



**TUBAF**

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.



# MODERNE INDUSTRIEOFENANLAGEN ZUR WÄRMEBEHANDLUNG

**Gießerei-Institut | TU Bergakademie Freiberg**

M.Sc. L. Mastaler, Prof. Dr-Ing. G. Wolf, Dr.-Ing. A. Keßler

## Motivation des Projektes



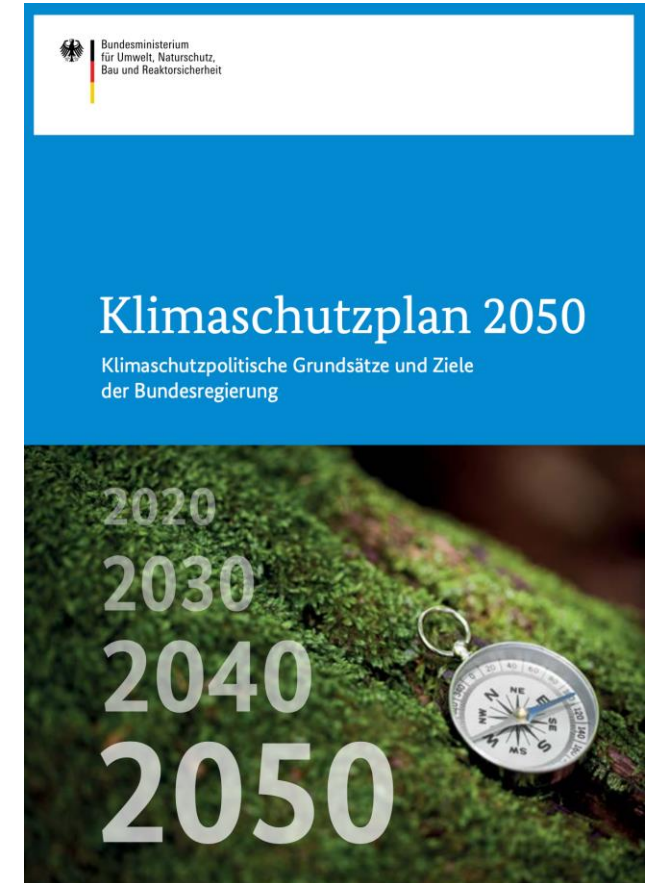
Derzeit hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen bei metallurgischen Betrieben durch den Einsatz von Erdgasbrennern in Wärmebehandlungs- und Wiedererwärmungsöfen.



Ökologische und politische Notwendigkeit einer Transformation der Industrie hin zu CO<sub>2</sub>-neutralen Prozessen.



Zweifel an der Realisierbarkeit der H<sub>2</sub> Strategie in Deutschland.



Quelle: Bundesregierung Deutschland

## Idee und Funktionsweise des UHT-Thermo-Jets



Grundlegende Idee und Ziel sind die Entwicklung einer elektrisch-induktiv beheizten Anlage zur Erzeugung eines Heißgasstromes.

➤ **Ultra High Temperature (UHT) Thermo-Jet**



Technologie als Ersatz für Erdgasbrenner und als elektrische Alternative zu Wasserstoffbrennern.



