

# Prozessoptimierung



# Verteilte Optimierung gekoppelter Industrieanlagen

Sandra Rothe

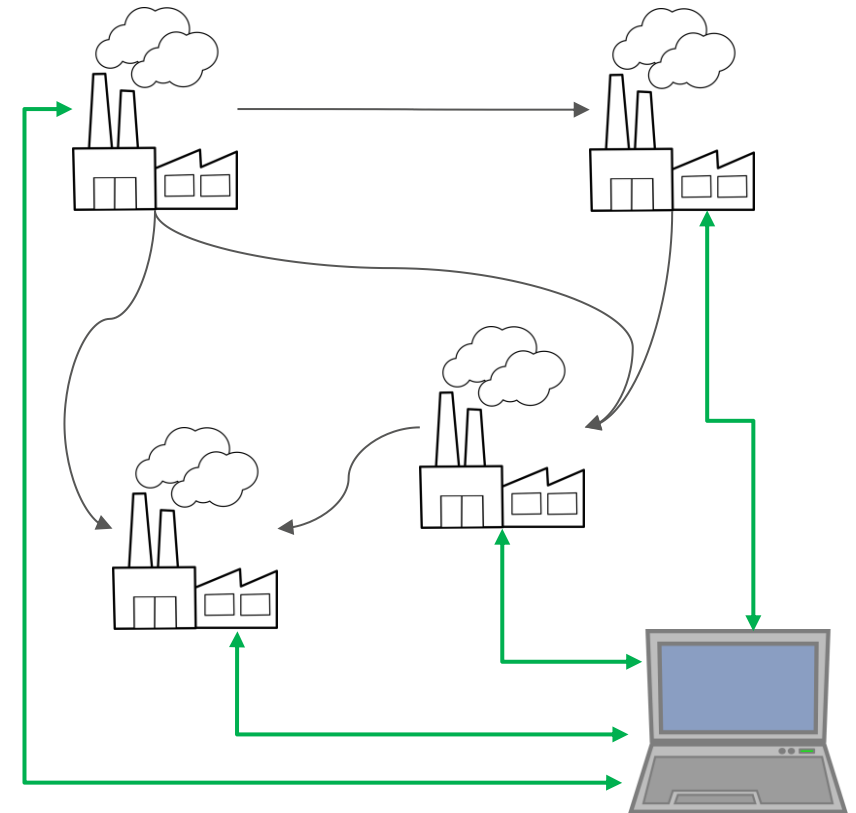
BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Prozessoptimierung



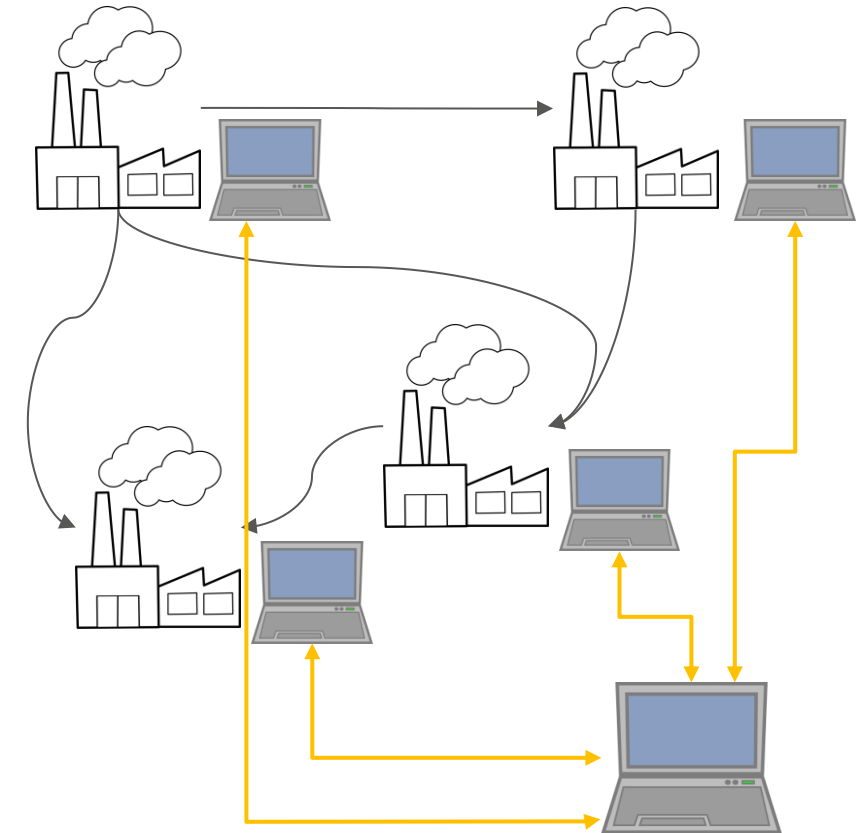
# Motivation

- › Gekoppelte Industrieanlagen
  - › Gekoppelte Produktionsprozesse
  - › Energie-, Strom-, Wasser- oder Gasnetze
  - › Mehrere Subsysteme beeinflussen sich gegenseitig.
- › Ziele der Optimierung
  - › Maximierung der Produktionsrate
  - › Minimierung des Energieverbrauchs und/oder der Kosten
  - › Einhaltung von Prozessrestriktionen
- › Klassischer Ansatz: Zentrale Optimierung
  - › Zentrale Instanz mit vollständigen Systeminformationen
  - › Lösung des gesamten Optimierungsproblems an einem Ort
  - › Mathematisch einfach zu formulieren
  - › Globale optimale Lösung
- › Probleme
  - › Skalierbarkeit, Datenschutz, Kommunikation, Robustheit



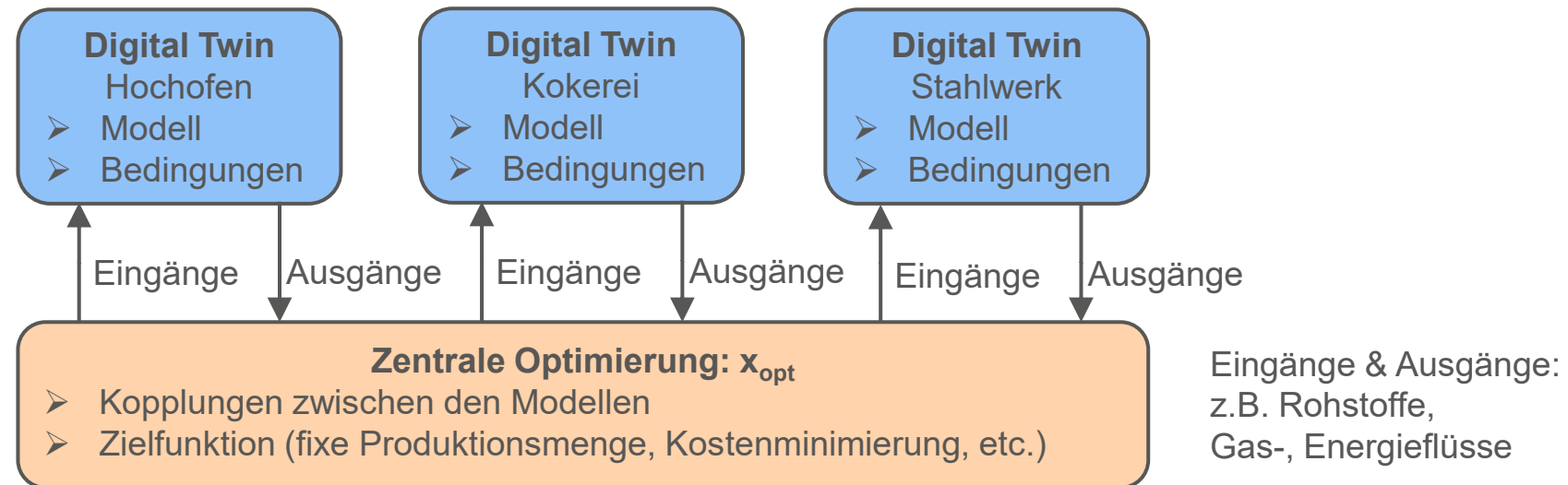
# Verteilte Optimierung

- › **Eigenschaften**
  - › Mehrere Agenten mit lokalen Systeminformationen
  - › Kommunikation nur mit Nachbaragenten oder Koordinator
  - › Globale Lösung durch parallele Berechnung
- › **Vorteile**
  - › Skalierbarkeit
    - › Aufteilung in kleinere Teilprobleme → parallel lösbar
  - › Datenschutz & Informationsschutz
    - › Jeder löst sein lokales Problem mit privaten Informationen
  - › Kommunikation
    - › Nur relevante Informationen werden ausgetauscht
  - › Robustheit
    - › System funktioniert weiter, wenn einzelne Agenten ausfallen



## Vom zentralen Problem zur kooperativen Lösung I

- › Entwicklung eines digitalen Zwillings für jedes Subsystem
- › Zentrale Optimierung: Validierung und Sicherstellung der Konvergenz



# Vom zentralen Problem zur kooperativen Lösung II

## Verteilung mit Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM)

Zielfunktion Agent 1    Zielfunktion Agent 2    Kopplung Agent 1    Kopplung Agent 2

- › Zentrales Optimierungsproblem

$$\min_{x_1, x_2} f_1(x_1) + f_2(x_2) \quad \text{s.t.} \quad A_1 x_1 + A_2 x_2 = b$$

- › Augmentierte Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L}_\rho(x_1, x_2, \lambda) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \lambda^\top (A_1 x_1 + A_2 x_2 - b) + \frac{\rho}{2} \|A_1 x_1 + A_2 x_2 - b\|^2$$

$\lambda$  = Dualvariable

$\rho$  = Strafparameter

Eigentliches  
Optimierungsziel

Berücksichtigung  
der Kopplung („Richtung“)

Zusätzliche Strafe bei  
Kopplungsverletzung („Größe“)

- › Verteilung mithilfe  $A_1 x_1 = z_1$ ,  $A_2 x_2 = z_2$  und  $z_1 + z_2 = b$

- › Agent 1:

$$x_1^{k+1} = \operatorname{argmin}_{x_1} f_1(x_1) + (\lambda_1^k)^\top (A_1 x_1 - z_1^k) + \frac{\rho}{2} \|A_1 x_1 - z_1^k\|^2$$

- › Agent 2:

$$x_2^{k+1} = \operatorname{argmin}_{x_2} f_2(x_2) + (\lambda_2^k)^\top (A_2 x_2 - z_2^k) + \frac{\rho}{2} \|A_2 x_2 - z_2^k\|^2$$

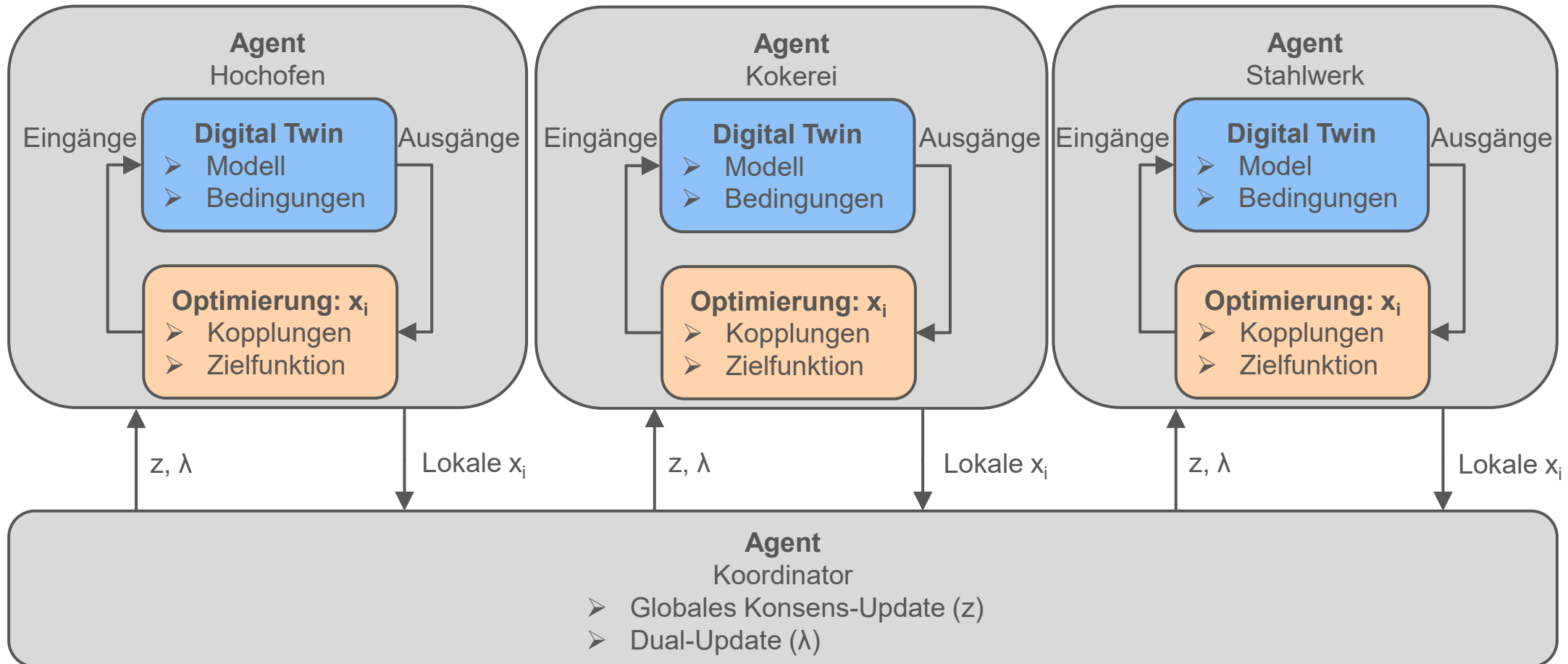
- › Globales Konsens-Update:

$$z^{k+1} = \operatorname{argmin}_{z_1, z_2} \frac{\rho}{2} \|A_1 x_1^{k+1} - z_1\|^2 + \frac{\rho}{2} \|A_2 x_2^{k+1} - z_2\|^2 \quad \text{s.t.} \quad z_1 + z_2 = b$$

