fuel Switch?

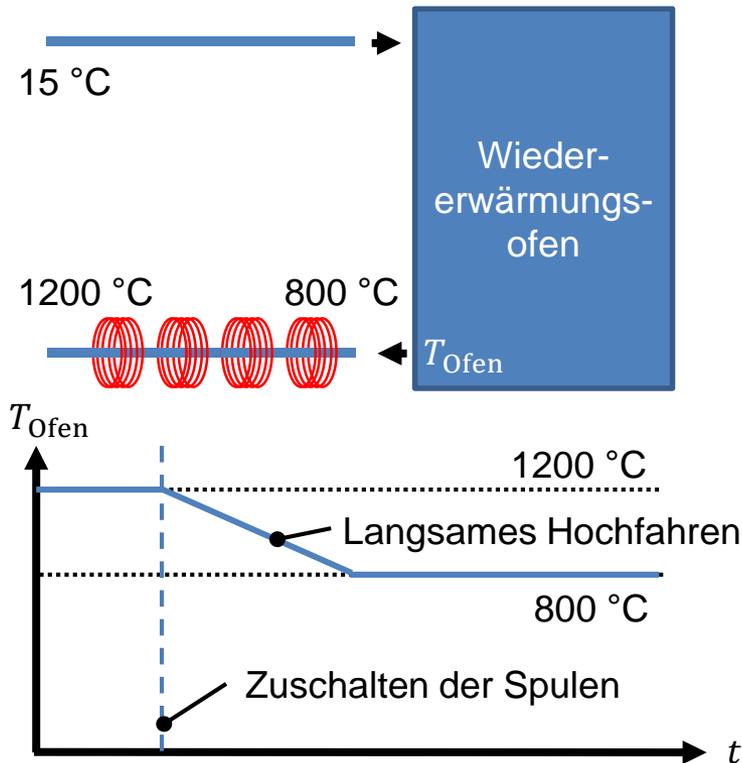


- Vergleich der Energiekosten\* für Induktion ( $\eta = 70\%$ ) und erdgasbasierte Wiedererwärmung ( $\eta = 68\%$ )
- Selbst bei Einpreisung von  $\text{CO}_2$  noch **kein Kostenvorteil für einen Fuel Switch...** (11,05 €/t<sub>Stahl</sub> vs. 9,25 €/t<sub>Stahl</sub>)

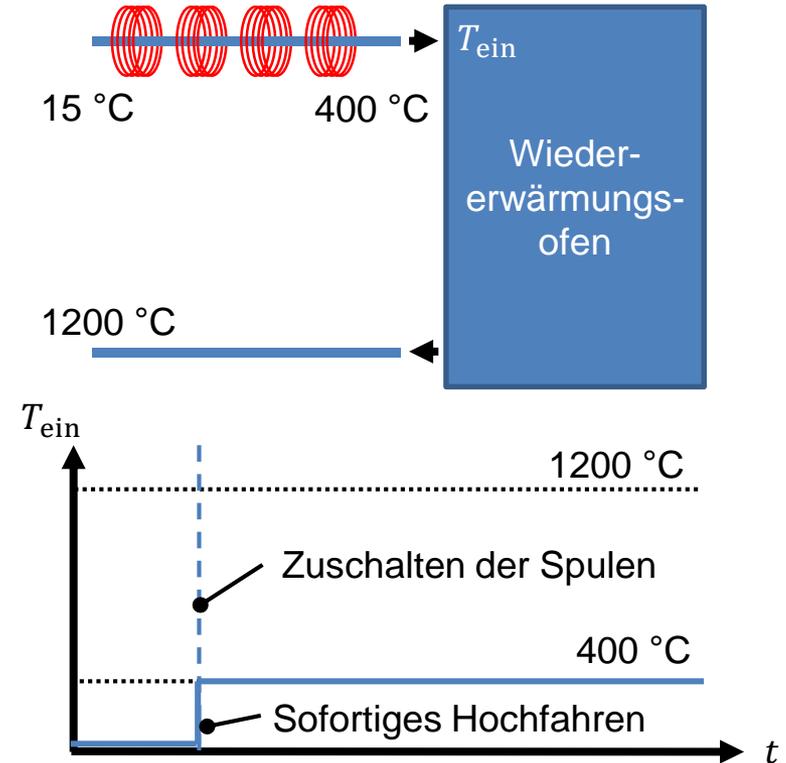
\* Kosten aus dem 1. Halbjahr 2019, Strombezug über EEX (Grau-Strom und kein Öko-Strom)

