

# DER LANGE WEG ZUR CO<sub>2</sub>-NEUTRALEN GLASPRODUKTION

Übergreifendes Forschungsseminar Kreislaufwirtschaft

03.05.2024

Dr.-Ing. Ralph Behrend, Dr.-Ing. Sven Eckart  
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik  
Professur für Gas- und Wärmetechnische Anlagen



GAS- UND  
WÄRMETECHNISCHE  
ANLAGEN

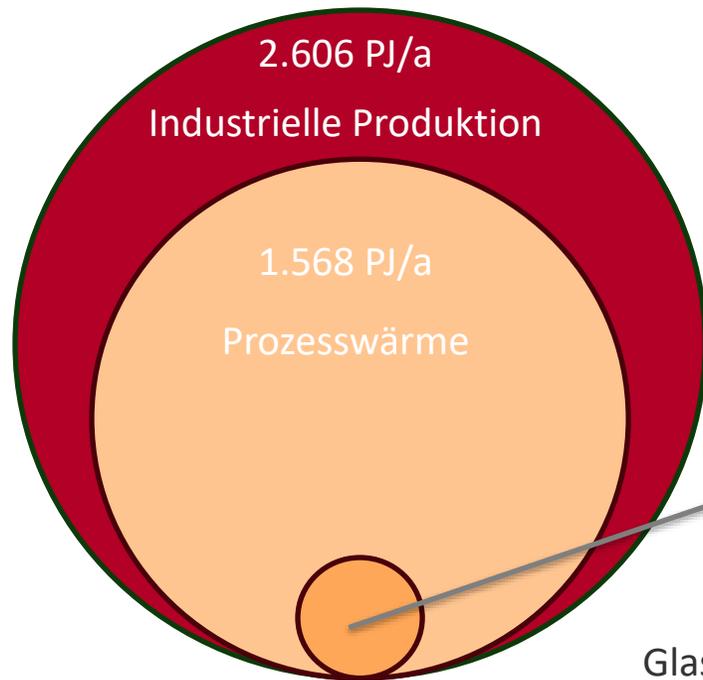
# Agenda

1. Motivation
2. Glasherstellung
3. Mögliche Ansatzpunkte
4. Aktuelle Forschung: Elektrifizierung durch Mikrowellen
5. Aktuelle Forschung: Wasserstoff-Sauerstoffbrenner
6. Grenzen der CO<sub>2</sub>-Einsparung
7. Zusammenfassung und Ausblick



# Einleitung

Globales Ziel: CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2045



Glas- u. Keramik: 85 PJ/a

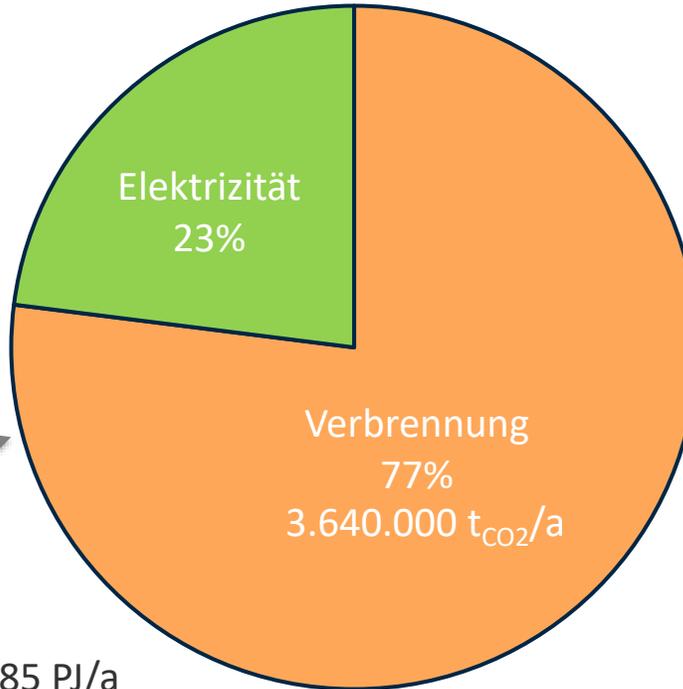
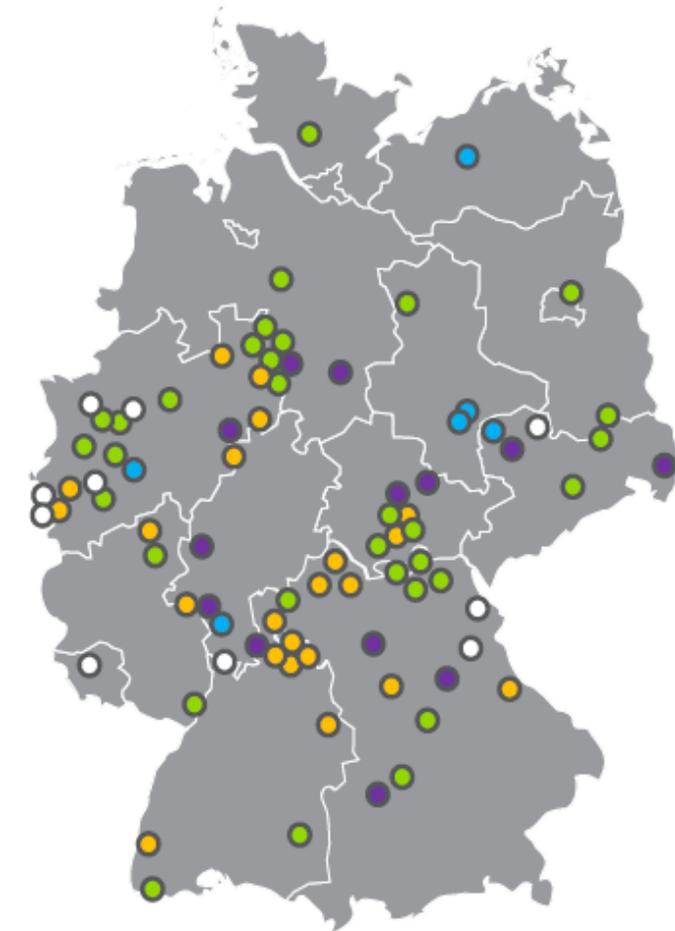