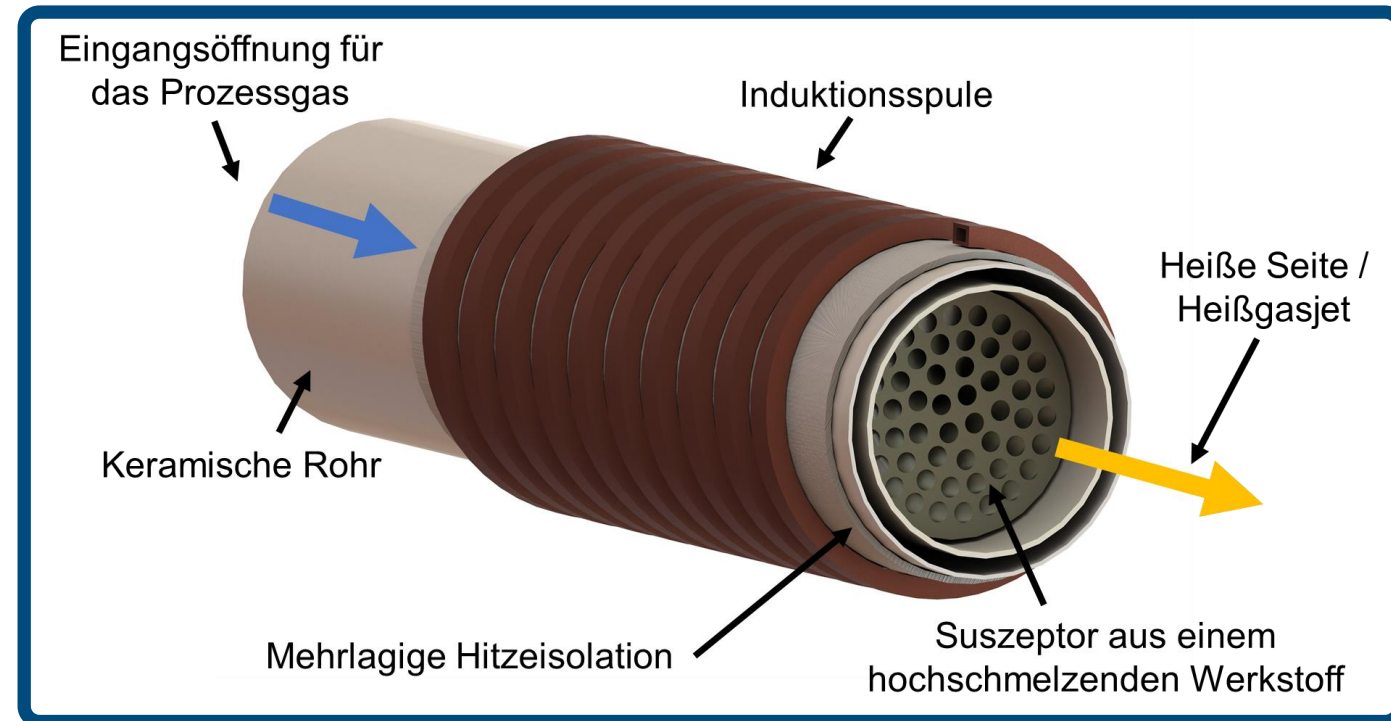
Plug & Play - Einbaumöglichkeit in bestehende Ofenkonzepte.



Bei Einsatz von „grünem Strom“ CO<sub>2</sub>-neutrale Thermoprozesstechnologie.

## Idee und Funktionsweise des UHT-Thermo-Jets

- **UHT-Thermo-Jet:** Prozessgas (bspw. Luft oder ein inertes Gas) durchströmt ein feuerfestes Rohr in dem ein hochschmelzender, oxidationsbeständiger metallischer Suszeptor induktiv durch eine außenliegende Induktionsspule erhitzt wird.
- Das ausströmende Gas bildet eine heiße „Fackel“ bzw. einen Heißgas-Jet.



## Bewertung der Technologie

- + Hoher Energieeintrag und Wirkungsgrad durch induktive Erwärmung.
- + Steuerung der Temperatur über die elektrische Leistung (0-100 %) und den Volumenstrom an Prozessgas stufenlos möglich.
- + Verwendung von verschiedenen Prozessgasen wie Luft, Ofenabgase oder Inertgas.
- + Austrittstemperatur vergleichbar mit denen von Erdgasbrennern zum Erwärmen, Schmelzen und Wärmebehandeln.
- Technologischer Reifegrad.