# Induktive Vorwärmung: Hybrid Heating

## Option 1: Induktionsspulen hinter Ofen



## Option 2: Induktionsspulen vor Ofen



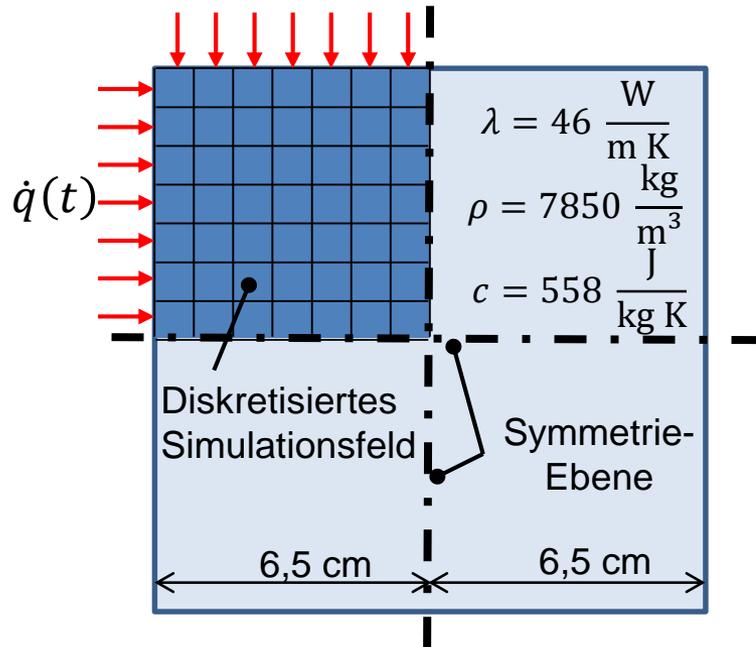
- **Hypothese:** Zukünftiger Bedarf an zuschaltbaren Lasten → Regelenergie, Intraday, Redispatch etc.
- Deutlicher Vorteil für **Option 2** mit Anordnung vor dem Ofen