Abb. nach [1]

Problemlösung: Dekarbonisierung der Glasherstellung durch **Elektrifizierung mit Mikrowellen** oder **Wasserstoffverbrennung** und **Recycling**



- Behälterglas
- Flachglas
- Spezialglas
- Glasfasern
- Glasverarbeitung

Abb. nach Navigant Energy Germany

# Glasherstellung | Überblick

- Schmelztemperaturen 1200 ... 1700°C
- Gemengebestandteile
  - 60% Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ )
  - Kalk/ Dolomit ( $\text{CaCO}_3$ /  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ )
  - Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
  - Sulfate
  - Scherben (Anteil kann variieren, bis 80%)
- Prozessschritte
  - Gemengeeinlage
  - Rauhschmelze (Schmelzen und Homogenisieren)
  - Läuterung (Ausgasen)
  - Konditionierung/ Abstehen (Temperatureinstellung)

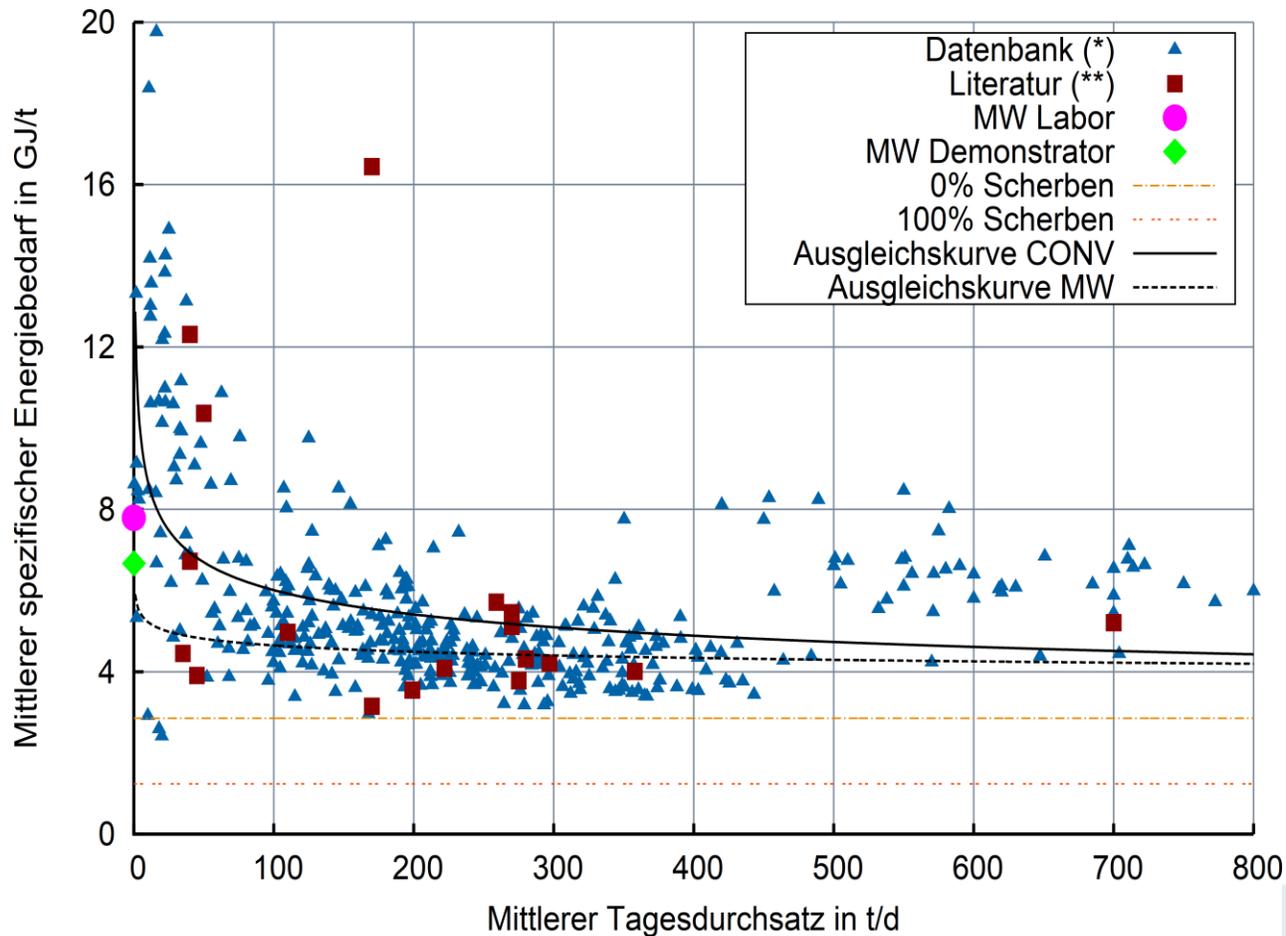


Plunger an einer Wanne für Behälterglas



Glasflaschen nach dem Entformen

# Glasherstellung | Energiebedarf für den Schmelzprozess



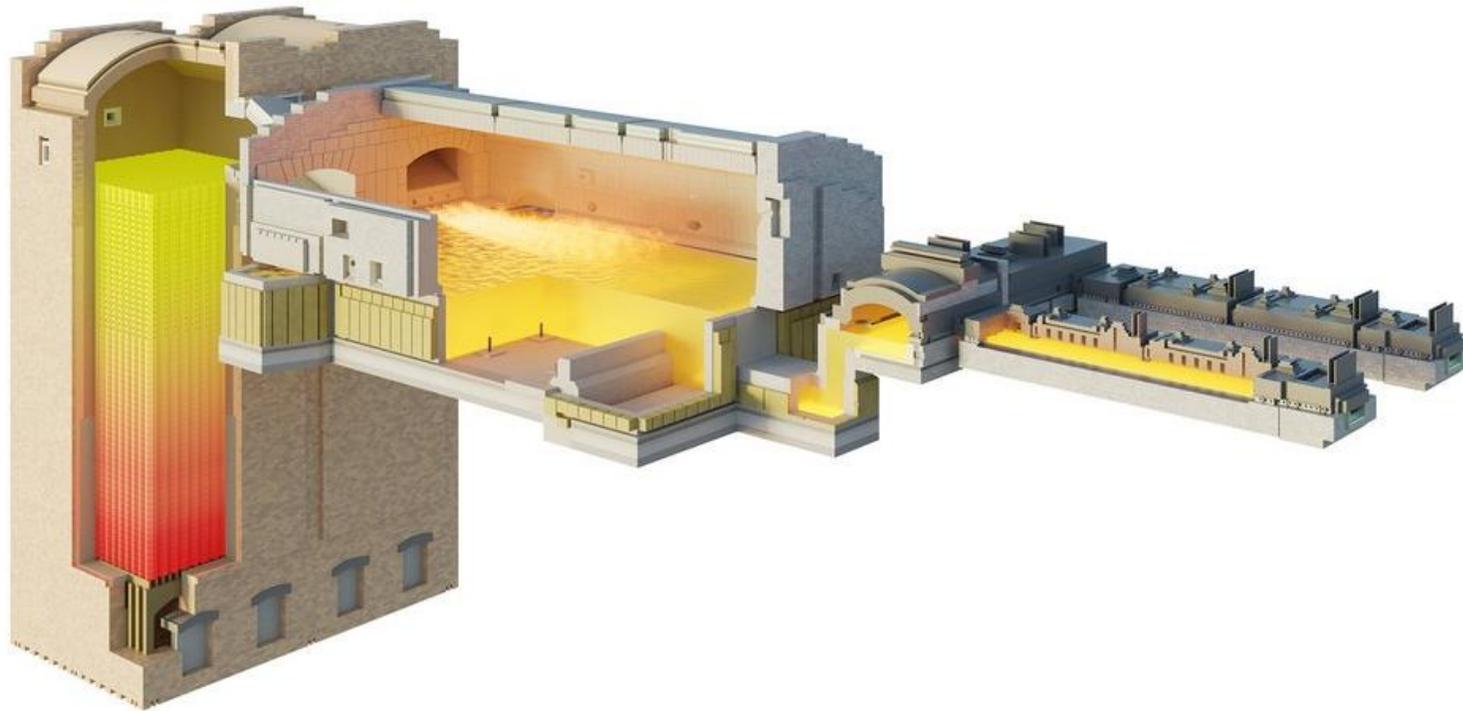
Stark unterschiedliche  
Glasschmelzprozesse durch

- Glasart und -produkt
- Beheizungsart
- Ofenart
- Durchsatz
- Scherbeneinsatz
- ...

Spezifischer Energiebedarf für Glasschmelzprozesse. Quelle: Dorn et. al. UWF, 2016

# Glasherstellung | Technologie (Auswahl)

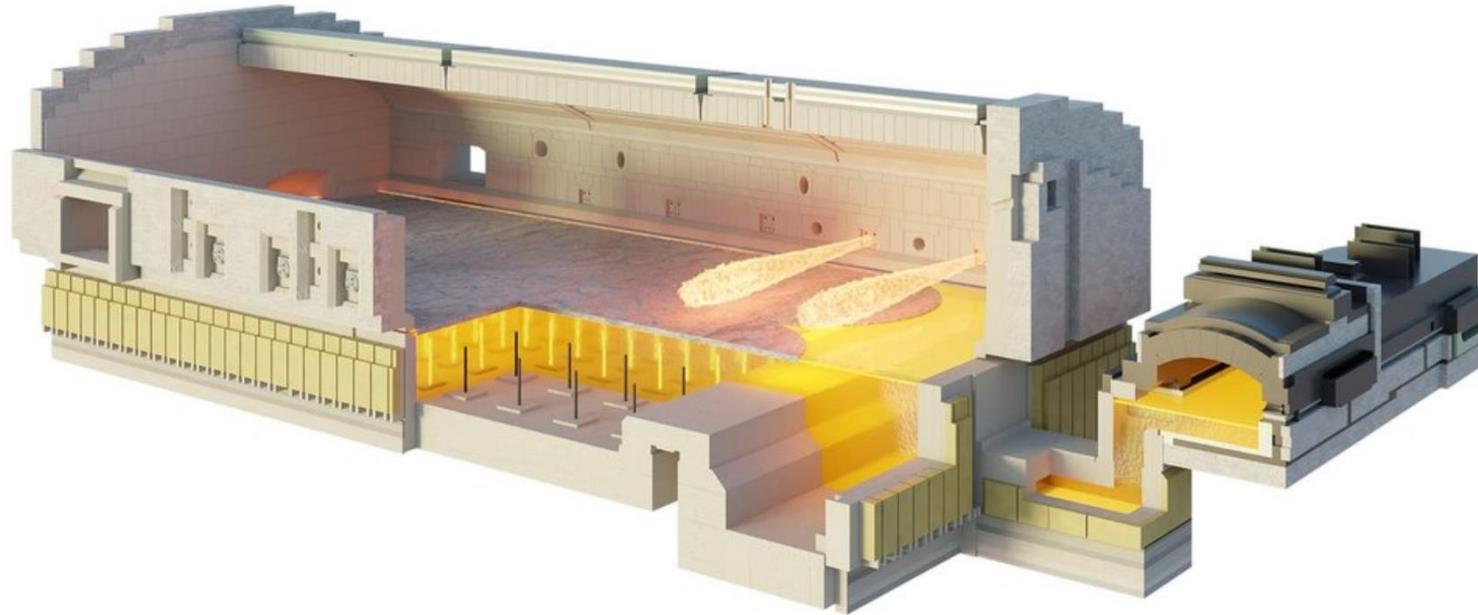
- 30...500 t/d
- 35% elektrische Energie