## Entwicklung und Aufbau eines Versuchsstandes



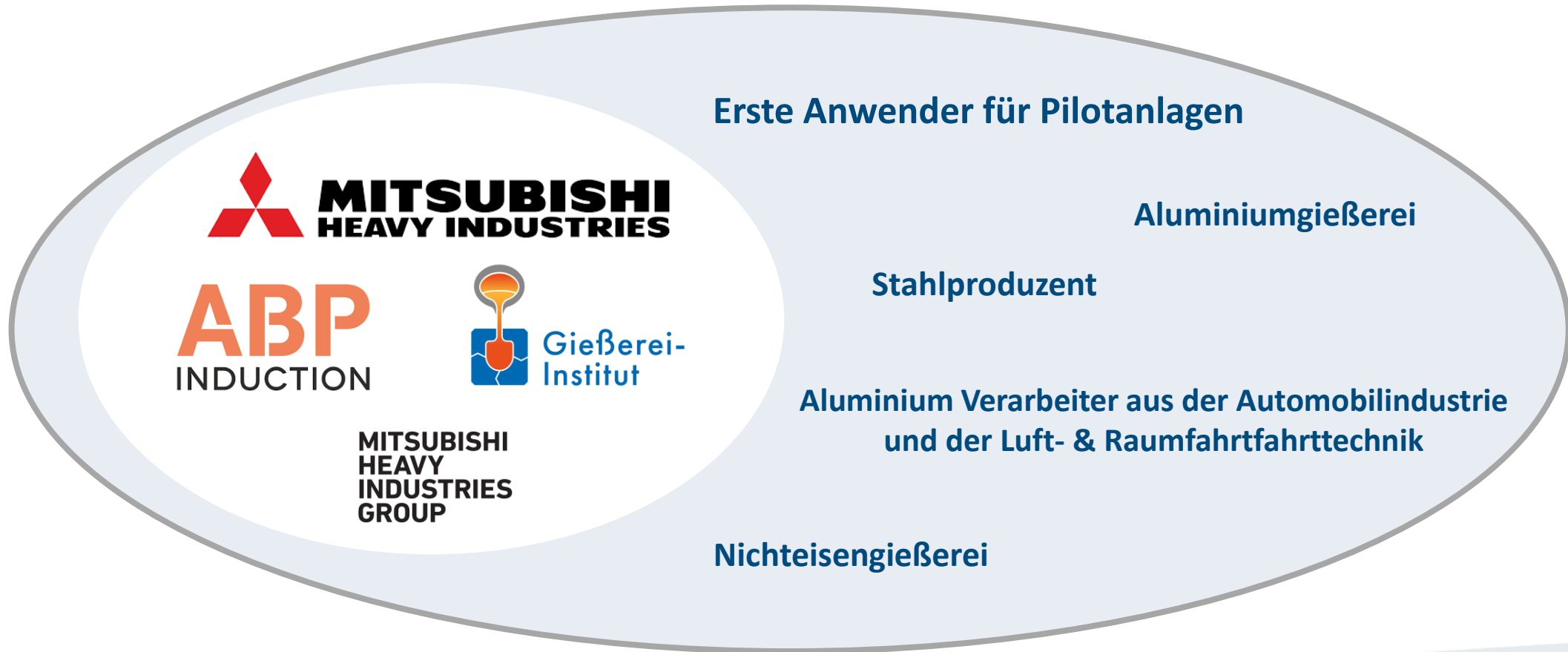
- Numerische Simulation der induktiven Erwärmung und der Wärmeübertragung.
- Konstruktion und Bau eines Versuchsstandes am Gießerei-Institut.
- Aktuell ca. 10-12 kW elektrische Leistung mit Mittelfrequenz.
- Erprobung verschiedener Suszeptoranordnungen und Werkstoffe.

## Schmelzversuche – Proof of Concept



- Aufschmelzen von skalierten Aluminium Masseln (AlSi7Mg0,3).
- Heißgasjet  $>1050\text{ °C}$  und eine Ofenraumtemperatur  $>800\text{ °C}$ .
- **Proof of Concept (TRL 3).**