# Simulationsmodell und Fallstudie

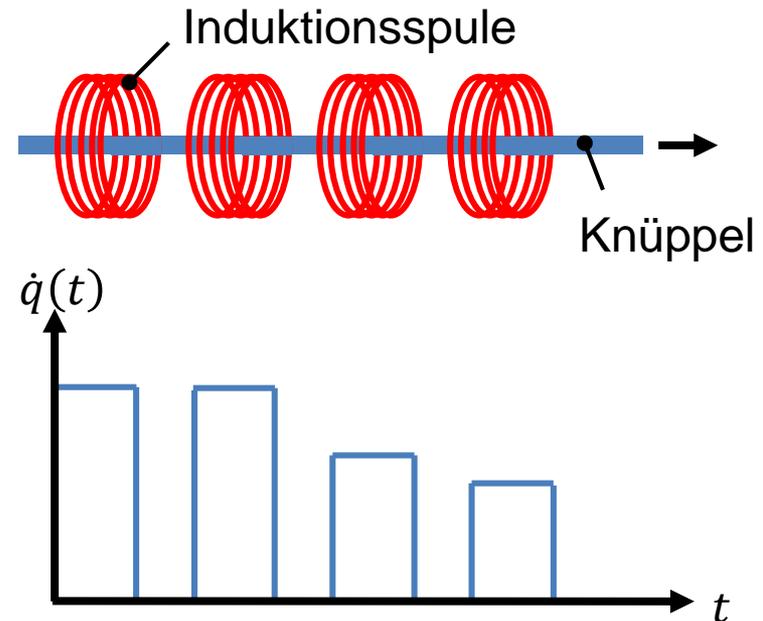


# Simulationsmodell

## Simulationsquerschnitt



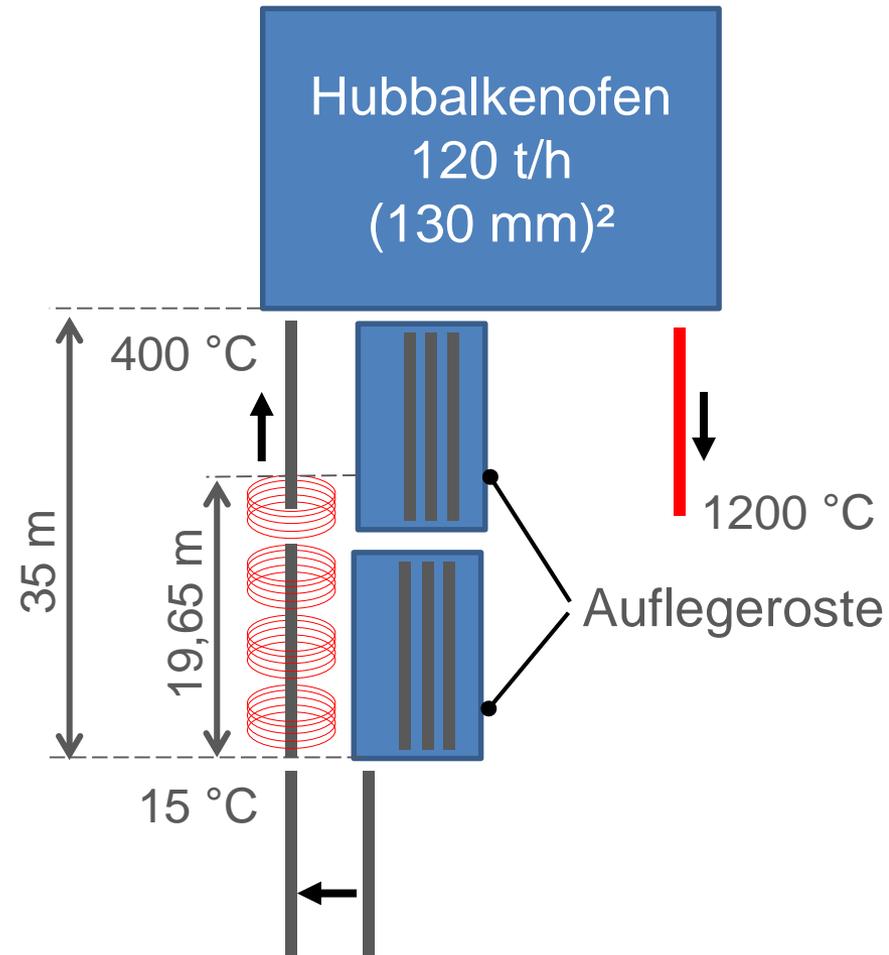
## Randbedingungen für Simulation

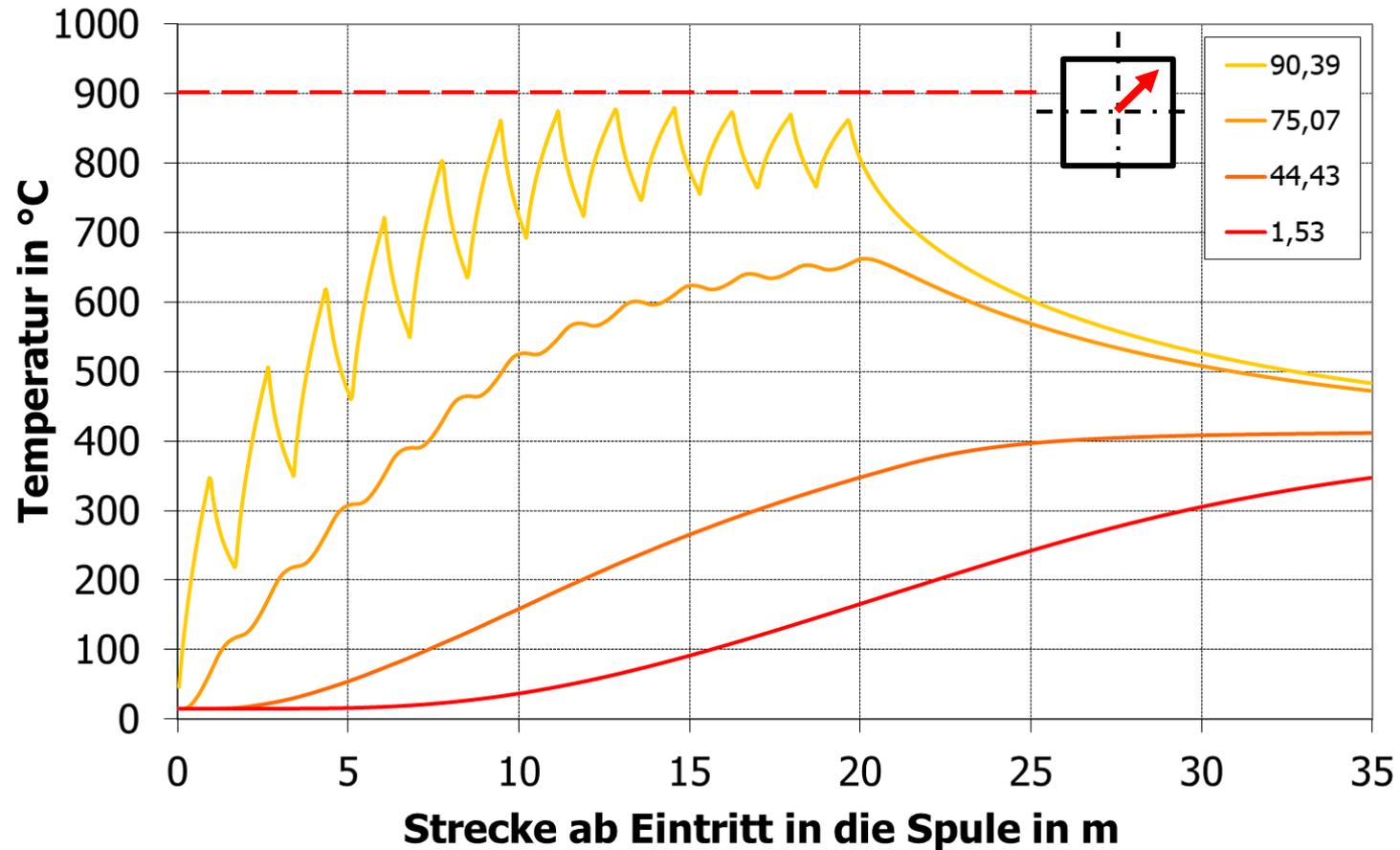


- Instationäre zweidimensionale Wärmeleitung
- Wärmeeintrag durch Induktion in äußerer Schicht
- Zeitlich veränderliche Randbedingungen  $\dot{q}(t)$  entsprechend der Position des Knüppels