- › Dual-Update:

$$\lambda_i^{k+1} = \lambda_i^k + \rho (A_i x_i^{k+1} - z_i^{k+1})$$

# Vom zentralen Problem zur kooperativen Lösung III



- › Multi-Agenten-Struktur mit Optimierung
- › Reduzierte Kommunikation

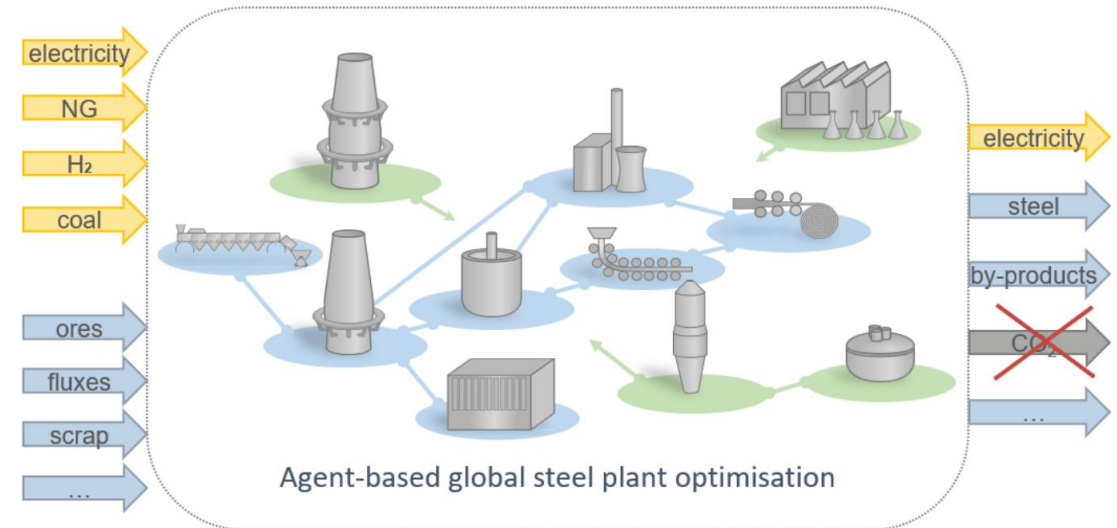
# Projekt: AgiFlex (Agent-based models minimizing carbon usage in flexible and efficient future integrated steelworks)

## › Ziele

- › Entwicklung eines universell einsetzbaren, agentenbasierten Berechnungswerkzeugs
- › Optimierung der Nachhaltigkeit der Stahlherstellung
- › Berücksichtigung externer und interner Rahmenbedingungen

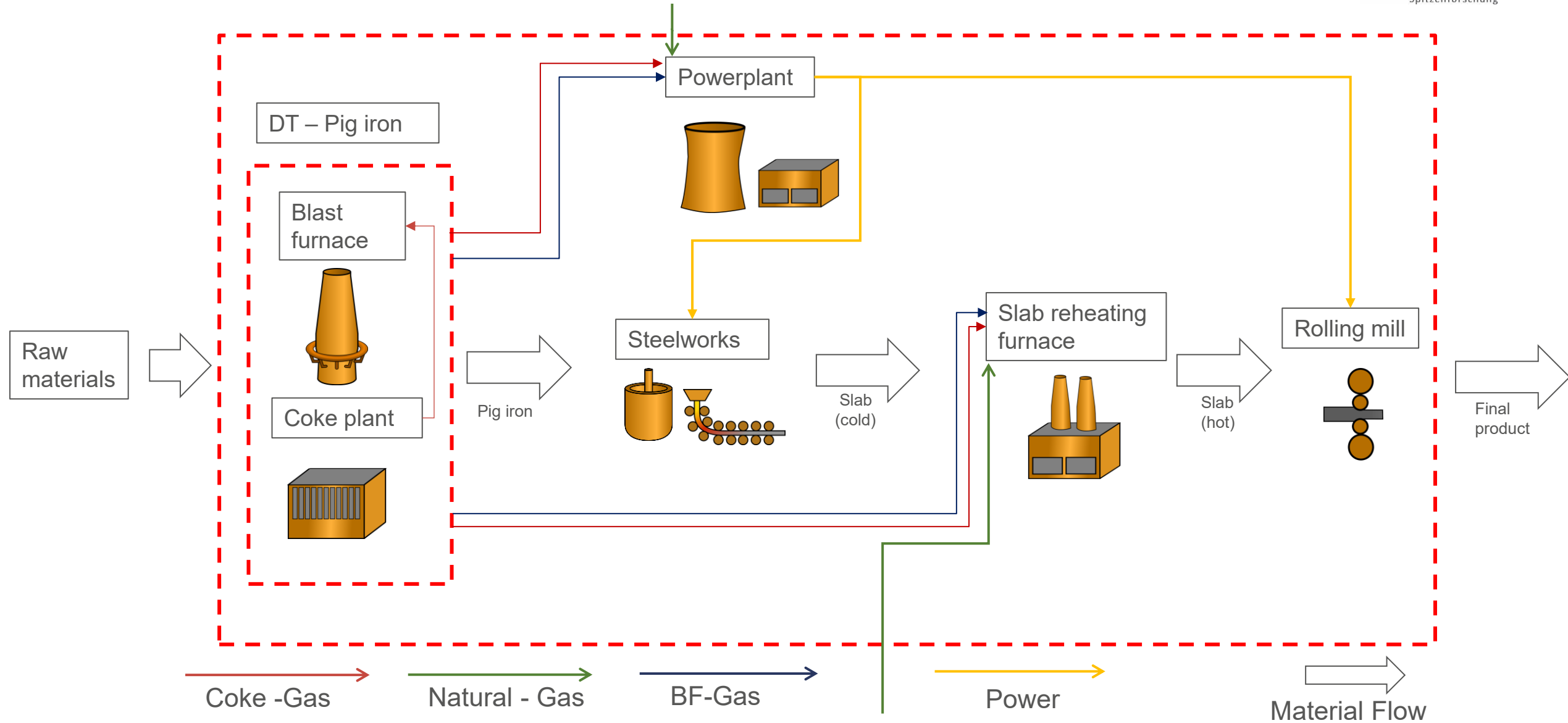
## › Auftrag

- › Modellierung und Optimierung kompletter integrierter Stahlwerke: Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des Verbrauchs fossiler Brennstoffe und Reduktionsmittel
- › Intelligenter Kohlenstoffeinsatz: Teilweises Ersetzen von Kohle durch Wasserstoff
- › Prozessintegration: Steuerung der Energieflüsse und Prozessgase



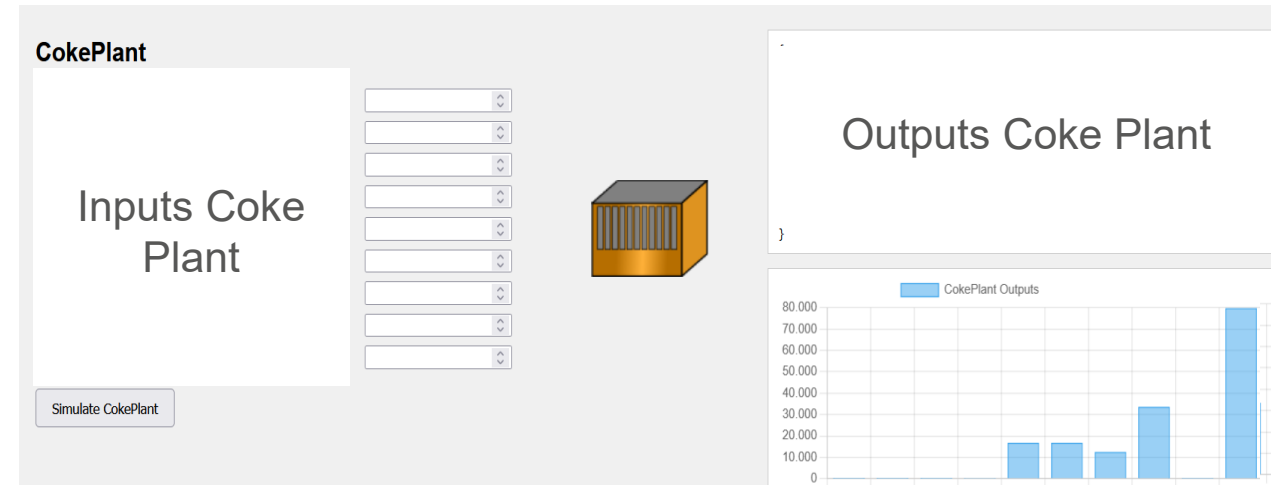
<https://www.agiflex-project.eu/>

# Projekt: AgiFlex – vereinfachtes Flussdiagramm

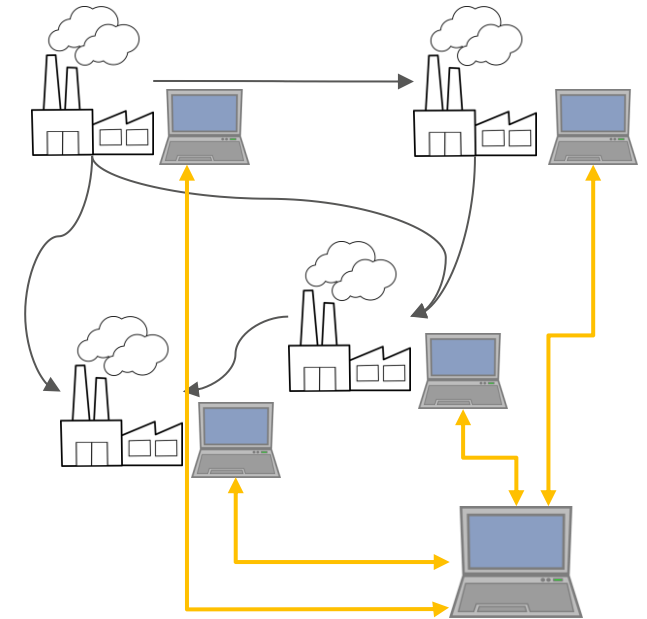


# Projekt: AgiFlex – erste Ergebnisse

- › **Digitale Zwillinge**
  - › Erste Version mit linearen Systemgleichungen basierend auf Prozessdaten
  - › Validierung mit weiteren Prozessdaten
- › **Zentrale Optimierung**
  - › Berücksichtigung des Signalfussplans mit allen relevanten Kopplungen
  - › Endproduktionsmenge wird erreicht.
  - › Energieoptimaler Prozess ist möglich.
  - › Kostenminimierung wird erreicht.
- › **Verteilte Optimierung**
  - › Test mit drei digitalen Zwillingen entspricht den Ergebnissen der zentralen Optimierung
  - › Ergebnis mit allen Zwillingen noch ausstehend



- › **Werkswweiter Planer und Optimierer mit Kosteninformationen in Echtzeit**
  - › Modellierung unterschiedlicher Ressourcen sowie Termineinschränkungen als Kosten
  - › Integration aller Kosten in einer automatischen Weise
  - › Anzeige für die Betreiber der Teilprozesse (werkswweites Dashboard): Kosten des derzeitigen Produktionsplans und mögliche Optimierung der Kosten
  - › Neue Optimierungsagenten für Prozesse und Gesamtoptimierung des Werks
- › **Ereignisgesteuerte verteilte Optimierung von Prozessketten**
  - › Ausführung der Optimierung nur bei relevanten Ereignissen
  - › Anomaliedetektion während des Prozesses
  - › Übergeordnete Optimierungsziele (Erhaltung der Produktqualität, Minimierung der Kosten und Umwelteinflüsse, etc.) werden auch bei Abweichungen berücksichtigt.
  - › Vorteile der verteilten Optimierung in Kombination mit einer Entscheidungsunterstützung bei Abweichungen



**Kontakt: Dr. Sandra Rothe**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-814  
E-Mail [sandra.rothe@bfi.de](mailto:sandra.rothe@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [sandra.rothe@bfi.de](mailto:sandra.rothe@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-814  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dr. Sandra Rothe