## U-Flammen Schmelzwanne.

Quelle: Horn Glass (<https://www.hornglass.com/de/produkte/schmelzwannen-und-ausruestung/u-flammenwannen>)

# Glasherstellung | Technologie (Auswahl)

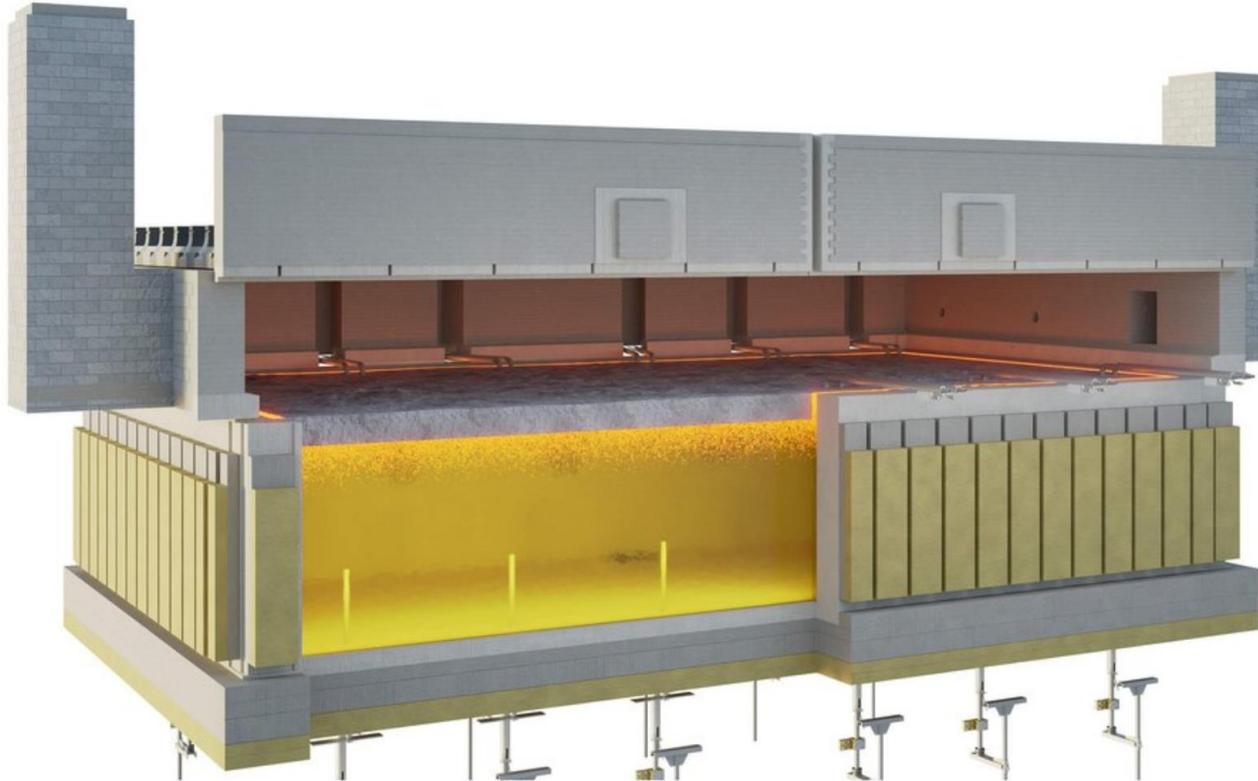


50...750 t/d  
50% elektrische Energie  
Konzepte bis 80% elektrisch in  
Entwicklung

## Querbeheizte Schmelzwanne mit hohem Boostanteil.

Quelle: Horn Glass (<https://www.hornglass.com/de/produkte/schmelzwannen-und-ausruestung/hybridwannen>)

# Glasherstellung | Technologie (Auswahl)



- 5...200 t/d
- 100% elektrische Energie
- **Nur für bestimmte Glasqualitäten geeignet**
- **Größenlimitierung**

## Vollelektrische Schmelzwanne.

Quelle: Horn Glass (<https://www.hornglass.com/de/produkte/schmelzwannen-und-ausruestung/hybridwannen>)

# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung

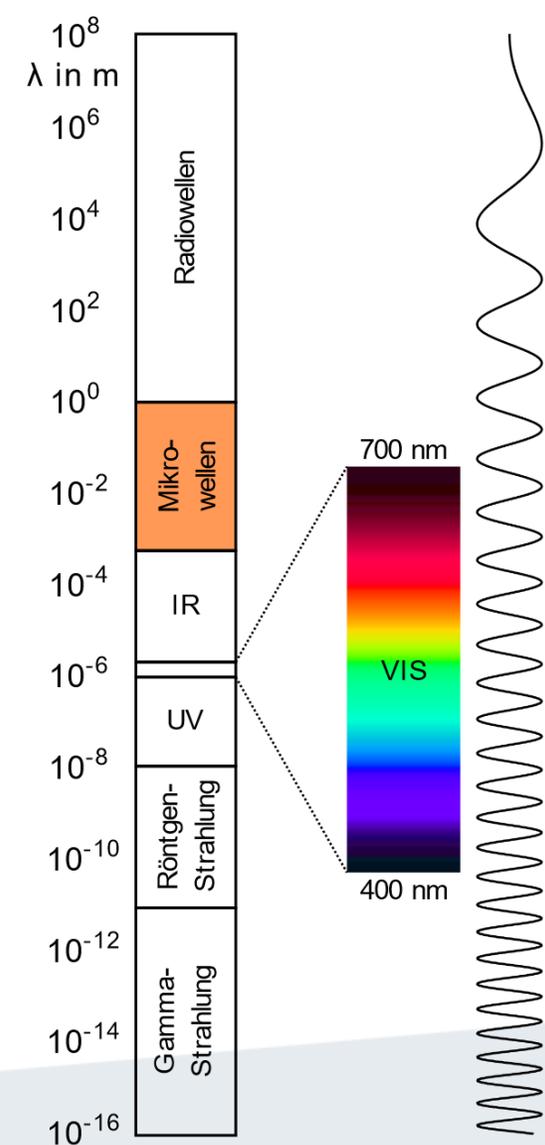
- Energieeffizienz erhöhen/ Verluste verringern → schwerer Weg, schon viel getan
- Glasmenge anpassen → Verzicht auf Carbonate, erhöhter Scherbenanteil → laufende Forschung am IGT, bei Fa. Schott etc.
- Andere Formen der elektrischen Energie verwenden → Mikrowellen statt Elektroden
- Erdgas durch Wasserstoff ersetzen

# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung

- Energieeffizienz erhöhen/ Verluste verringern → schwerer Weg, schon viel getan
- Glasmenge anpassen → Verzicht auf Carbonate, erhöhter Scherbenanteil → laufende Forschung am IGT, bei Fa. Schott etc.
- Andere Formen der elektrischen Energie verwenden → **Mikrowellen statt Elektroden**
- Erdgas durch Wasserstoff ersetzen

# Mikrowellen | Grundlagen

- elektromagnetische Wellen
  - $f = 0,3 \dots 300$  GHz
  - $\lambda = 1 \text{ m} \dots 1 \text{ mm}$
- nutzbare Frequenzbänder (ISM Frequenzen)
  - 915 MHz
  - 2,45 GHz
- werden reflektiert, transmittiert und absorbiert



Elektromagnetisches Spektrum [2]

# Mikrowellenerwärmung | Grundlagen

- Permittivität (dielektrische Materialeigenschaft)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r''$$

- Absorbierte Leistung

$$p = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E_i^2$$

- Eindringtiefe

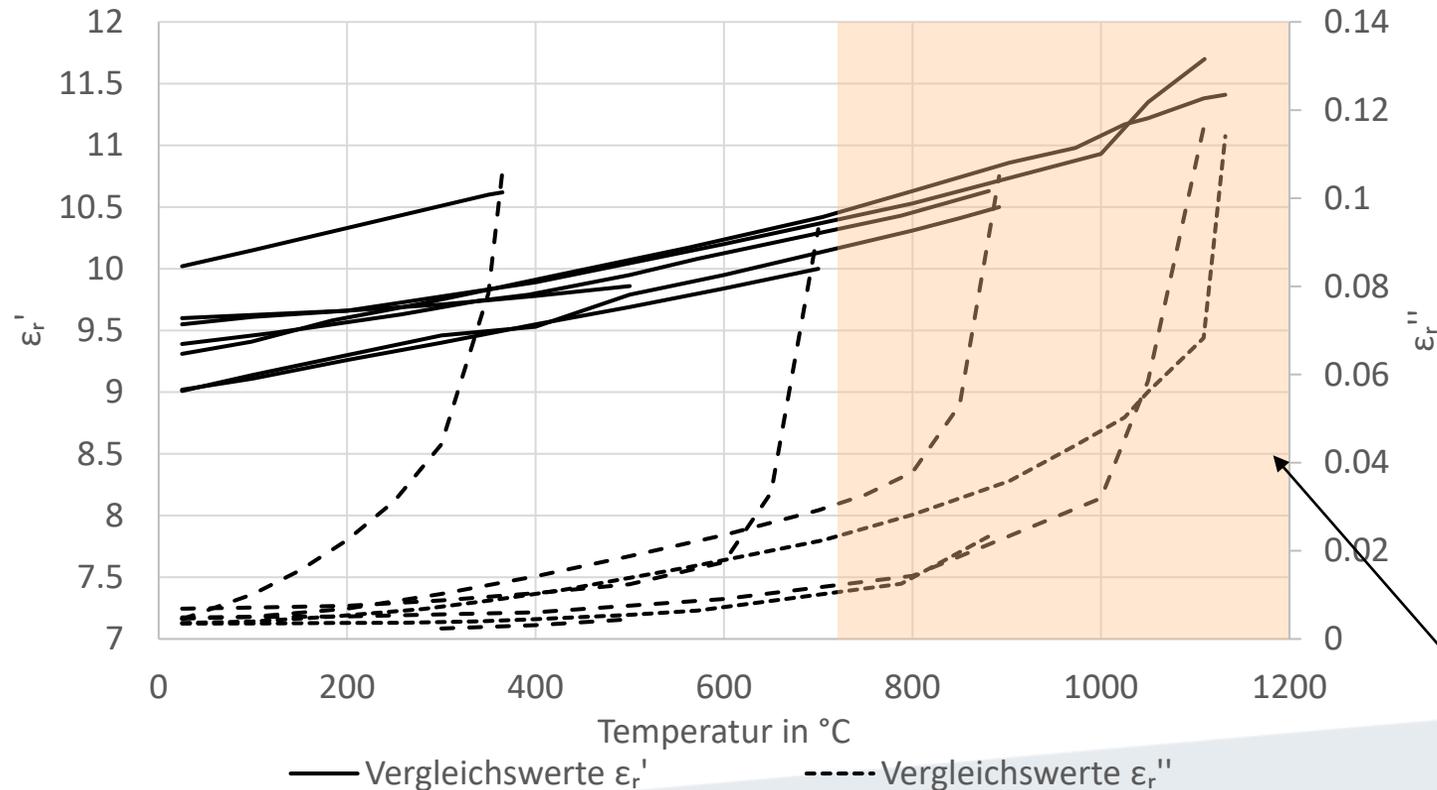
$$D_p \approx \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_r'}}{2\pi \varepsilon_r''}$$