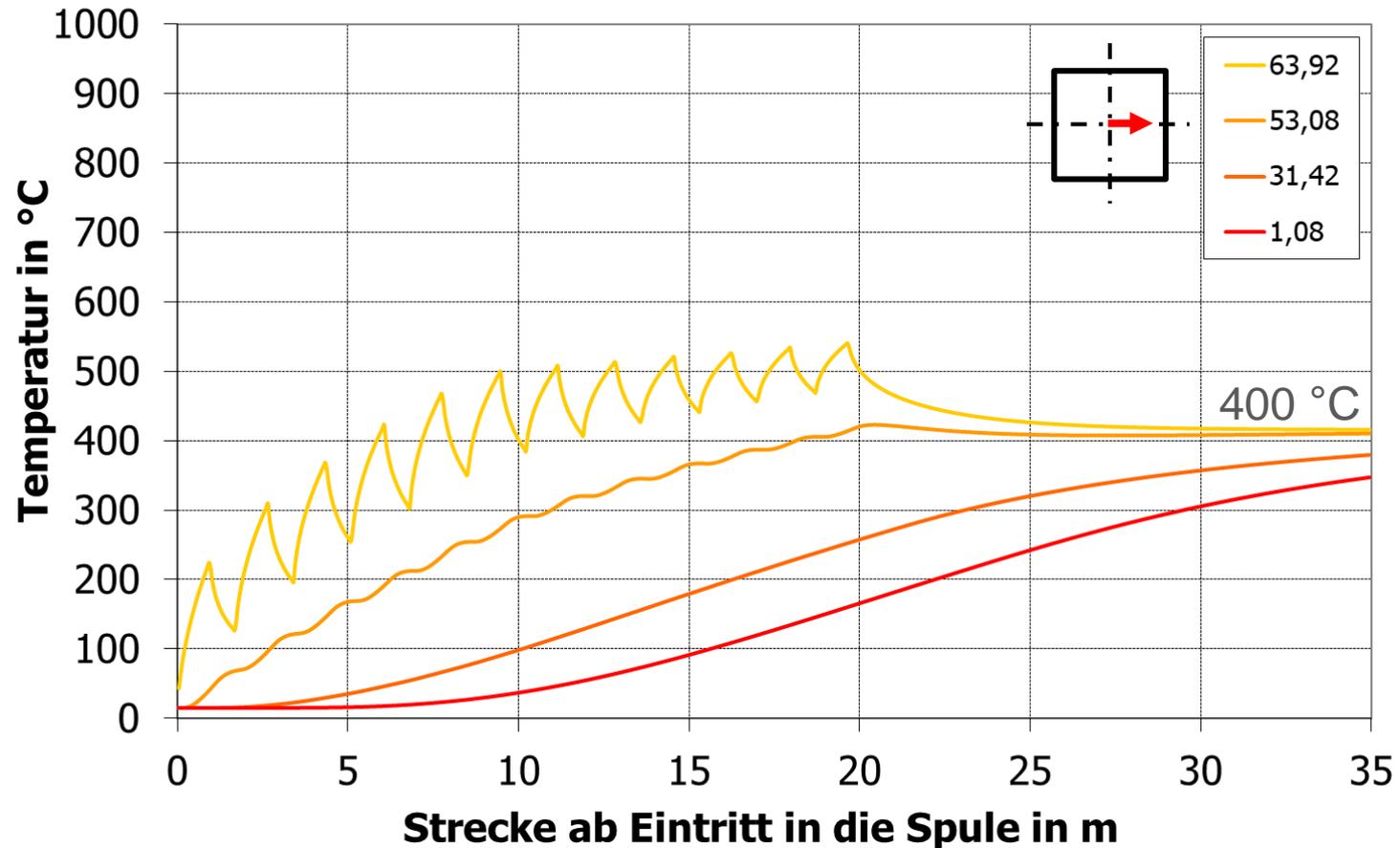
# Fallstudie ArcelorMittal Hamburg GmbH

- Ziel-Temperatur von 400 °C
- Max. Temperatur von 900 °C
- Abstand Spule-Ofen von 35 m
- $P_{\max} = 1,125 \text{ MW}$  je Spule
- 0,95 m je Spule
- Ausgleichslänge von 0,75 m
- Gewählte Induktionslänge von 19,65 m → **12 Spulen**