# Entwicklung eines Schweb-Durchlaufglühsystems

Kersten Marx

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Prozessoptimierung



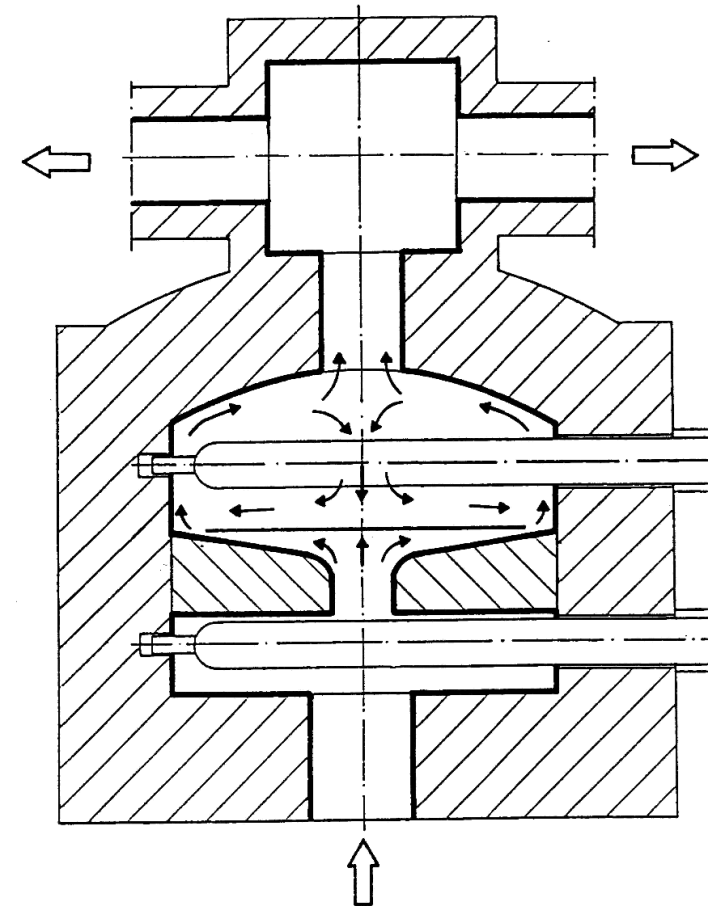
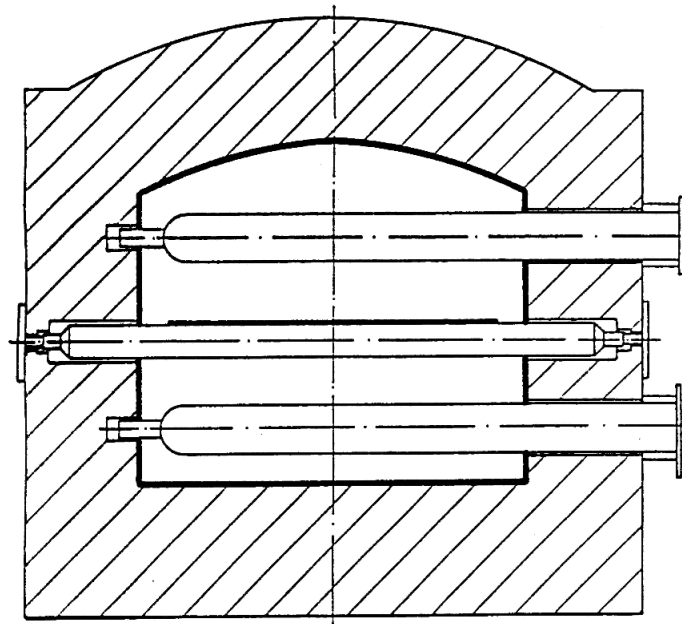
## Ausgangssituation

- Durch den Band-Rollen-Kontakt beim Rollenherd-Durchlaufglühverfahren sowie durch Band-Band-Kontakt beim Haubenglühverfahren wird die Oberfläche des Bandes beschädigt.
- Eine aussichtsreiche Alternative ist der Wechsel des Trage- und Transportsystems. So kann das Band z. B. auch berührungsfei (schwebend) durch ein Gaskissen getragen werden.
- Das Schwebeverfahren wurde für die Produktion von Elektro- bzw. Stahlband im Hochtemperaturbereich bis 1200°C noch nicht eingesetzt, da konventionelle Schwebeöfen einen hohen Gasvolumenstrom benötigen und entsprechende Gebläse fehlen.

## Projektziele

Entwicklung eines Schwebeofens für hohe Temperaturen, der nur geringe Traggasvolumenströme benötigt. Hierzu wird der Ofenherd als Längspolsterrinne gestaltet. Geeignete Gebläse befinden sich in der Entwicklung und sollen hierfür angepasst werden.

Rollenherdofen



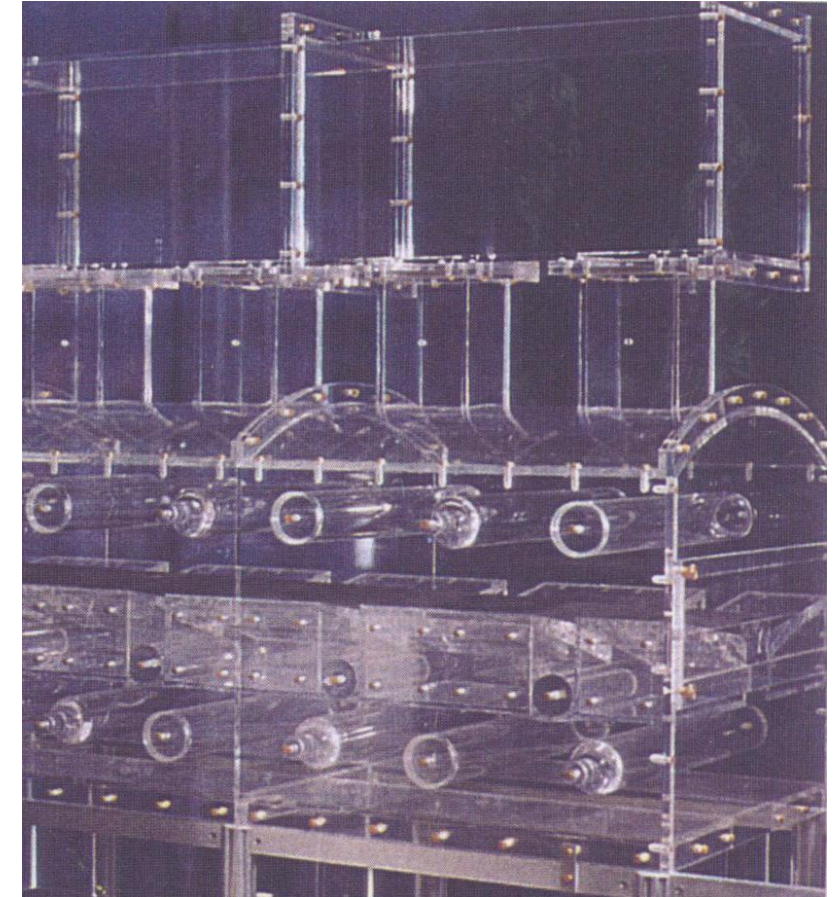
Schwebeofen

## Vorteile des neuartigen Durchlaufglühsystems für Elektrobänder

- Bandtemperatur bis 1200 °C
- Traggaszusammensetzung bis 100% H<sub>2</sub>
- Verbesserte magnetische und mechanische Eigenschaften des Bandwerkstoffs
- Verbesserte Oberflächengüte des Bandes
- Verbesserte Bandplanheit
- Verbesserter Wärmeübergang am Band und an den Strahlrohren

### durch:

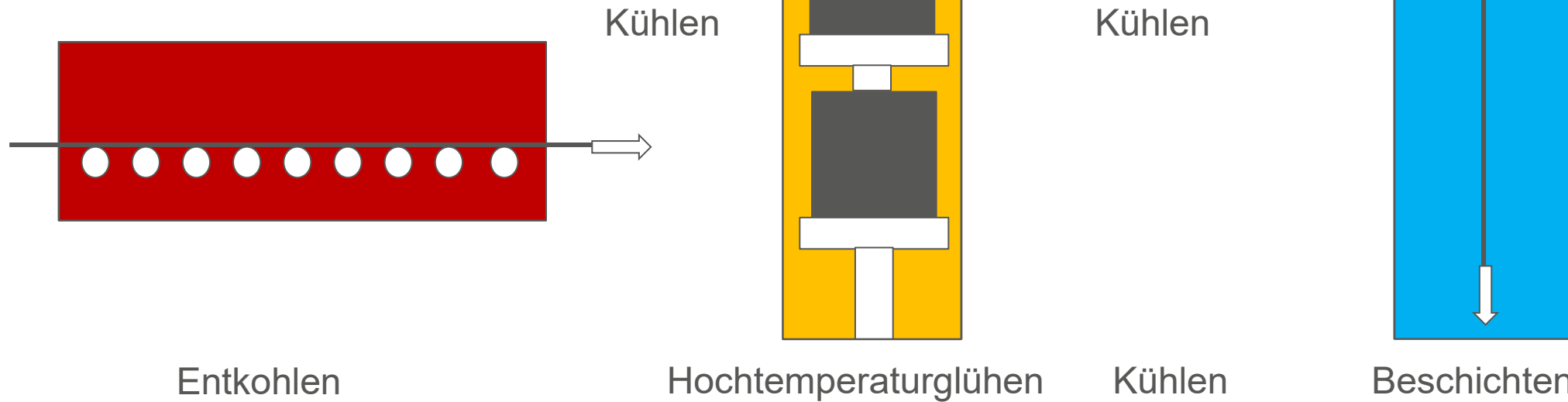
- stabilen, berührungsfreien Bandtransport auf Längspolster-  
rinne
- gleichmäßige Erwärmung des Bandes über die Breite
- zusätzliche Konvektion



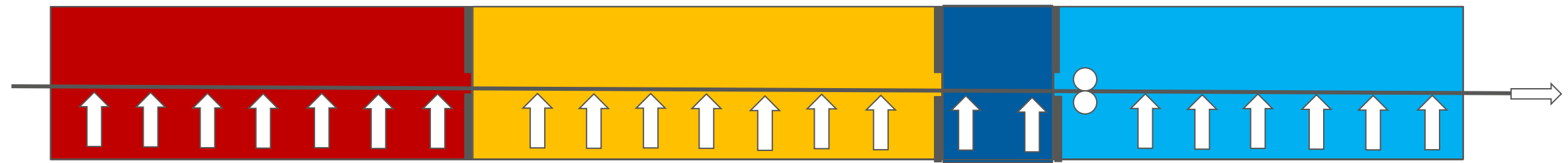
Strömungsmodell

# Kombianlage vereint drei Anlagen und spart einen Abkühlvorgang ein

Bisherige Praxis

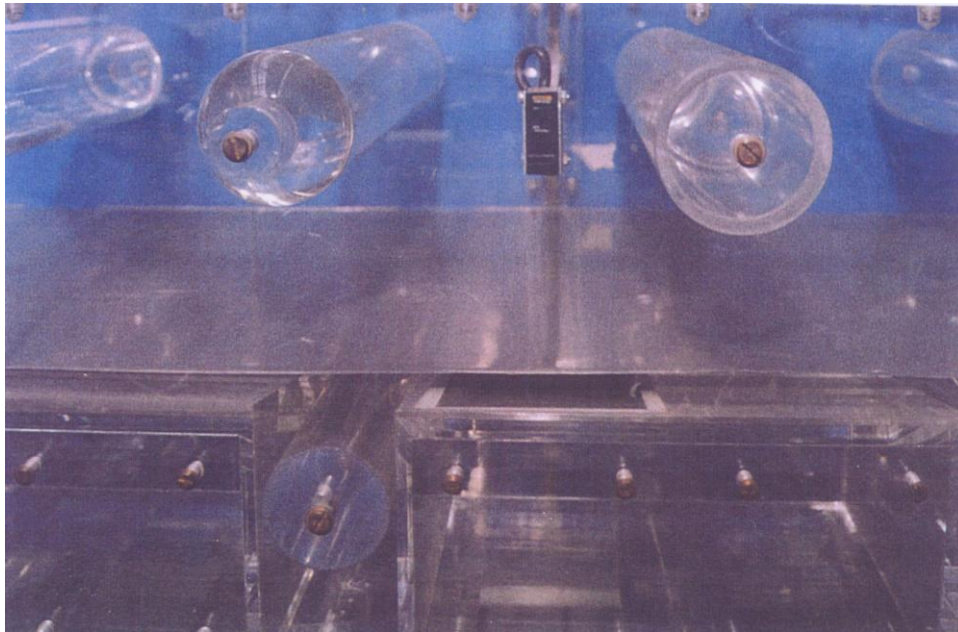


Kombianlage

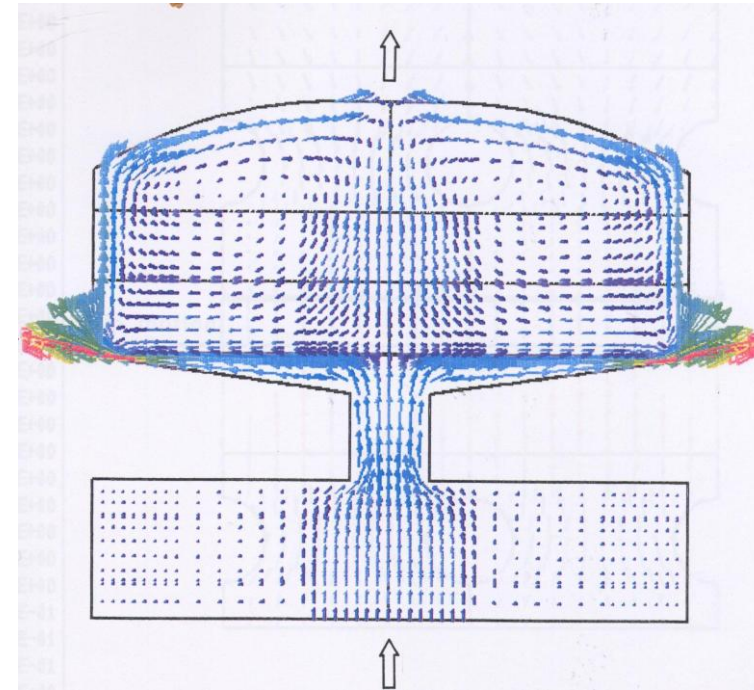


## Arbeitsschritte

- Entwicklung eines Schwebeofens für ein kontinuierliches Hochtemperatur-Glühverfahren durch Strömungsmodellversuche und numerische Simulation
- Bau einer Heißversuchsanlage für ein neuartiges Schweb-Durchlaufglühsystem
- Pilotversuche zur Klärung der Auswirkungen der verfahrenstechnischen Prozessführung auf das Elektroband



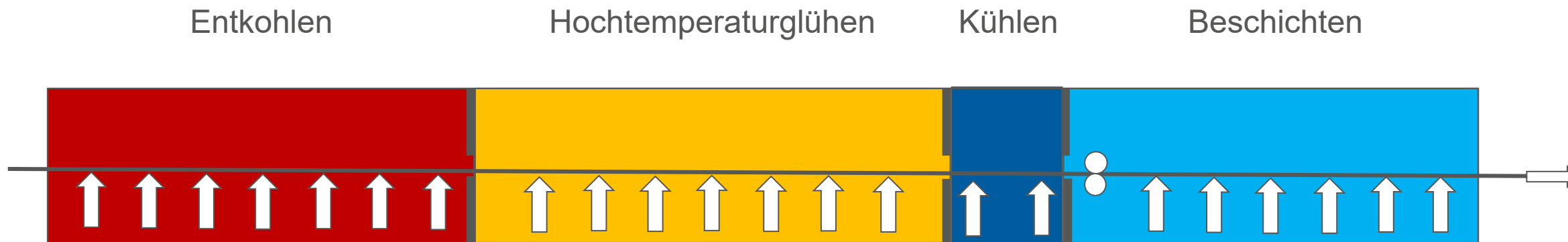
Strömungsmodellversuche



numerische Simulation

## Nutzen für die Industriepartner

- Durch ein kontinuierliches Hochtemperatur-Glühverfahren könnte das Haubenglühn ersetzt und der Herstellungsprozess von Elektroband energiesparend verkürzt werden.
- Oberflächenbeschädigungen, die gravierende Auswirkungen auf die Materialeigenschaften von Elektroband haben, werden vermieden.
- Ein bisher unerreichtes Niveau der Materialeigenschaften soll erreicht werden.