Abhängig von Material,  
Temperatur, Dichte, Frequenz,  
Materialkonfiguration, Korngröße

Symbol	Bezeichnung
$f$	Frequenz
$E_i$	elektrische Feldstärke
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_r'$	Realteil der Permittivität „Speicherfähigkeit“
$\varepsilon_r''$	Imaginärteil der Permittivität „Umwandlung in Wärme“
$\lambda_0$	Wellenlänge im freien Raum

# Dielektrische Permittivität | Grundlagen

Komplexe Permittivität  $\epsilon_r$ : Funktion von Material, Temperatur, Dichte, Frequenz, Konfiguration und Korngröße



- Variation in
  - Reinheit (94...99,5%)
  - Messfrequenz (2,9...3,8 GHz)
  - Dichte 3,66 ... 3,77 g/cm<sup>3</sup>
- plötzliche starke Änderungen bei  $\epsilon_r''$  um bis zu drei Größenordnungen

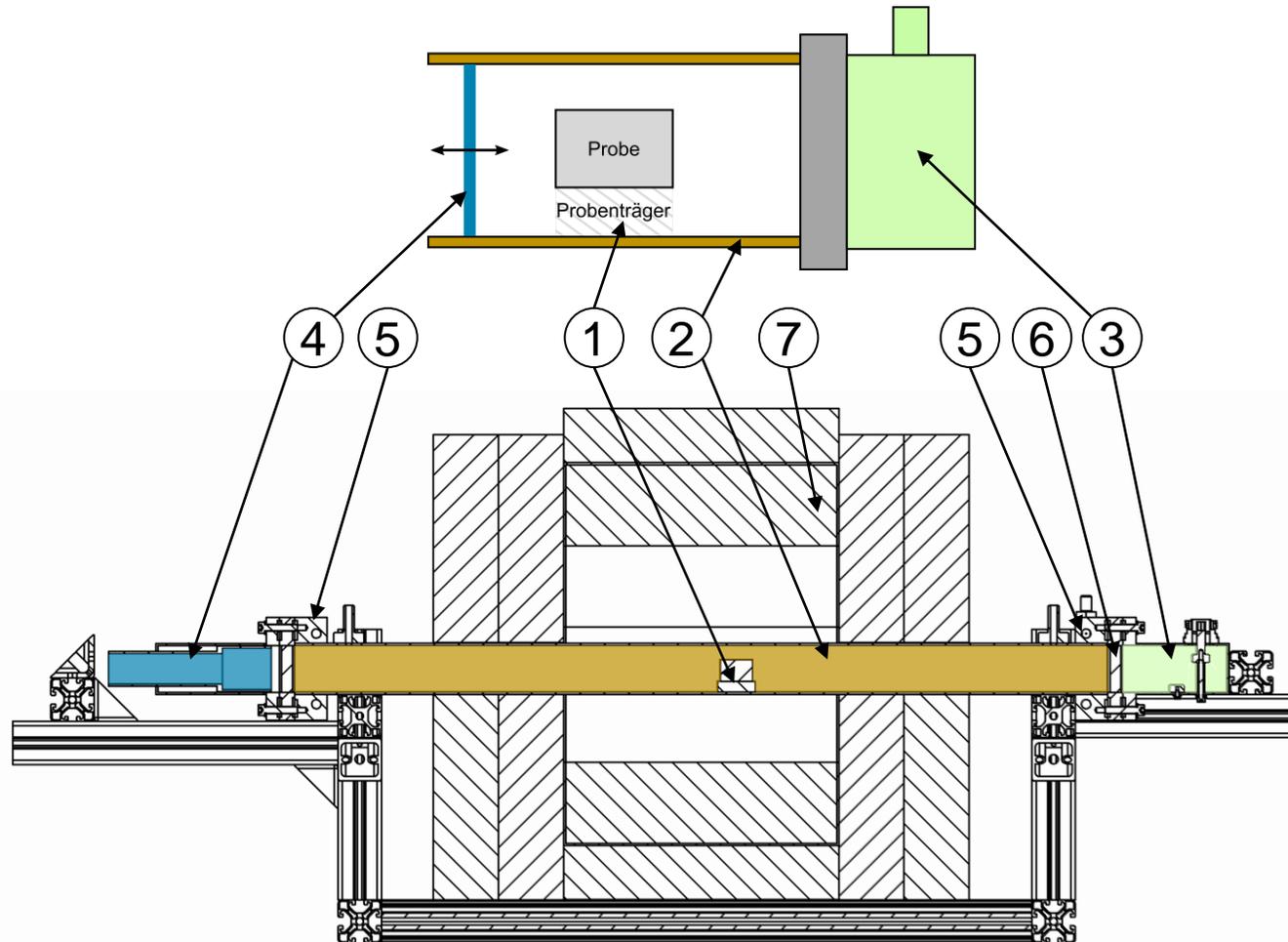


Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Proben

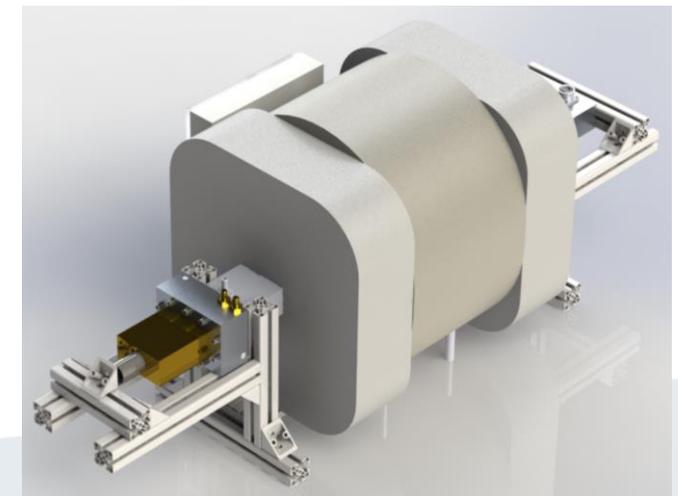
Relevanter Messbereich für Glas

Dielektrische Eigenschaften von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Literaturwerte [3]