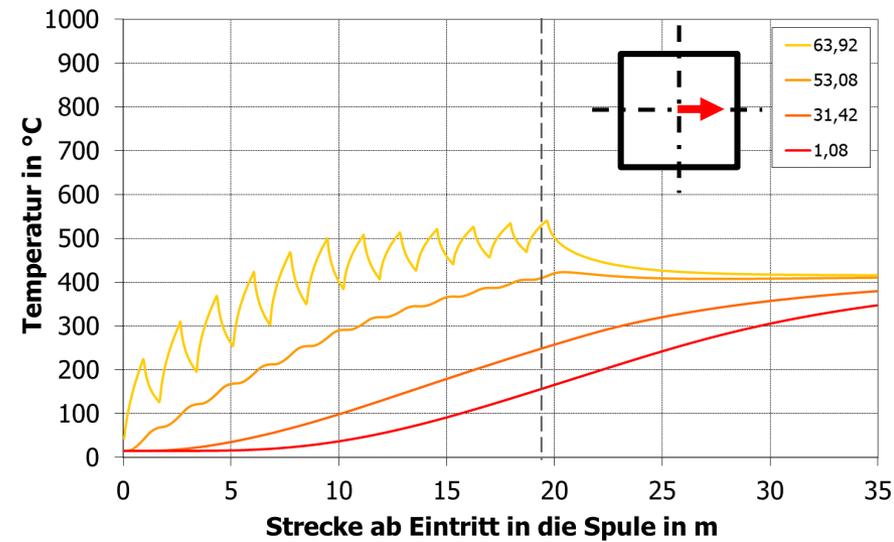
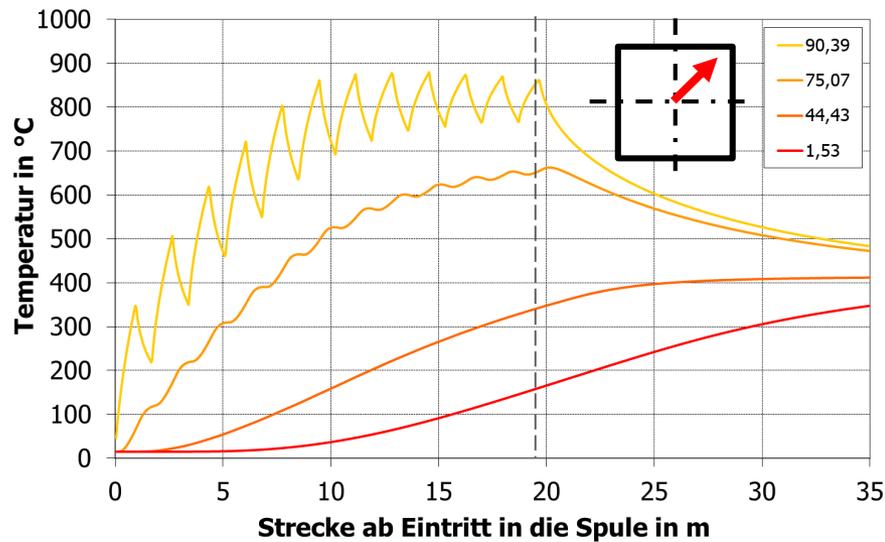




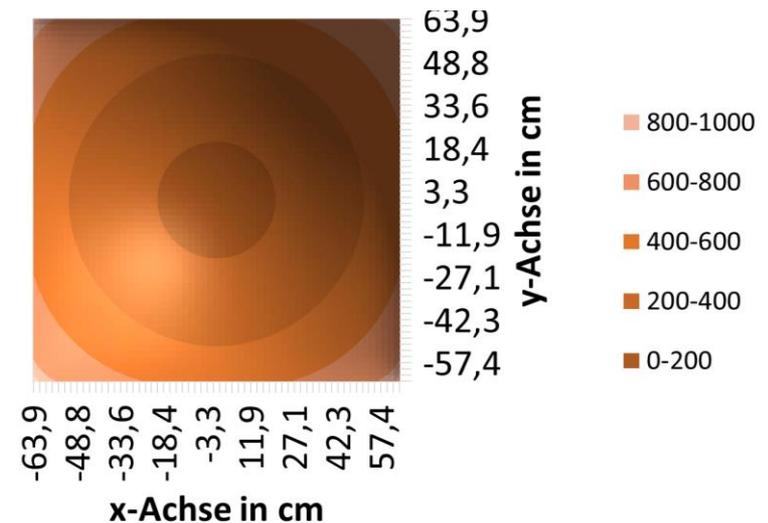
- Temperaturprofil für Knüppel-Ecke  
→ Auslegung für  $T_{\max} < 900 \text{ °C}$