Kombianlage

**Kontakt: Dipl.-Ing. Kersten Marx**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 211 98492-384  
E-Mail [kersten.Marx@bfi.de](mailto:kersten.Marx@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [kersten.Marx@bfi.de](mailto:kersten.Marx@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 211 98492-384  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dipl.-Ing. Kersten Marx

# Chancen und Risiken bei der Verwendung von Wasserstoff als Brenngas

Martin Wunde

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Prozessoptimierung



## Ideales Oxid an (Luft-)Sauerstoff

- › An der Eisenseite geht Eisen im Oxid in Lösung.
- › Eisenionen diffundieren zur Atmosphärenseite.



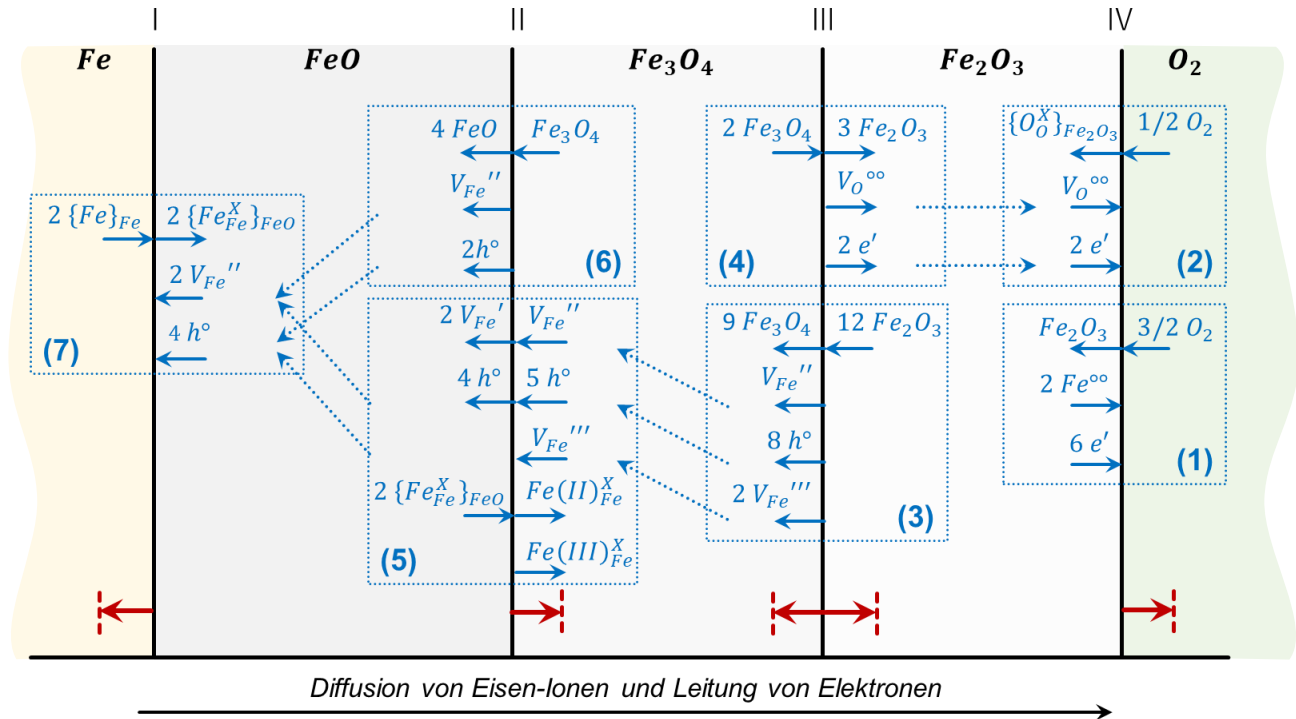
- › An der Atmosphärenseite wird Sauerstoff aufgespalten.
- › Diffundierte Eisenionen setzen sich mit Sauerstoff zu Oxid um.



- › Es entsteht ein dreischichtiger Aufbau, bestehend aus ca.:
  - › 95 % Wüstit (FeO),
  - › 3 % Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) und
  - › 2 % Hämatit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



Wüstit ( $FeO = Fe_{0,84}O$  bis  $Fe_{0,95}O = Fe_{1-x}O$ ) ist ein sehr defektreiches Oxid und daher guter Leiter.



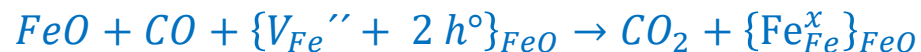
# Hochtemperatur-Oxidationsprozesse

## Poröses Oxid (= Zunder) an Heißgas

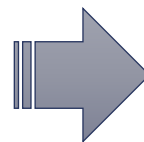
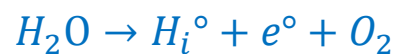
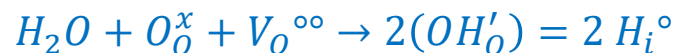
- › Neben Sauerstoff wird auch Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid an der Oberflächen aufgespalten.



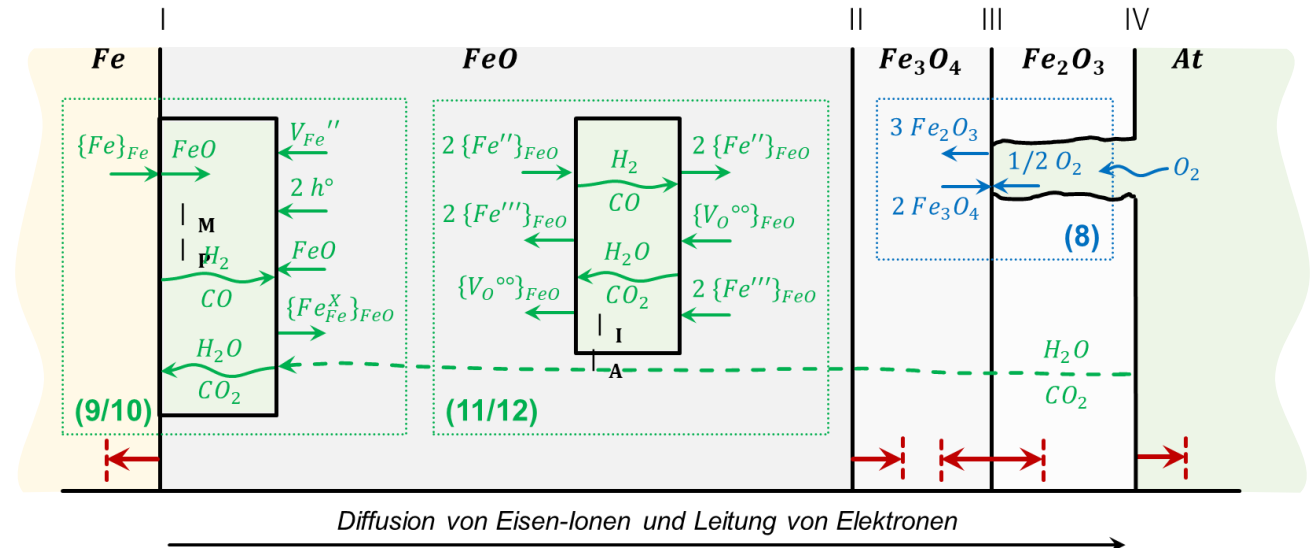
- › Innerhalb von Poren und Rissen kann eine Redoxreaktion den Stofftransport beschleunigen.



- › Hydroxidbildung bzw. Wasserstofftransport und -einbau ist möglich.



In Wüstit gelöster Wasserstoff ist sehr mobil und erhöht die Plastizität und das Kriechvermögen von Wüstit enorm.



# Hochtemperatur-Oxidationsprozesse

## Kinetik

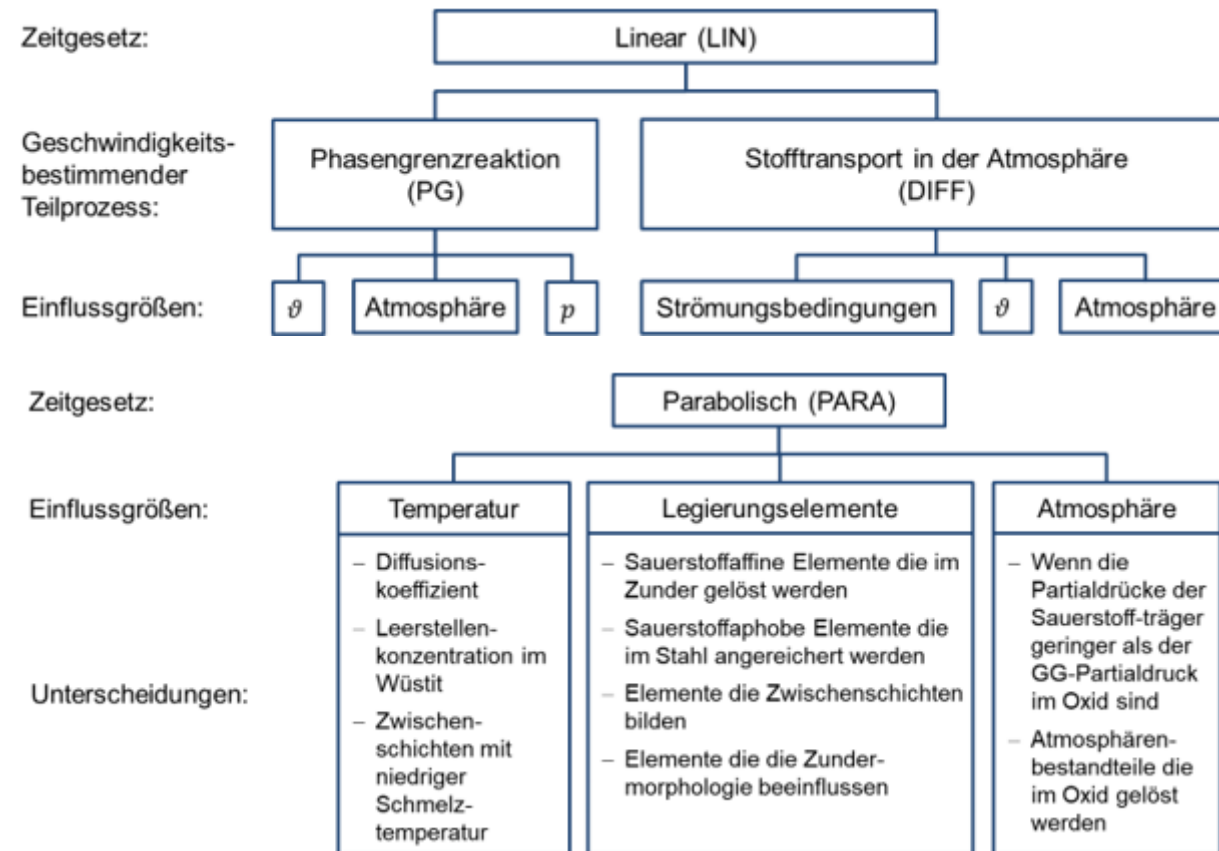
- › Die Stoffumsetzung erfolgt annähernd instantan und nimmt somit keinen Einfluss die Bildungskinetik.
- › Innerhalb der ersten 5 – 10 Minuten ist der atmosphärische Sauerstofftransport der langsamste Teilprozess und gibt maßgeblich die lineare Bildungskinetik vor.

$$\frac{\Delta m_O}{A} = k_L * t \quad \text{mit: } k_L \sim \exp(1/T), \quad k_L \sim c_{Gas}, \quad k_L \sim \sqrt{v_{Gas}}$$

- › Danach sind die Eisen- und Porengasdiffusion die langsamsten Teilprozesse und geben maßgeblich die parabolische Bildungskinetik vor.

$$\frac{\Delta m_O}{A} = k_P * \sqrt{t} \quad \text{mit: } k_P \sim \exp(1/T), \quad k_P \sim c_{Stahl},$$