# Hochtemperaturmesssystem für dielektrische Eigenschaften



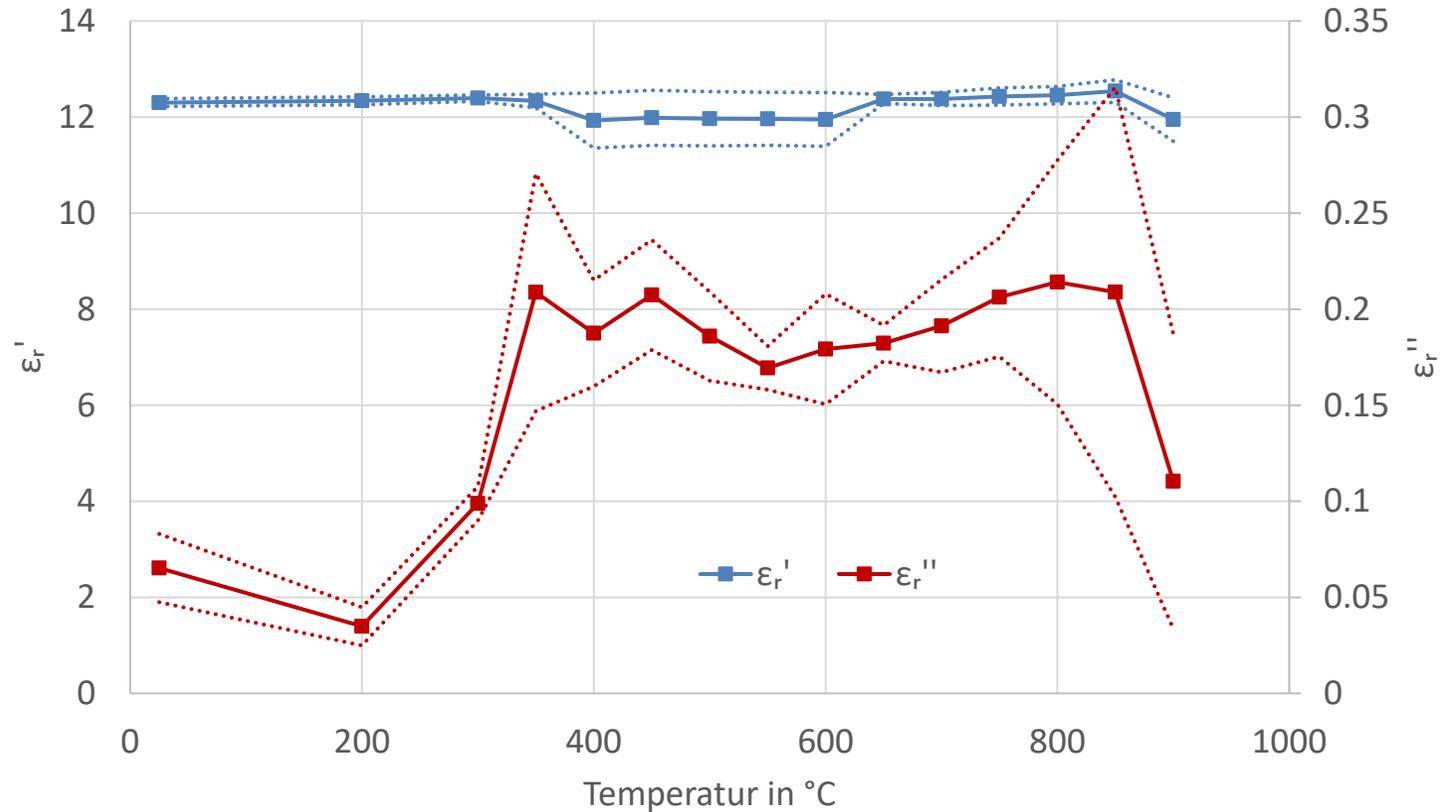
- 1: Probe und Probenträger
- 2: Hohlleiter
- 3: Hohlleiter-Koaxialkabel-Übergang
- 4: Kurzschlussschieber
- 5: wassergekühlter Flansch
- 6: Teflonfenster
- 7: Wärmedämmung und Heizer