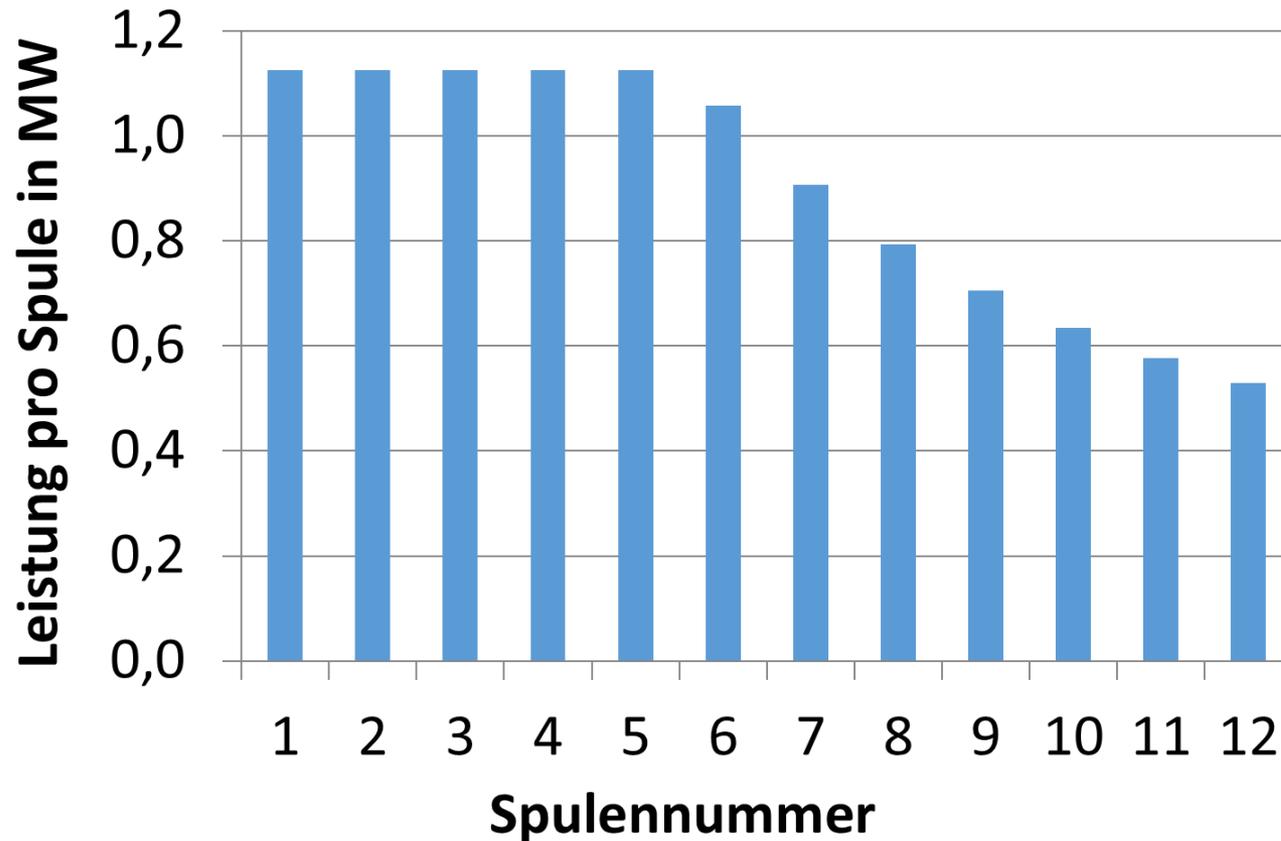
- Temperaturprofil für Knüppel-Mitte  
→ Auslegung für  $T_{\text{vorw}} \approx 400 \text{ °C}$



- Starke Überhitzung der Ecken zu erkennen
- 2D-Simulation erforderlich!



# Fallstudie ArcelorMittal Hamburg



- Leistung der einzelnen Spulen anhand der Simulation  
→ Reduzierung der max. Leistung ab Spule 6
- Gesamtleistung von **10,7 MW<sub>el</sub>**

# Hybrid Heating als Regelenergie

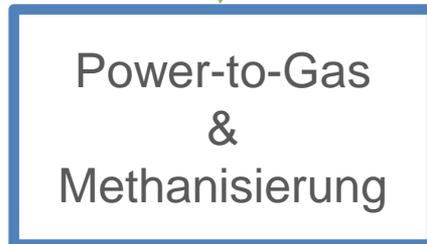
- Bedarf an Flexibilität wird durch Abschaltung konventioneller Kraftwerke steigen
- Beste Vergütung für (neg.) Regelenergie  
→ Minutenreserve oder SRL
- Sehr schnelles Zuschalten der induktiven Vorwärmung mit rund 10 MW möglich.
- Aktuell keine Präqualifikation möglich, da Verfügbarkeit von nahezu 100% erwartet wird (Störungen, Umbauten etc.)
- Pooling keine Lösung, da Aufrufzeiten und Erlöse stark sinken.
- Politischer Wille zur Erleichterung des Zugangs erforderlich...



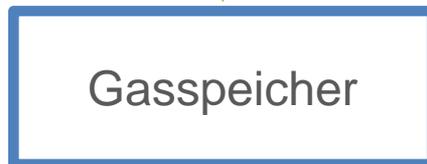
# Induktive Vorwärmung als Energiespeicher

## Power-to-Gas

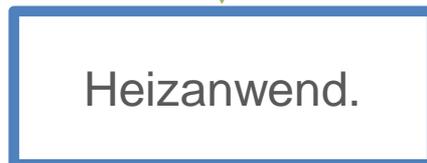
Überschuss-  
strom



CH<sub>4</sub>

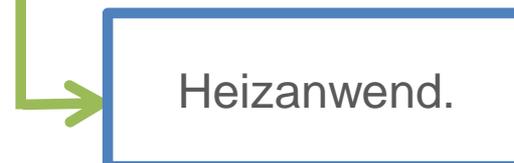
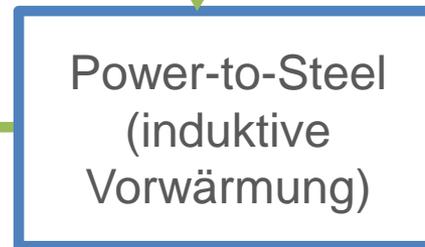