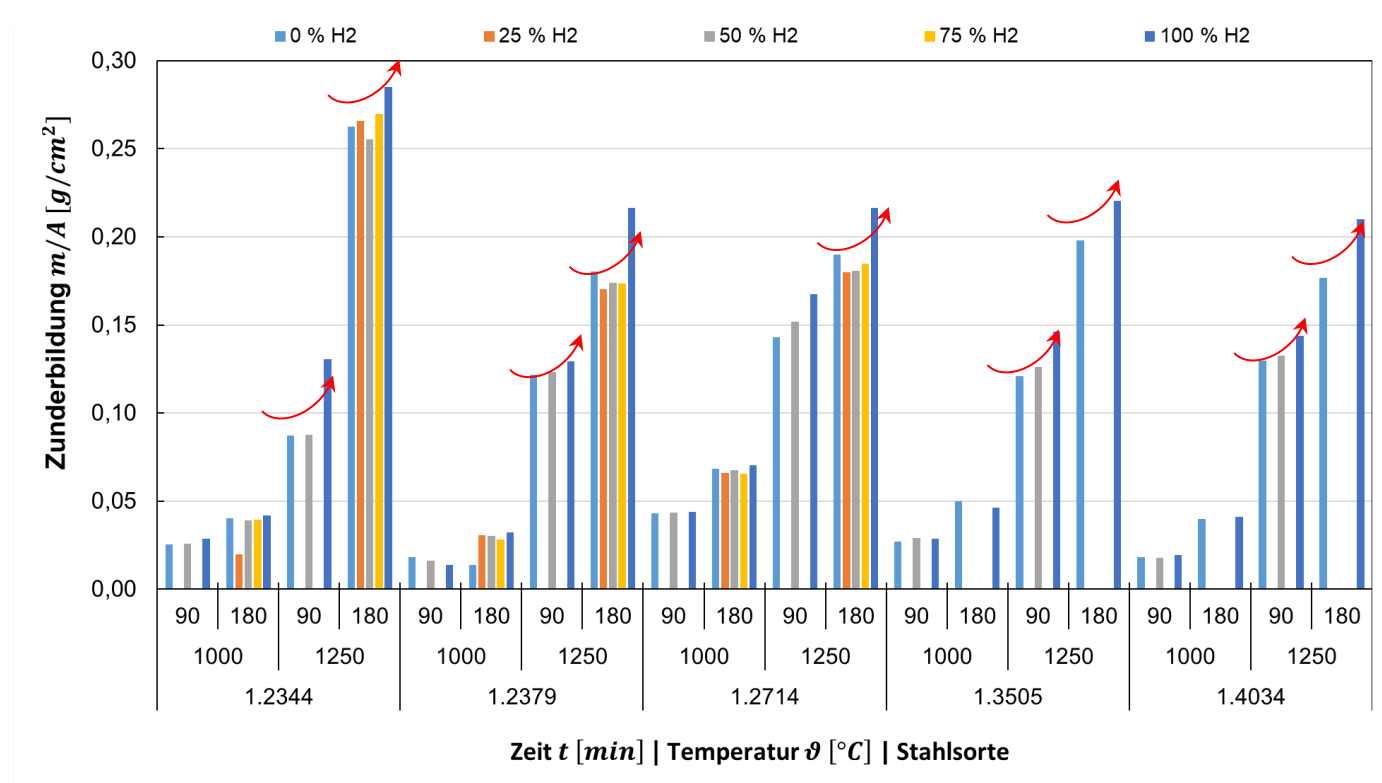
➔ Es existieren verschiedene Beschichtungssysteme, mit denen auf die physikalischen Vorgänge Einfluss genommen werden kann, um die Zunderbildung zu reduzieren.



# Oxidationsprozesse: Quelle von Oberflächenfehlern

## Zunderbildung und Materialverlust

› Ergebnisse zur Wirkung des H<sub>2</sub>-Zusatzes zu Brenngas auf die Zunderbildung:



### Auf die Probenoberfläche bezogene Massenzunahmen durch Sauerstoffaufnahme:

Isotherme Auslagerung für 90 und 180 Minuten

bei 1000 und 1250 °C

der Stahlsorten 1.2344, 1.2379, 1.2714, 1.3505 und 1.4034

in synthetischen Verbrennungsgasen mit 0; 25, 50, 75 und 100 % H<sub>2</sub>-Zusatz zum Erdgas

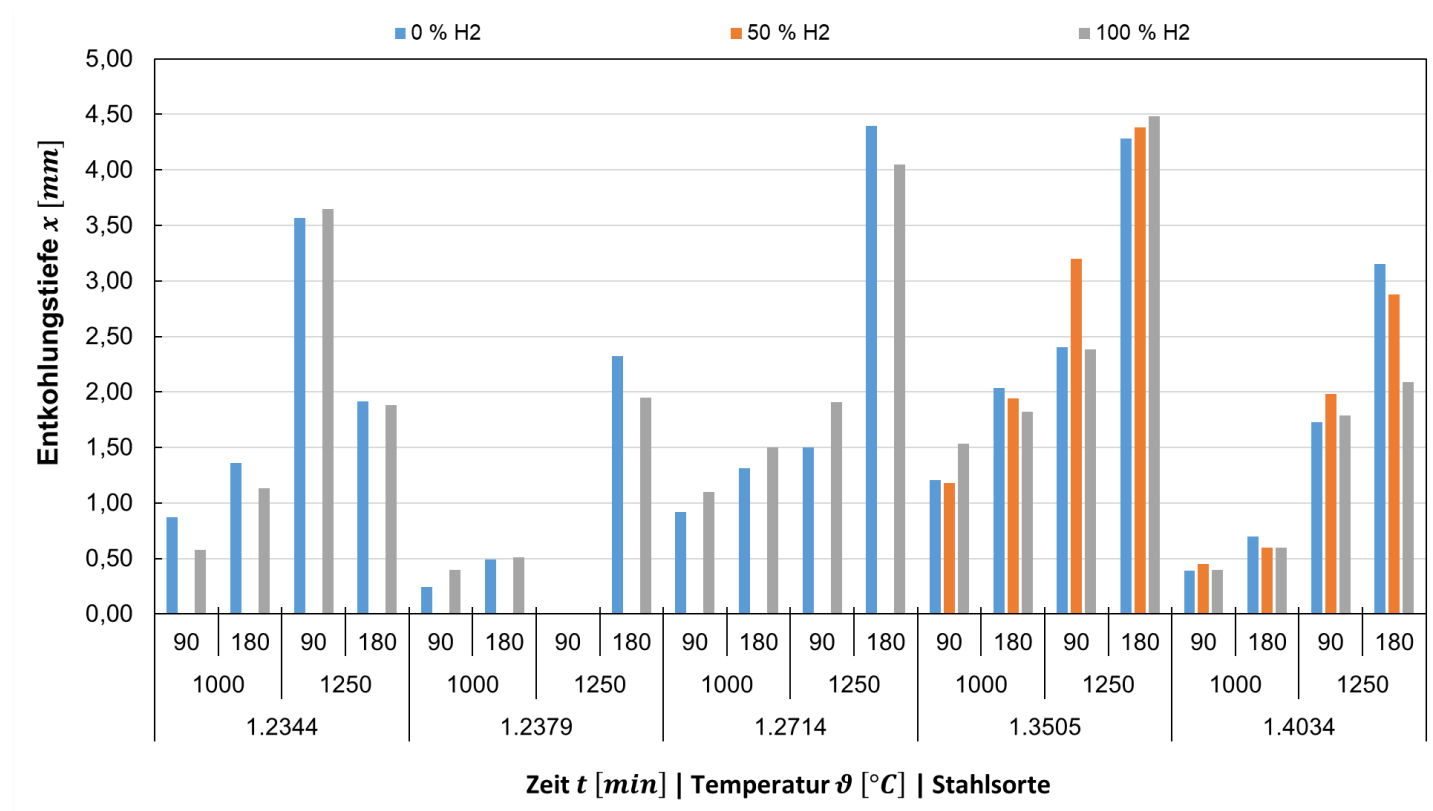
[H2HotRoll, HYDREAMS]

→ Leicht verringerte Zunderbildung bei H<sub>2</sub>-Zugabe bis 75 % zum Erdgas.

→ Teilweise starke Erhöhung der Zunderbildung bei 100 % H<sub>2</sub>-Einsatz.

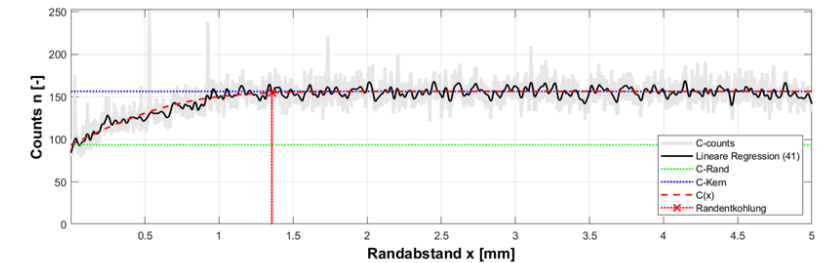
## Entkohlung

› Ergebnisse zur Wirkung des H<sub>2</sub>-Zusatzes zu Brenngas auf die Entkohlung:



### Entkohlungstiefe

(def. als Kohlenstoffgehalt, der 99 % des Kohlenstoffgehaltes im Kern entspricht):



Isotherme Auslagerung für 90 und 180 Minuten bei 1000 und 1250 °C

der Stahlsorten 1.2344, 1.2379, 1.2714, 1.3505 und 1.4034

in synthetischen Verbrennungsgasen mit 0; 50 und 100 % H<sub>2</sub>-Zusatz zum Erdgas

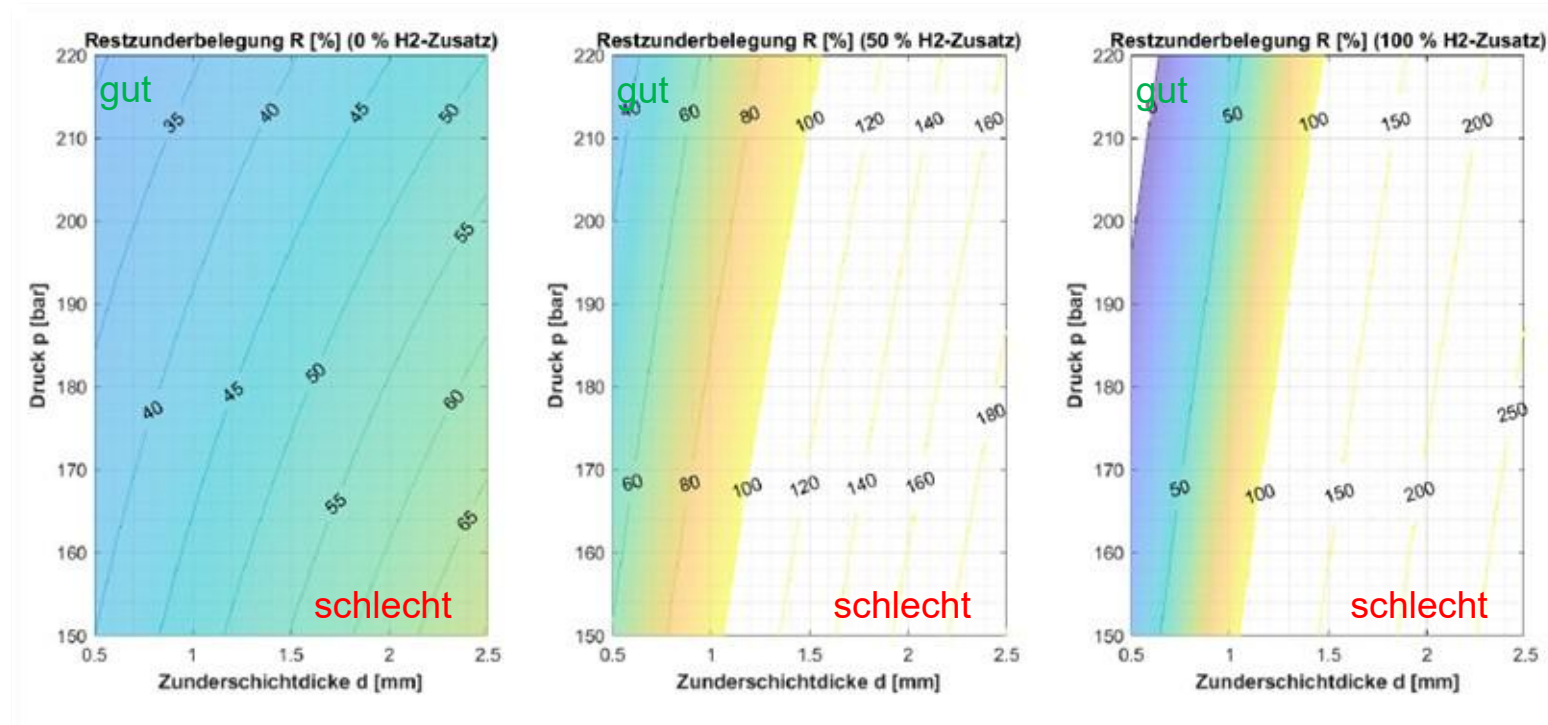
[H2HotRoll, HYDREAMS]

→ Kein eindeutiger Einfluss der H<sub>2</sub>-Zugabe zum Erdgas auf die Entkohlungstiefe erkennbar.