# Entwicklungskonsortium

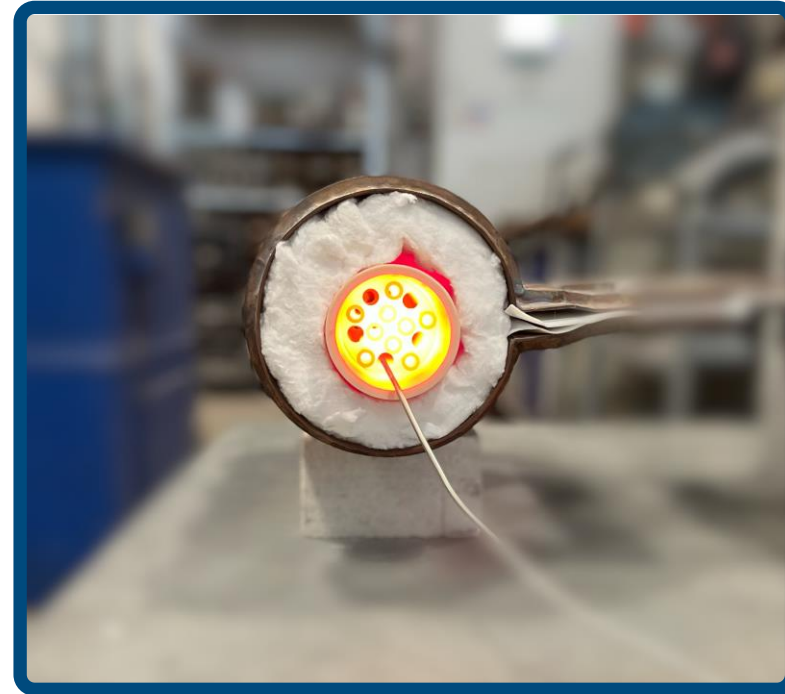




# Skalierung der Technologie zum Industriedemonstrator

Nach dem Proof of Concept und der Validierung der Technologie im Labormaßstab erfolgte der erste Skalierungsschritt.

- Skalierung der Suszeptorgeometrie, der Leistung und des Volumenstroms des Heißgasjets (Prozessgas Luft) um den **Faktor 3**.
- Ca. 30-35 kW Leistung.

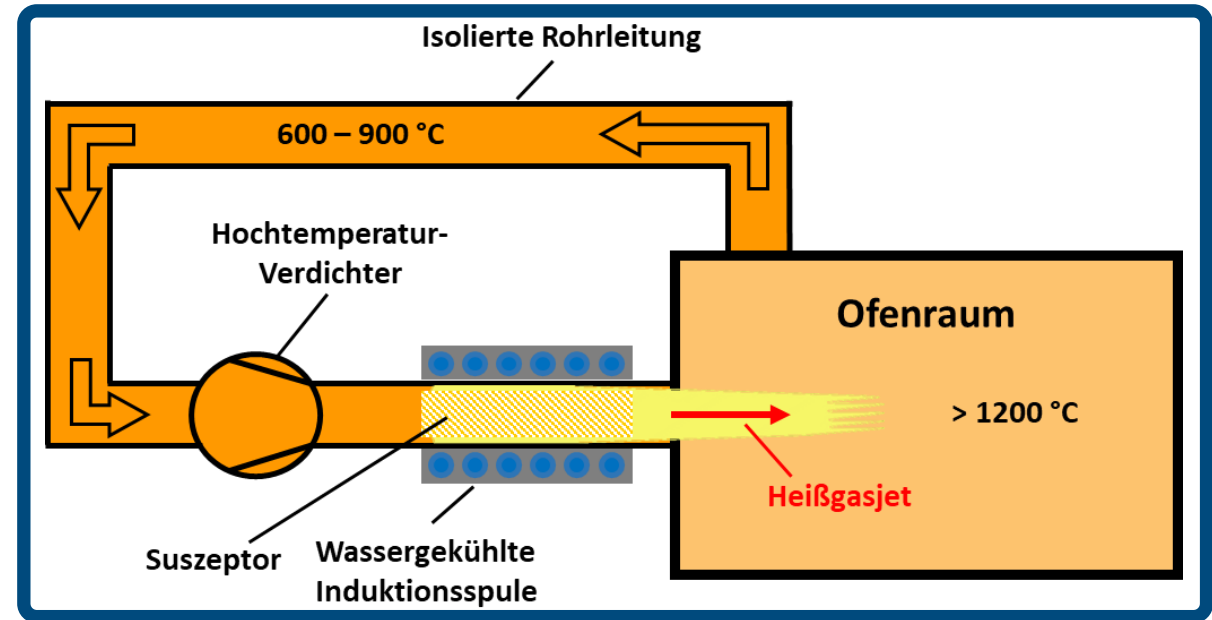


UHT-Thermo-Jet Technologie beim ersten Skalierungstest

## Steigerung des Wirkungsgrades durch geschlossenen Gaskreislauf

Rückführung von heißem Ofengas und Wiedererhitzung im UHT-Thermo-Jet.