CH<sub>4</sub>



## Power-to-Steel

Überschuss-  
strom



*Gleicher Effekt  
wie Power-to-Gas  
für Energieinhalt  
im Gasspeicher!*

# Power-to-Steel

- **Power-to-Gas:**

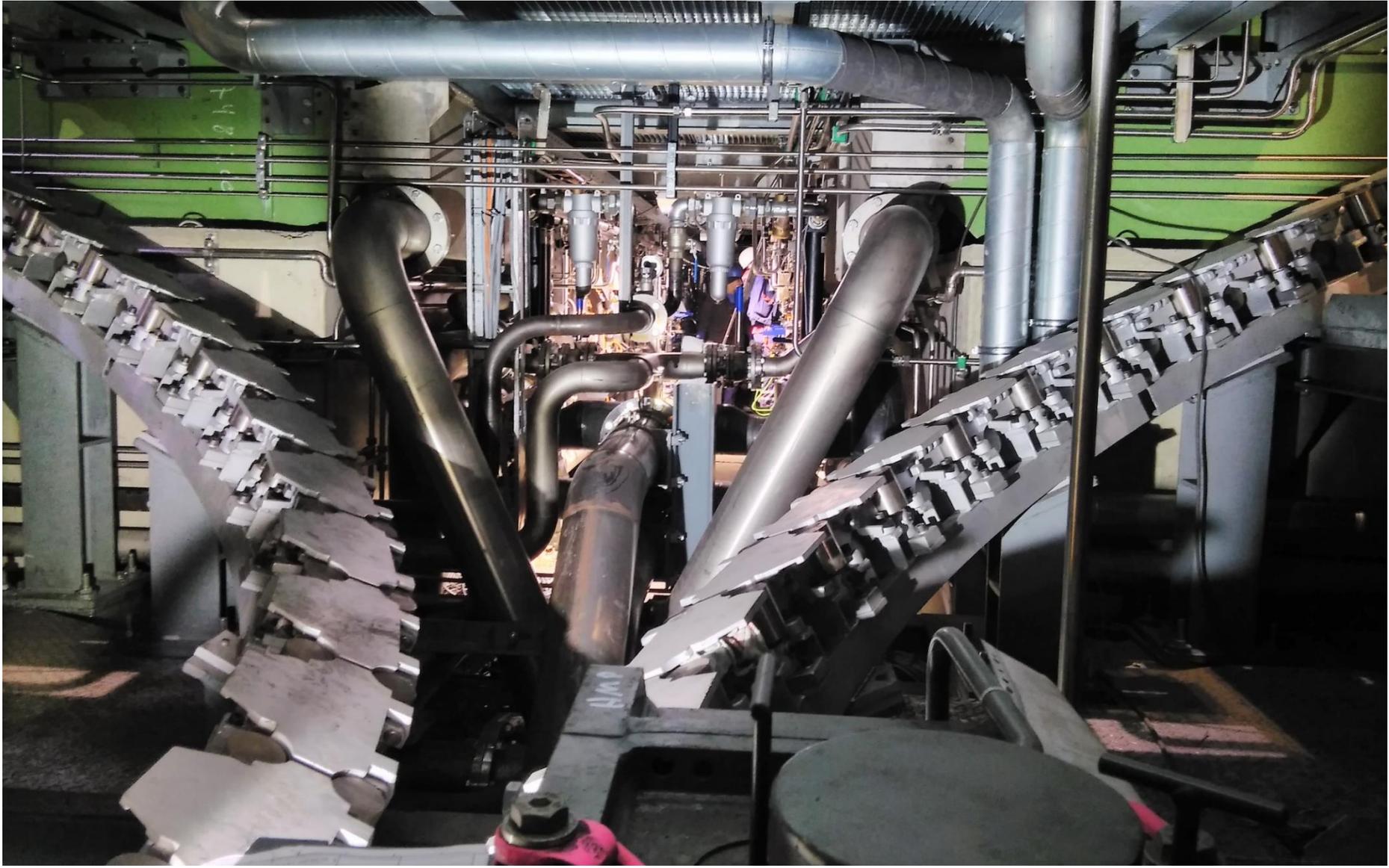
- Wirkungsgrad für Elektrolyse & Methanisierung von 64%
- 1 MWh<sub>el</sub> resultiert in rund 0,64 MWh<sub>th</sub> (Erdgas)
- Gas wird in Erdgasnetz/-speicher eingespeist

- **Power-to-Steel**

- Wirkungsgrad von Ofen und Induktion sind vergleichbar
- 1 MWh<sub>el</sub> ersetzt rund 1 MWh<sub>th</sub> (Erdgas)
- Erdgas wird nicht erzeugt/ingespeist, sondern verbleibt im Erdgasnetz/-speicher

- Gleichsetzung von Power-to-Steel mit Speichertechnologien  
→ z.B. Vermarktung als Wind-Gas...