# Oxidationsprozesse: Quelle von Oberflächenfehlern

## Entzunderung

› Ergebnisse zur Wirkung des H<sub>2</sub>-Zusatzes zu Brenngas auf die Restzunderbelegung:



### Restzunderbelegung auf Entzunderungsproben:

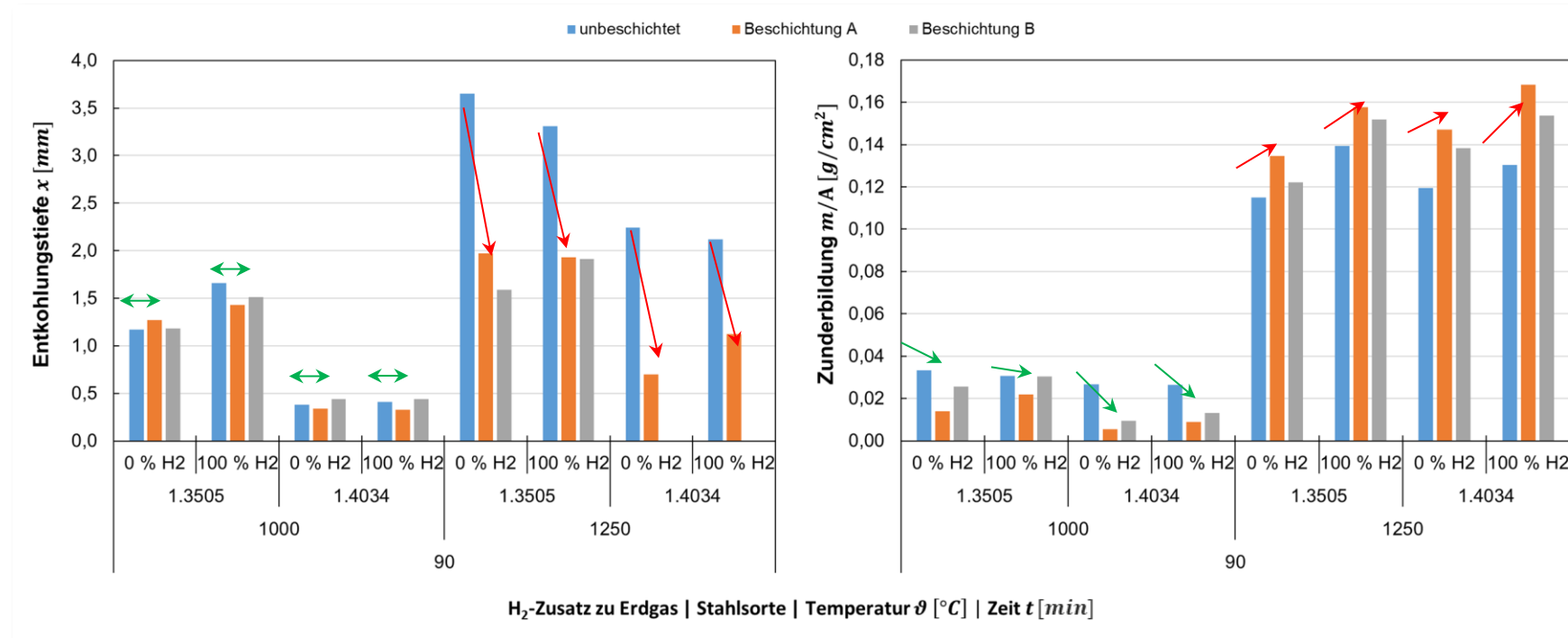
Entzunderung bei 165; 200 und 220 bar mit einem Spitzabstand von 120 mm und einer Probengeschwindigkeit von 1 m/s nach isothermer Auslagerung bei 1250 °C der Stahlsorte 1.4034 für 90; 120 und 180 Minuten in synthetischen Verbrennungsgasen mit 0; 25; 50; 75 und 100 % H<sub>2</sub>-Zusatz zum Erdgas

[H2HotRoll]

- H<sub>2</sub>-Zusatz reduziert die Entzunderungsgüte enorm.
- Entzunderungsparameter müssen ggf. angepasst werden.

## Wirksamkeit von Zunderschutzbeschichtungen im CO<sub>2</sub>-freien Ofenbetrieb

› Ergebnisse zur Wirkung von Beschichtungen zur Minimierung von Zunder und Entkohlung:



### Entkohlungstiefe (links) und Zunderbildung (rechts)

in synthetischen Verbrennungsgasen mit 0% und 100 % H<sub>2</sub>-Zusatz zum Erdgas

der Stahlsorten 1.3505 und 1.4034

nach isothermer Auslagerung bei 1000 und 1250 °C für 90 Minuten

Unbeschichtet, beschichtet mit A und beschichten mit B (modifizierte A)

[H2HotRoll]

- ➔ Beschichtung reduziert bei geringen Temperaturen (< 1177 °C) die Zunderbildung nennenswert, ohne die Entkohlung zu verändern.
- ➔ Beschichtung reduziert bei höheren Temperaturen (> 1177 °C) die Entkohlung nennenswert zu Lasten einer leicht erhöhten Zunderbildung.

## Zusammenfassung

### Erdgas als Brenngas

- › Es existieren Beschichtungssysteme, die die Zunderbildung signifikant senken, bis zu 80 %.
- › Einige Beschichtungen verbessern die Zunderablösung.
- › Andere Beschichtungen minimieren die Reibung am Werkzeug.
- Ergebnisse beziehen sich nur auf an Luft (z.B. Induktion) und in Standard-erdgasbefeuelten (offene Verbrennung) Öfen erwärmte Stähle bei Liegezeiten von > 30 Minuten.

### H<sub>2</sub> / NH<sub>3</sub> als Brenngas

- › Es werden Folgen erwartet bei der Nutzung von Brenngasen, die den Wasserdampfgehalt in der Ofenatmosphäre erhöhen:
  - › Zunderbildung: erhöhte Zunderbildung bei 100 % H<sub>2</sub>-Einsatz
  - › Entkohlung: teilweise tiefere Entkohlung bei H<sub>2</sub>-Einsatz aufgrund des geringeren C-Pegels erwartet, jedoch nicht eindeutig nachgewiesen.
  - › Festhaftende Oxidschicht: sog. Klebzunder aufgrund von plastischerem Wüstit.
  - › Wasserstoffaufnahme könnte zu Versprödung und zu Verlust der Schweißbarkeit führen. Hierzu mehr in den beiden Folgevorträgen!
- Der Nachweis der Wirksamkeit von Beschichtungen bei 100 % Wasserstoff- und/oder Ammoniak Einsatz soll weiter untersucht werden.

## Ausblick

### Projektidee: Online-Berechnung von Oxidationsvorgängen während der Wiedererwärmung als weitere Zielgröße von Ofenführungssystemen - OnlineOxModell

- › Die Ausprägung der Zunderbildung wird maßgeblich durch das Material (Legierung, Oberflächenzustand), die Ofenfahrweise (Heizkurve, Gasströmung) und den Verbrennungsprozess (Erdgas, Gichtgas, Wasserstoff usw.) beeinflusst.
- › Es existieren Beschichtungen, mit denen z.B. die Entkohlung nennenswert, die Zunderbildung bis 80 % und das Verkleben von Knüppeln reduziert oder die Entzunderung verbessert werden können.
- › Ofenführungssysteme sind in der Lage, Temperaturverläufe zu berechnen und Oxidationsprozesse abschätzen.
- › Bei der Vielfalt der o.g. Einflussfaktoren, unbekannter zukünftiger Wärmeprozesse und der Vielzahl der Beschichtungssysteme ist die genaue Berechnung der Oxidation kaum möglich und kann nicht zu effizienter Steuerung von Erwärmungsprozessen herangezogen werden.

#### → Zielsetzung

- › Physikalisch basierte Online-Berechnung von Oxidationsvorgängen während der Wiedererwärmung, mit den Zielen der:
  - › Flexibilisierung von Ofenführungssystemen für veränderliche Ofenfahrweisen,
  - › Integration eines um den Oxidationsprozess erweiterten Optimierungsalgorithmus

**Kontakt: M.Sc. Martin Wunde**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-316  
E-Mail martin.wunde@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail martin.wunde@bfi.de · www.bfi.de  
Telefon +49 98492-316  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: M.Sc. Martin Wunde

Die aktuellen Ergebnisse stammen aus geförderten Projekten:

**HYDREAMS**

Research Fund for Coal & Steel (RFCS)  
European Commission  
Project ID: 101098480

**H2HotRoll**

Projekträger Jülich (PTJ)  
BMW  
Förderkennzeichen: 03EN2091B

# Produkteigenschaften bei wasserstoffbefeueten Wiedererwärmungsprozessen

Delphine Rèche, Martin Wunde, Bernhart Stranzinger


BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Prozessoptimierung



## Ausgangssituation

- › Wiedererwärmungsöfen werden heute meist mit **Erdgas** betrieben
- › Dekarbonisierung → **zunehmender Einsatz von H<sub>2</sub>**
- › H<sub>2</sub>-Verbrennung verändert die **Ofenatmosphäre** (signifikant höherer H<sub>2</sub>O-Gehalt)

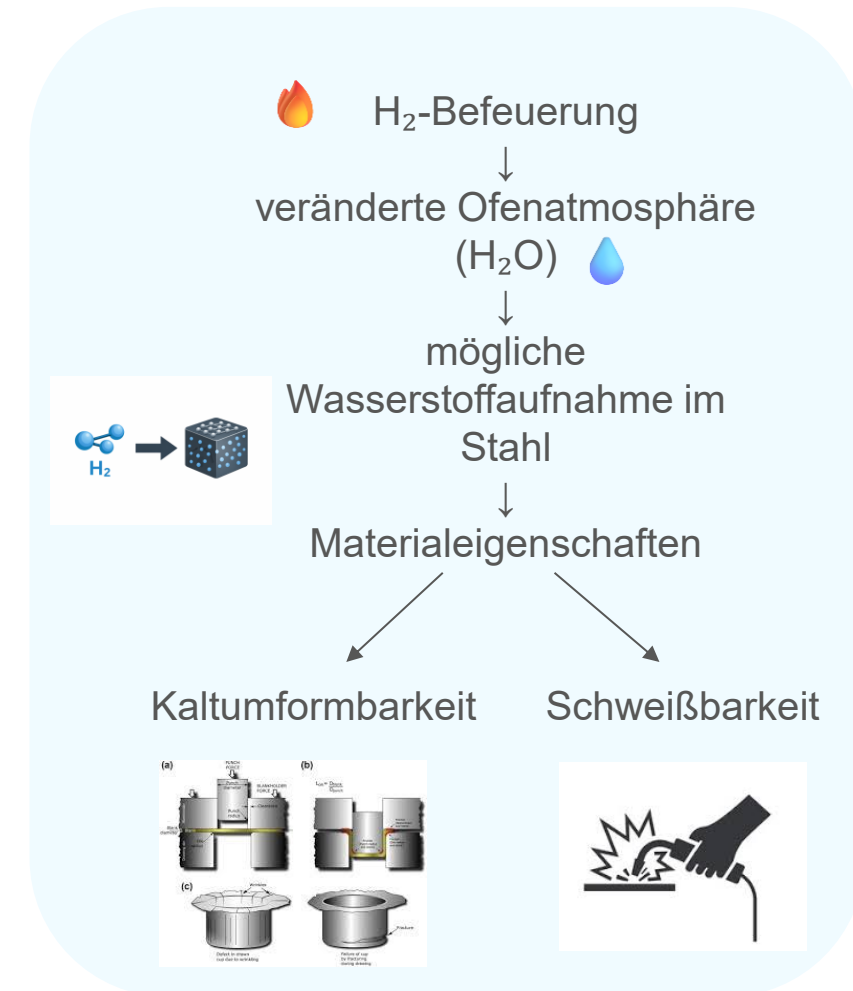
 **Zentrale Frage:** Beeinflusst die wasserstoffbasierte Erwärmung die Qualität der finalen Stahlprodukte?

## › Problemstellung

- › Führt H<sub>2</sub>-Befuerung zu einer kritischen irreversiblen Wasserstoffaufnahme im Stahl?
- › Beeinflusst dies die mechanisch-technologischen Eigenschaften?

## › Ziele

- › Untersuchung der gesamten Prozesskette vom Ofen bis zum Endprodukt.
- › Bewertung der Materialeigenschaften unter H<sub>2</sub>-Bedingungen.
- › Entwicklung wirksamer Abhilfemaßnahmen.
- › Sicherstellung, dass das Endprodukt (Flachstahl/Coil) alle Kundenanforderungen erfüllt.