- Keine Abgasverluste, unbegrenztes Rezyklieren des Prozessgases im Kreislauf möglich.
- Verbesserung des Wirkungsgrades durch erhöhte Vorwärmtemperatur.
- Erreichung einer qualitativ vorteilhaften, sauerstoffarmen Ofenatmosphäre.
- **Ziel: Zero Emission durch geschlossene Kreisläufe**



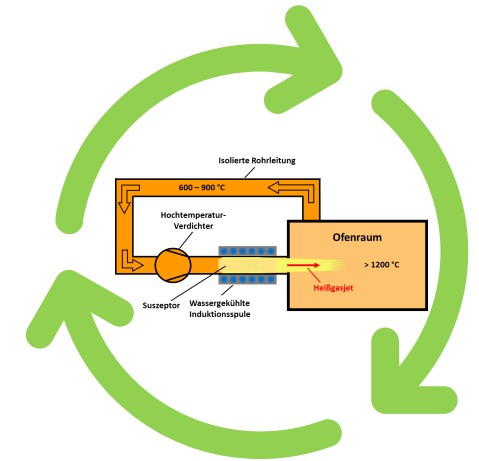
# Verringerung von Verzunderung von Eisenwerkstoffen

Sauerstoffhaltige Ofenatmosphären sorgen bei einer Wärmebehandlung oder Wiedererwärmung von Eisenwerkstoffen für eine Verzunderung (1-2 % des Materials) und somit einen Materialverlust [1].

- Durch eine gezielt eingestellte Ofenatmosphäre kann bei Erwärmungsprozessen sowohl eine qualitative Verbesserung, als auch eine bessere Materialausnutzung erreicht werden.



**Zwei Gussteile links ohne und rechts mit Verzunderung durch eine Wärmebehandlung**



[1] Haapakangas, J.; Riikonen, S.; Airaksinen, S.; Heikkinen, E.-P.; Fabritius, T. Oxide Scale Formation on Low-Carbon Steels in Future Reheating Conditions. *Metals* 2024, 14, 189. <https://doi.org/10.3390/met14020189>

# Erhöhung der Strahlungsemission des Heißgasjets

Die Wärmeübertragung vom Heißgasjet auf ein zu erwärmendes Material wird insbesondere durch die erzwungene Konvektion und die Wärmestrahlung beeinflusst.

- Großer Einfluss der Wärmestrahlung auf den übertragenen Wärmestrom  $\dot{Q}$
- Ziel ist die Erhöhung der Strahlungsemission des Heißgasjets durch:
  - **Auswahl der Prozessgasmischung**
  - **Zugabe von Additiven**

**Wärmestrom für Konvektion nach Fourierschem Gesetz [2]**

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{Prozessgas}} - T_{\text{Aufheizgut}})$$

**Wärmestrom für Wärmestrahlung nach Stefan-Boltzmann-Gesetz [2]**

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{\text{Prozessgas}}^4$$

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient  
 $\varepsilon$  = Emissionsgrad

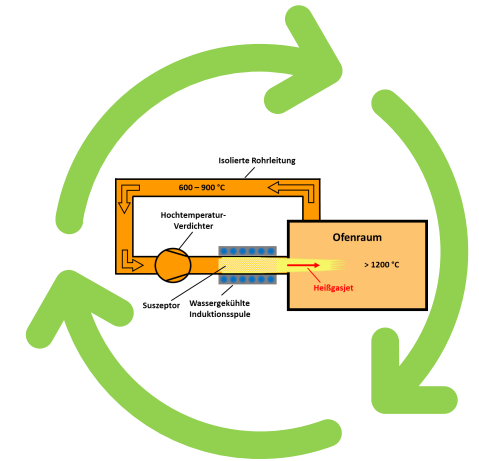
$A$  = Fläche / Oberfläche  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmann-Konstante