# Zusammenfassung



# Zusammenfassung

- Eine induktive Vorwärmung kann einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beim Walzprozess leisten, wenn Erneuerbare Energien verwendet werden.
- Ein Fuel Switch ist aktuell noch nicht wirtschaftlich.
- Für maximale Flexibilität erfolgt die induktive Vorwärmung vor dem Wiedererwärmungssofen (Hybrid Heating).
- Mögliche Wirtschaftlichkeit über Regelenergie oder Vermarktung als Energiespeicher.  
→ Rahmenbedingungen seitens der Politik noch nicht gegeben.

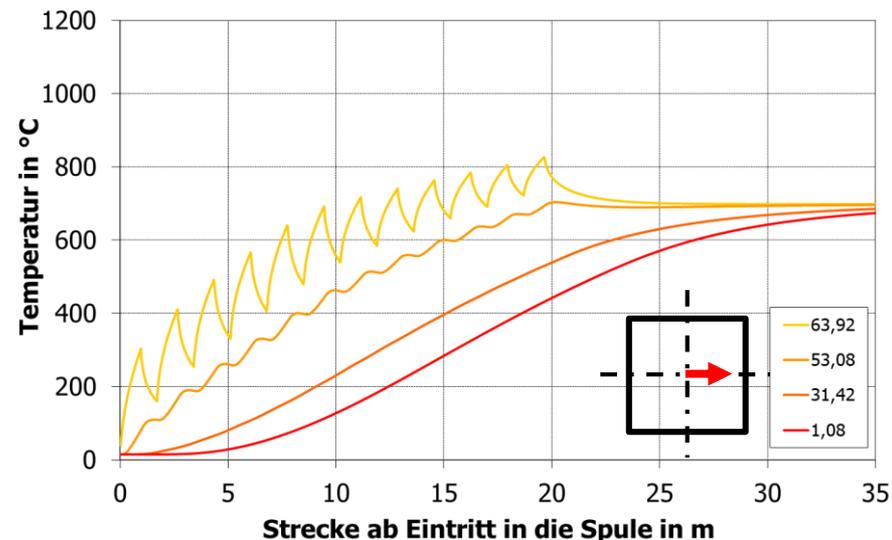
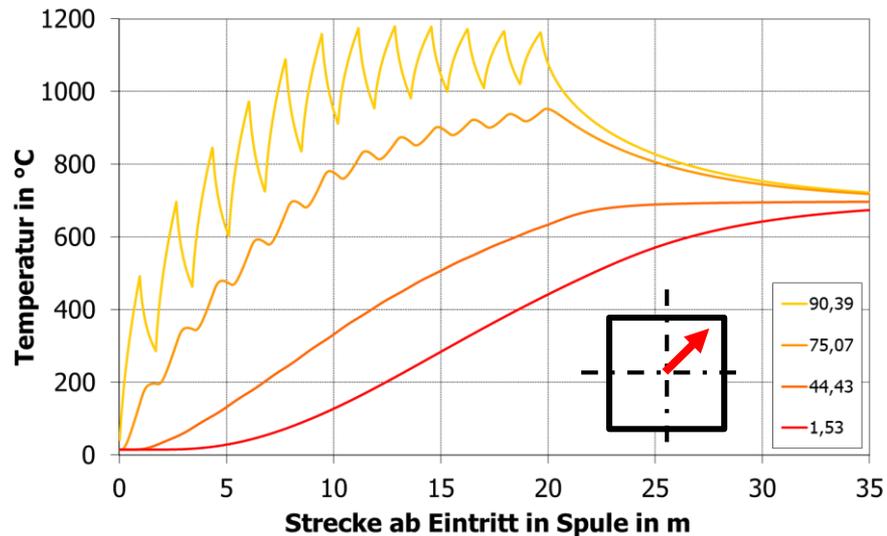
# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Prof. Dr.-Ing. Marc Hölling**  
HAW Hamburg  
marc.hoelling@haw-hamburg.de

**Dr.-Ing. Matthias Weng**  
ArcelorMittal Hamburg GmbH  
matthias.weng@arcelormittal.com



- [1] Hölling, Marc; Weng, Matthias; Gellert, Sebastian: *Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff*. stahl und eisen 137 (2017), Nr. 6, S. 47-53
  
- [2] Hölling, Marc; Gellert, Sebastian: *Direct Reduction: Transition from Natural Gas to Hydrogen?*. ICSTI 2018, 25<sup>th</sup>-27<sup>th</sup> Sept. 2018, Vienna, Austria
  
- [3] von Eynatten, Klaus; Langejürgen, Markus; Schibisch, Dirk M.: *Vorteile der induktiven Wiedererwärmung in integrierten Minimills*. elektrowärme international 72 (2014), Nr. 1, S. 37-44



- Simulation für ein-adriges Walzen mit 70 t/h (statt 120 t/h) bei konstanter Leistung von 10,7 MW
  - Max. Oberflächentemperatur von 1200 °C
  - Mittlere Vorwärmtemperatur von 700 °C
  - Konstante Leistung kann beibehalten werden
- Abschaltung nur bei zwei-adriger Störung erforderlich