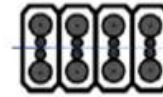
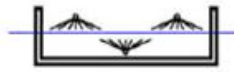


## Arbeitsschritte

- › **H<sub>2</sub>- Szenarien definieren**
  - › 0 bis 100 % H<sub>2</sub>-Befeuierung
- › **Experimentelle & numerische Untersuchungen durchführen**
  - › Ofen, Prozesskette, Bedingungen
- › **Prozesskette bewerten**
  - › Einfluss von Wiedererwärmung bis Endprodukt
- › **Materialeigenschaften analysieren**
  - › Umformbarkeit, Schweißbarkeit, Gefüge, usw.
- › **Risiken bewerten & Maßnahmen ableiten**
  - › Sicherstellung der Produktqualität



Einfluss der H<sub>2</sub>-Befeuierung entlang der Prozesskette



**Thermogravimetrische Analyse**

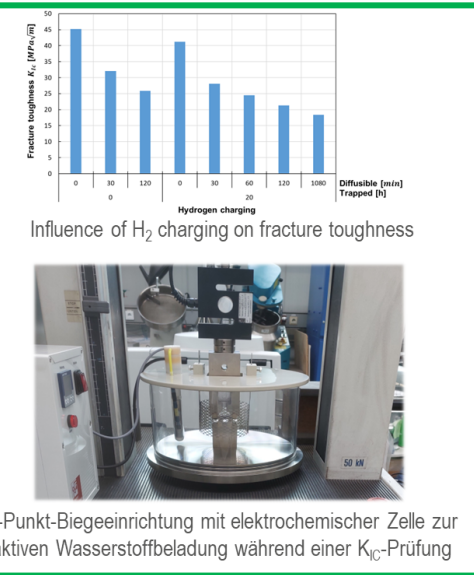
- › Atmosphäre: Beliebige Verbr (Verbrennungsgas)
- › Temperatur:  $\leq 1300\text{ °C}$ , Heizkurve variabel
- › Auswertung: metallographisch, gravimetrisch
- › Probengröße: frei wählbar, bis ca. 2 kg
- › Ofengröße: 20 x 24 x 17 cm
- › Anwendung: Kontinuierliche Prüfung der Entzunderung

**Heiß- und Kaltentzunderungstests**

- › Atmosphäre: Beliebige Verbr (Verbrennungsgas)
- › Temperatur:  $\leq 1300\text{ °C}$ , Heizkurve variabel
- › Auswertung: optisch, Auswertung Infrarot, Auswertung gravimetrisch
- › Probengröße: ca. 150 x 100 x 10 mm bis ca. 2 kg
- › Ofengröße: 20 x 24 x 17 cm
- › Anwendung: Prüfung der Entzunderung

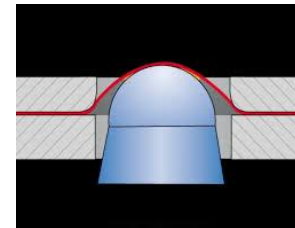
**H<sub>2</sub> induzierte Verringerung der Bruchzähigkeit**

- › Proben: werden entweder durch Industriepartner bereitgestellt oder werden durch das BFI ausgelagert in
  - › Muffelofen oder Thermowaage: ausgelagert in Luft oder Verbrennungsgas von 100 % CH<sub>4</sub> bis 100 % H<sub>2</sub> möglich
  - › Röhrenofen: ausgelagert in reduzierender Atmosphäre bis zu 100 % H<sub>2</sub> oder CO (wenn erforderlich)
- › Temperatur: 20 °C
- › Untersuchung: Verringerung der Bruchzähigkeit durch Wasserstoffversprödung
- › Probengröße: ca. 4 x 8 x 50 mm<sup>3</sup> bis 20 x 40 x 120 mm
- › Anwendungen: Bruchmechanische Untersuchungen an Proben, die

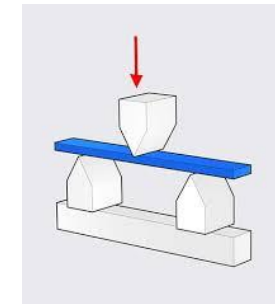


# Experimentelle Bewertung

- › **Befeuerung:** Erwärmung verschiedener Stähle mit unterschiedlichen H<sub>2</sub> Anteil
- › **Oberflächenbewertung:** Oxidation / Zunder
- › **Kaltumformbarkeit:** Durchführung von Umformtests (z. B. 3-Punkt-Biegeversuche, Erichsen Test, usw.)
- › **Schweißbarkeit:** Untersuchung des Einflusses von H<sub>2</sub> in der Wärmeeinflusszone (WEZ)
- › **Gefügeanalyse:** Bewertung der Mikrostruktur nach der thermischen Behandlung



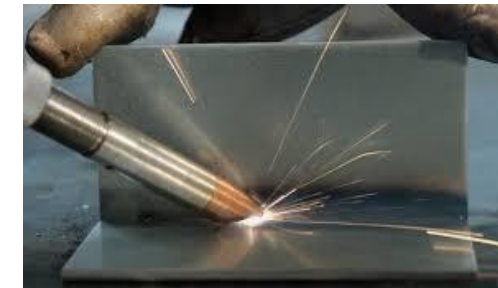
Erichsen-Test



3-Punkt-  
Biegeversuch



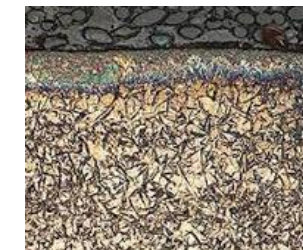
Aufgeheizter Muffelofen



Schweißprozess



Zugversuch



Beispiel von Stahlgefüge

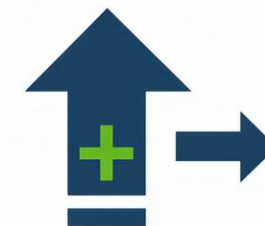
## Nutzen für die Industrie

- › **Risikobewertung:** Vermeidung von Qualitätsverlusten bei der Umstellung auf H<sub>2</sub>.
- › **Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit** durch zertifizierte Produktqualität.
- › **Sichere Transformation:** Datenbasierte Entscheidungsgrundlage für die Umrüstung bestehender Anlagen.
- › **Marktvorteil:** CO<sub>2</sub>-arme Produktion und Positionierung als Vorreiter bei der Produktion von "Green Steel" mit garantierter Performance.



**CO<sub>2</sub>-arme  
Produktion**

Nachhaltigkeit



**Wettbewerbsfähigkeit**

Sichere Transformation



**Qualitätsgarantie**

Produkteigenschaften

**Kontakt: Dr-Ing. Delphine Rèche**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-895  
E-Mail [delphine.reche@bfi.de](mailto:delphine.reche@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [delphine.reche@bfi.de](mailto:delphine.reche@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-895  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dr-Ing. Delphine Rèche

**Kontakt: M.Sc. Martin Wunde**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-316  
E-Mail [martin.wunde@bfi.de](mailto:martin.wunde@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [martin.wunde@bfi.de](mailto:martin.wunde@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-316  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: M.Sc. Martin Wunde

**Kontakt: Dr.-Ing. Bernhart Stranzinger**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-366  
E-Mail [bernhart.stranzinger@bfi.de](mailto:bernhart.stranzinger@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [bernhart.stranzinger@bfi.de](mailto:bernhart.stranzinger@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-366  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dr.-Ing. Bernhart Stranzinger

# Einfluss von Wasserstoff auf die Bruchzähigkeit von Stählen

Tuncer Ümit

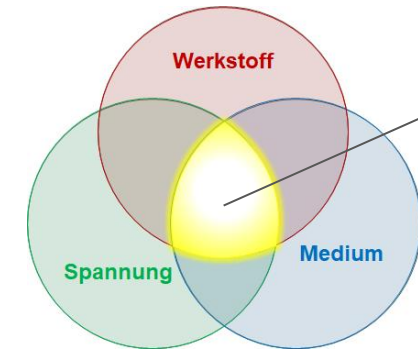
BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Prozessoptimierung



# Wasserstoffversprödung

- › Wasserstoffversprödung = Wasserstoff diffundiert unter bestimmten Bedingungen in einem metallischen Werkstoff  
→ schädigende Wirkung → mechanische Eigenschaften ↓
  - › Voraussetzung:
    - › Wasserstoffquelle und äußere Spannung und/oder Eigenspannungen
- › Viele Beispiele aus der Industrie:
  - › Anlagenbau (Druckbehälter, Pipeline, Reaktoren)
  - › Automobilindustrie
  - › Fertigungsprozesse wie Schweißen, Galvanotechnik und Kaltwalzen
- › Mehrere Möglichkeiten der Materialanalyse zur Wasserstoffversprödung (mit/ohne Bruchmechanik):
  - › Zugversuch, C-Ring-Versuch, Biegeversuch, Autoklaven
  - › In-situ oder ex-situ Wasserstoffbeladung
  - › Mit oder ohne Anwendung der Bruchmechanik

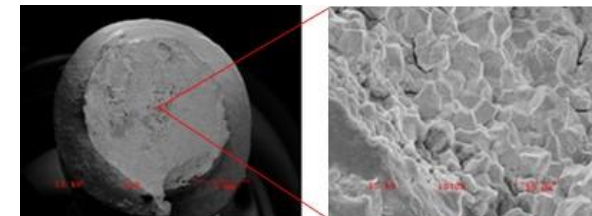


Wasserstoffversprödung

Entscheidende Faktoren  
zur Wasserstoffversprödung



H<sub>2</sub>-induzierter  
Walzenbruch\*



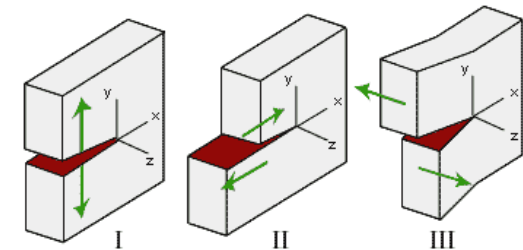
H<sub>2</sub>-induzierter Bruch einer  
hochfesten Schraube\*\*

\*RFCS-Projekt HEROLL; RFSR-CT-2014-00012  
\*\*<https://www.imetllc.com/steel-hydrogen-embrittlement/>



C-Ring-Test (BFI)

- › Bruchmechanik → Betrachtung des Aspektes „Versagen rissbehafteter Bauteile bzw. der Ausbreitung von Rissen unter statischen und dynamischen Belastungen bis zum Bruch“
- › Konzepte:
  - › Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM, besonders für spröde Werkstoffe geeignet)
    - › K-Konzept (geringe Plastifizierung an der Rissfront)  
→ Spannungsintensitätsfaktor K
  - › Fließbruchmechanik (FBM, besonders für duktile Werkstoffe geeignet)
    - › CTOD-Konzept
    - › J-Integral-Konzept
- › Wasserstoffversprödung → Anwendung K-Konzept
  - › Duktile Werkstoffe → Wasserstoffversprödung → Sprödbbruch  
→ Bestimmung des kritischen Spannungsintensitätsfaktor  $K_{Ic}$  (Bruchzähigkeit)
  - › Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  → Widerstand eines Materials gegen instabilen Rissfortschritt → Werkstoffkennwert, bei dem die Rissausbreitung einsetzt



Rissöffnungsarten (I Zugbeanspruchung, II und III Längs- bzw. Querscherrung)\*

\*Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 9. Auflage. Springer-Verlag, Berlin 2005, ISBN 3-540-26107-9

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot Y$$

Allgemeine Formel für  $K_{Ic}$

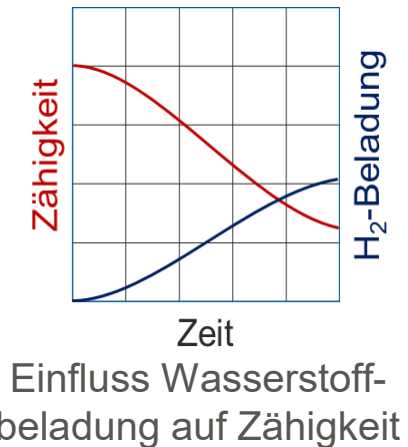
$\sigma$  = anliegende Spannung in [MPa]

$a$  = Risslänge in [m]

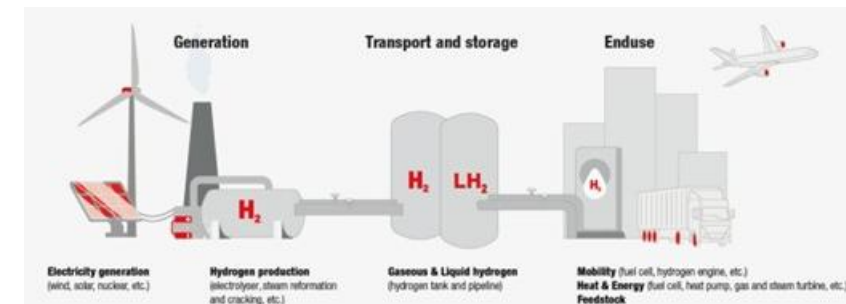
$Y$  = Geometriefaktor [-]

# Steigende Wasserstoffbeladung in technischen Anwendungen

- › Wo kommt H<sub>2</sub> vor:
  - › Während der Stahlherstellung (z.B. Ofenatmosphäre, Beizen)
  - › In der technischen Anwendung (z.B. Kaltwalzen, Pipelines)
    - › Wasserstoff im Gefüge kann mechanische (z.B. Festigkeit, Zähigkeit) und technologische (z.B. Schweißen, Korrosion) Eigenschaften herabsetzen. → Qualitätsverlust
- › Der Bedarf an „grünem“ Wasserstoff in der Industrie (v.a. energieintensive Prozesse) durch die Transformation zu klimaschonenden Technologien wird steigen.
  - › Wasserstoff wird für die Dekarbonisierung, wie z.B. bei der Roheisen- bzw. Stahlherstellung immer wichtiger.
  - › In der Infrastruktur (bestehende und zukünftige): Rohre, Druckbehälter, Armaturen.
  - › Aber: Gefahr der Wasserstoffversprödung bleibt und muss überwacht und minimiert werden!