[2] VDI Wärmetlas, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013

## Erhöhung der Strahlungsemission des Heißgasjets

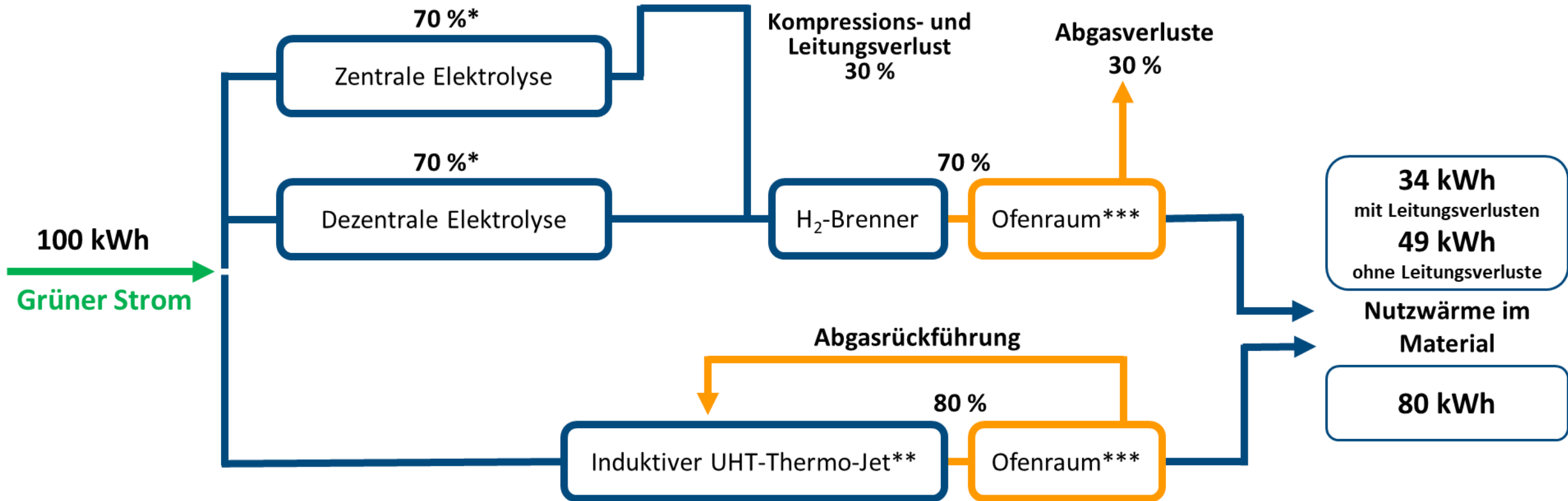
Erhöhung der Strahlungsemission durch:

- Verwendung von Gasmischungen mit vorzugsweise überwiegend dreiatomigen Gasen wie  $\text{H}_2\text{O}$  oder  $\text{CO}_2$  als gute selektive Strahler zur Emittierung einer Wärmestrahlung.
- Zugabe von geringen Mengen (1-3 %)  $\text{CO}_2$ -neutralem Biopropan oder von  $\text{H}_2$  zur Erzeugung eines fackelähnlichen Heißgasjets mit Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich.



**Verschiedene Dotierungen  
des Prozessgases im  
Ofenraum zur Erzeugung  
einer Fackel Strahlung im  
infraroten Wellenbereich**

# Ausblick Wirkungsgrad im Vergleich zu H2



\* Wirkungsgrad der Next Generation Elektrolysen

\*\* konservative Betrachtung

\*\*\* Strahlungsverluste des Ofenraums werden vernachlässigt

## Weitere Einsatzmöglichkeiten zur Dekarbonisierung



## Next steps

### In 2024

- Inbetriebnahme einer neuen Versuchshalle in Freiberg am 29.05.2024.
- Bis Herbst 2024, Bau eines industriellen Prototyps (Leistung ~ 200 kW).
- Aufbau eines Leistungsprüfstandes bis 250 kW.
- Geplante erste Transfers in industrielle Anwendungen mit verschiedenen Projektpartnern.

### Ab 2025 (geplant)

- Erste rein kommerzielle Anlagen des UHT-Thermo-Jets bis 500 kW verfügbar.
- Folgend weitere Skalierung in die 2 MW Leistungsklasse.



## Zusammenfassung

- Entwicklung einer elektrisch-induktiven Thermoprozesstechnologie zur Erhitzung beliebiger Prozessgase von der Idee bis zum Proof of Concept und Test der ersten Skalierung von 10 auf 30 kW (TRL 4-5).
- Skalierung der Technologie durch die TU Freiberg, Mitsubishi Heavy Industries und ABP Induction und weiteren Partnern.
  - Geplant ist für Mitte 2024 ein Industriedemonstrator mit ~ 200 kW Leistung am Gießerei-Institut (TRL 6-7).



Sichtbarer Heißgasjet des UHT-Thermo-Jets

**Glück Auf!**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