Einfluss Wasserstoffbeladung auf Zähigkeit



Der Weg des H<sub>2</sub> von der Generierung bis zur Nutzung\*

\*<https://www.zwickroell.com/news-events/webinar-archive/#c207040>

› Titel:

„Auswirkung einer Tiefsttemperaturbehandlung im Wärmebehandlungsprozess von Werkzeugstählen auf Korrosionsbeständigkeit, Maß- und Formhaltigkeit und Bruchzähigkeit“ (Nanocarbide II) – 01.06.2022-31.05.2024

- › IGF-Vorhaben 01IF22366N / P 1632
- › HTM-Veröffentlichung\*

\*Corrosion Resistance and Fracture Toughness of Cryogenic-Treated X153CrMoV12 Tool Steel. / Acar, S.; Ümit, T.; Cui, C. et al.  
In: HTM - Journal of Heat Treatment and Materials, Vol. 79, No. 5, 27.10.2024, p. 230-244

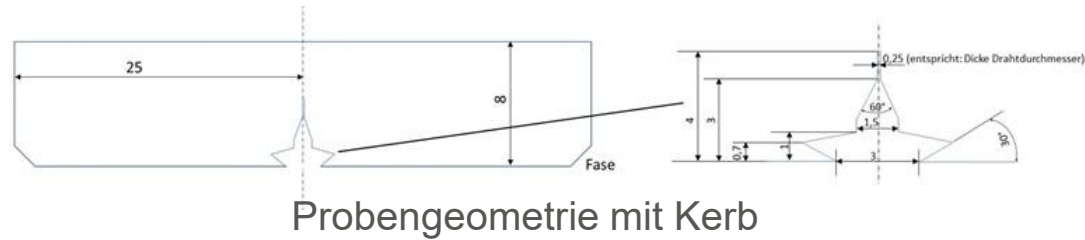
› Titel:

„Clean hydrogen and digital tools for reheating and heat treatment for steel“ (HYDREAMS) – 01.04.2023 - 30.09.2027

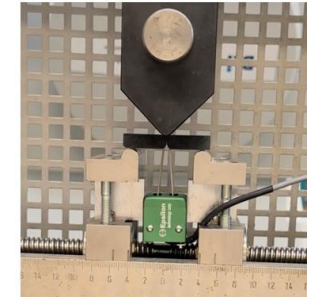
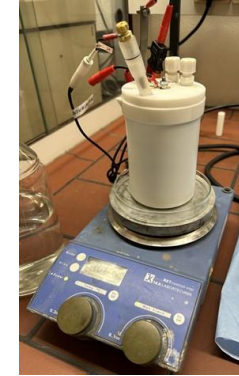
- › RFCS-Projekt 101098480

# Ergebnisse Nanocarbide-II

- › Untersuchung der Bruchzähigkeit unter Wasserstoffeinfluss
  - › Elektrochemische Wasserstoffbeladung
  - › Ex-situ / in-situ Versuche
- › Untersuchungsmethode: K-Konzept (spröde Werkstoffe) mit 3PB-/ 4PB-Versuchen
  - ›  $a_0 = 4 \text{ mm}$ ; SENB-Probe  $4 \times 8 \times 50 \text{ mm}^3$  mit Kerb



- › Werkzeugstahl 1.2379, mit Härtewerten von
  - ›  $Q+C+T_{3 \times 520 \text{ °C}} \rightarrow 699 \text{ HV1}$
  - ›  $Q+T_{3 \times 530 \text{ °C}} \rightarrow 675 \text{ HV1}$



Elektrochemische Messzelle und 3PB-Vorrichtung für ex-situ Versuche (BFI)



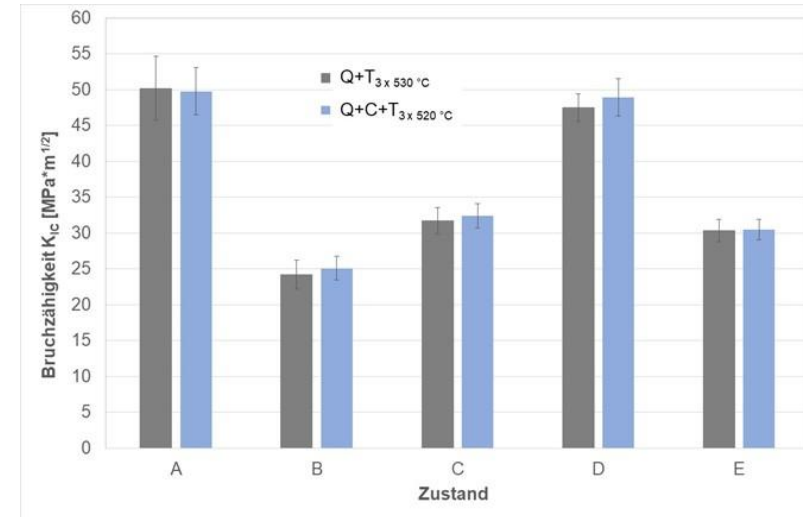
Elektrochemische Messzelle mit 4PB-Vorrichtung für in-situ Versuche (BFI)

# Ergebnisse Nanocarbide-II

- › Ermittlung der Bruchzähigkeit  $K_{IC}$

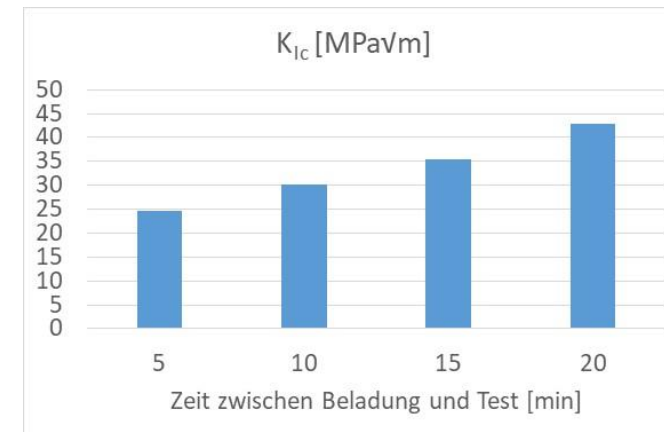
$$K_{IC} = \frac{3,75 F_{\max} S_i}{BW^{3/2}} f_2 \left( \frac{a}{W} \right)$$

- › Wasserstoffbeladung → deutliche Reduzierung der Bruchzähigkeit
- › Nachteil von ex-situ Versuchen: Fehlinterpretation der Ergebnisse → Sicherheits- bzw. Risikofaktor
- › Durchführung von in-situ Versuchen, was bei BFI-Methode gegeben ist
  - › Wasserstoffbeladung durch elektrochemische Messzelle bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung



Zustand	H <sub>2</sub> -Beladung
A	ohne
B	30 min mit anschließendem Versuch bis Bruch
C	zeitgleich bis Bruch
D	20 h mit anschließender Auslagerung (72 h bei 105 °C)
E	Zustand D, zeitgleich bis Bruch

Bruchzähigkeit bei verschiedenen H<sub>2</sub>-Beladungszuständen (in-situ Biegeversuche)

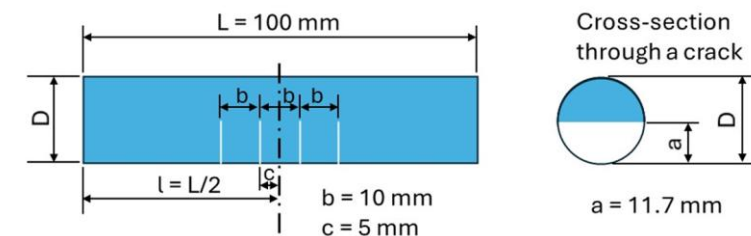


Einfluss der Zeit auf die Bruchzähigkeit (ex-situ Biegeversuche) (Zustand B, Q+T<sub>3</sub> x 530 °C)

- › Untersuchung der Machbarkeit der Substitution von Erdgas durch sauberen Wasserstoff in industriellen thermischen Anlagen der Stahlherstellungsindustrie  
→ Reduzierung von CO<sub>2</sub>
  
- › Für das Projekt wurden mehrere Ziele definiert:
  - › Z. B. Bewertung der Auswirkungen dieser neuen Verbrennungsgasatmosphäre auf Stahlsorten
    - › U. A. Oxidation, Verzunderung, Bruchzähigkeit
    - › 1.8550 (34CrAlNi7-10), 1.2379 (X153CrMoV12), 1.2714 (55NiCrMoV7)
  
- › Ermittlung der Bruchzähigkeit mit dem K-Konzept im 4PB-Versuch
  - ›  $a_0 = 11,7$  mm; zylindrische SENB-Probe mit  $D = 22$  mm und  $L = 100$  mm mit vier Kerben



4PB-Vorrichtung für bruchmechanische Versuche (BFI)



## Probenform für die Untersuchungen

Mehrere Risse erhöhen die statistische Versagenswahrscheinlichkeit, weil lokale Materialinhomogenitäten den Bruch initiieren.

Mehrere Risse erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Versagens an der schwächsten Stelle (geringerer Datenstreuung).

# Ergebnisse HYDREAMS

- › Zwei Ofengasatmosphären mit anschließender Luftabkühlung

- › NG und H<sub>2</sub>

- › Ermittlung der Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  mit vier Kerben

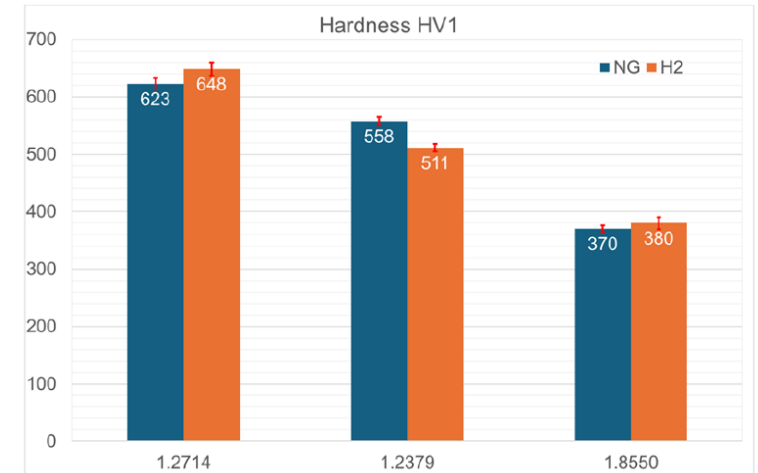
$$K_I = \sigma_m \sqrt{\pi a} \left( 1.04 - 3.64 \frac{a}{D} + 16.86 \left( \frac{a}{D} \right)^2 - 32.59 \left( \frac{a}{D} \right)^3 + 28.41 \left( \frac{a}{D} \right)^4 \right)$$

$$0.0625 \leq a/D \leq 0.625$$

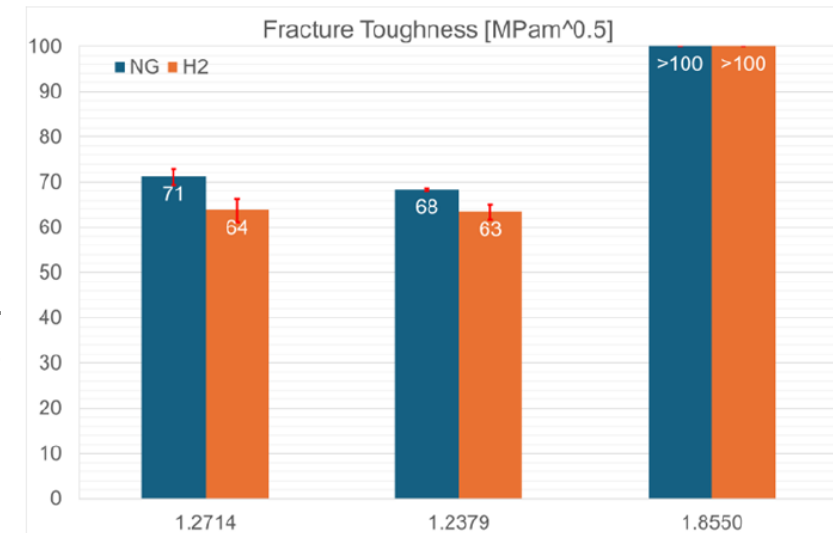
- › H<sub>2</sub>-Atmosphäre: Reduktion der Bruchzähigkeit um ca. 10 % (1.2714) und 7 % (1.2379) gegenüber NG

- › 1.8550: Kein Bruch bis zur maximalen Kraft von 50 kN

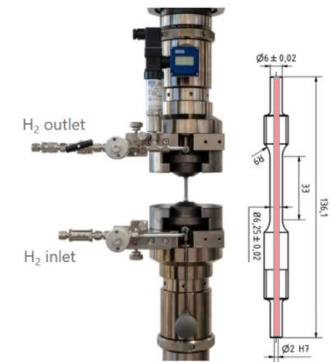
Ergebnisse der Bruch-  
zähigkeitsversuche



Härtewerte [HV1] in Abhängigkeit der Gasatmosphären NG und H<sub>2</sub>



- › Wasserstoff → Stahlschädling → sprödes Verhalten bzw. Materialversagen
- › Wasserstoffversprödung von Stählen muss beobachtet werden
  - › Vor dem Hintergrund eines zukünftig möglichen erhöhten Transportaufkommens auf dem Werksgelände (Rohrleitungen, Druckbehälter, Armaturen, usw.)
- › Folgende Fragestellungen:
  - › Wie kann man den Wasserstoff messen?
    - › Wasserstoffsensoren → Labor und industriell
  - › Was kann man dagegen tun?
    - › Anwendung der Bruchmechanik (Materialanalyse)
    - › Wärmebehandlung, Beschichtungen → z.B. Cryo-Behandlung, NiP-Schichten (Chemisch Nickel), auch CVD- oder PVD-Anwendungen möglich
- › Mögliche Entwicklungsrichtungen (potentielle Projektideen)
  - › Bruchmechanik mit der Hohlprobenmethode
    - › Ertüchtigung der Hohlprobenmethode mit bruchmechanischen in-situ Versuchen unter Druckwasserstoff
  - › Einsatz von NiP-Schichten oder anderen neuen Beschichtungen
  - › Digital unterstütztes Bewertungs- und Sicherheitskonzept, das Messmethodik, Materialcharakterisierung und zustandsabhängige Lebensdauerprognose vereint.



Hohlprobenmethode nach ZwickRoell\*

\*<https://www.zwickroell.com/de/branchen/energie/hohlproben-pruefung-unter-druckwasserstoff/>



**Kontakt: Dipl.-Ing. Tuncer Ümit**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-217  
E-Mail [tuncer.uemit@bfi.de](mailto:tuncer.uemit@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [tuncer.uemit@bfi.de](mailto:tuncer.uemit@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-217  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

# Vielen Dank für Ihr Interesse

Wir laden Sie jetzt zu einem kleinen Imbiss in unser Technikum ein.

Hier haben Sie die Möglichkeit,  
unserer Versuchsstände zu besichtigen.

Ausgewählte Prüfstände sind in der Zeit von 14:00 bis 15:00 Uhr  
durch unsere Wissenschaftler/Techniker besetzt.