Renderdarstellung des Messsystems

Baugruppendarstellung des Messsystems

# Dielektrische Eigenschaften | Alumosilikat-Glasgemenge

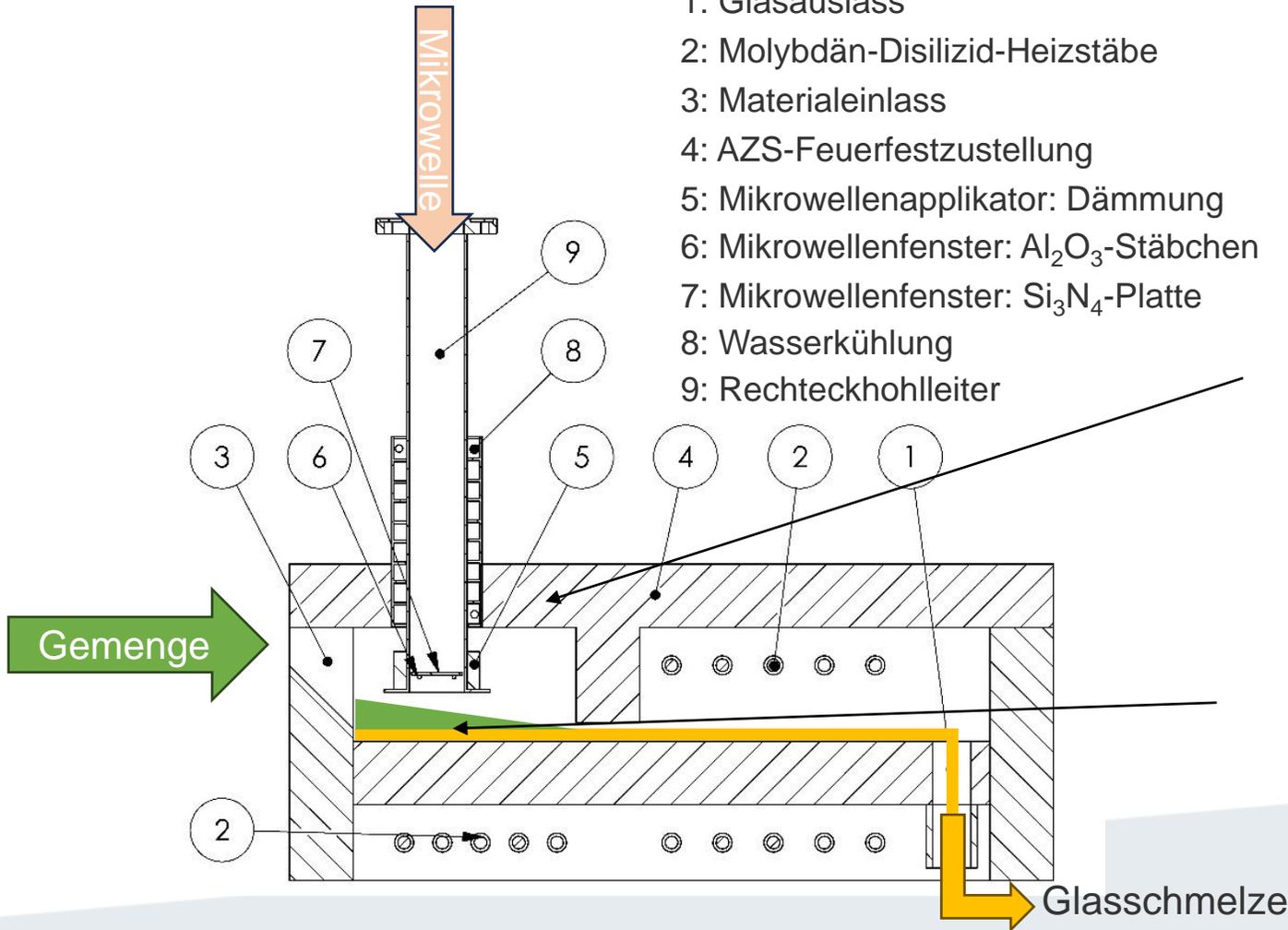


- Anstieg  $\epsilon_r''$  ab 350°C
- Ausgasung ab 400°C
- Sinterung ab 850°C
- Große Abweichungen durch inhomogene Mischung

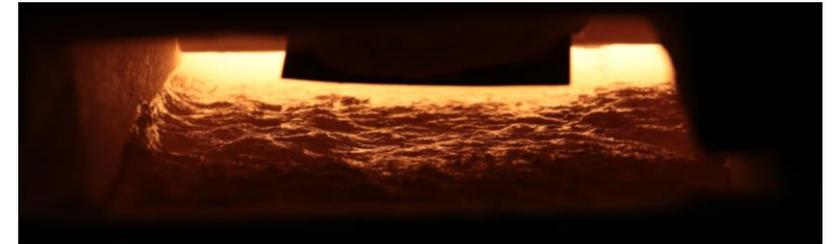
Dielektrische Messung für Alumosilikatglas-gemenge im Bornitrid-Tiegel.  
Gestrichelte Linie: Standardabweichung

# Übertragung auf einen Demonstrator

- 1: Glasauslass
- 2: Molybdän-Disilizid-Heizstäbe
- 3: Materialeinlass
- 4: AZS-Feuerfestzustellung
- 5: Mikrowellenapplikator: Dämmung
- 6: Mikrowellenfenster: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Stäbchen
- 7: Mikrowellenfenster: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Platte
- 8: Wasserkühlung
- 9: Rechteckhohlleiter



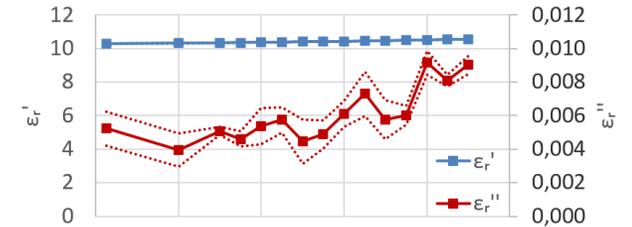
Skizze eines mikrowellengestützten Flachbettschmelzers



Flachbettschmelzer

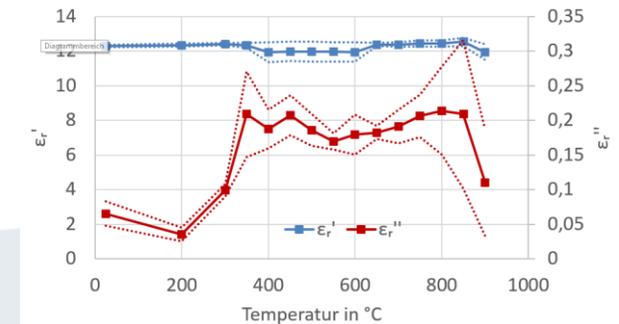
$$D_p \approx \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r'}}{2\pi \epsilon_r''}$$

Eindringtiefe



$$p = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' E_i^2$$

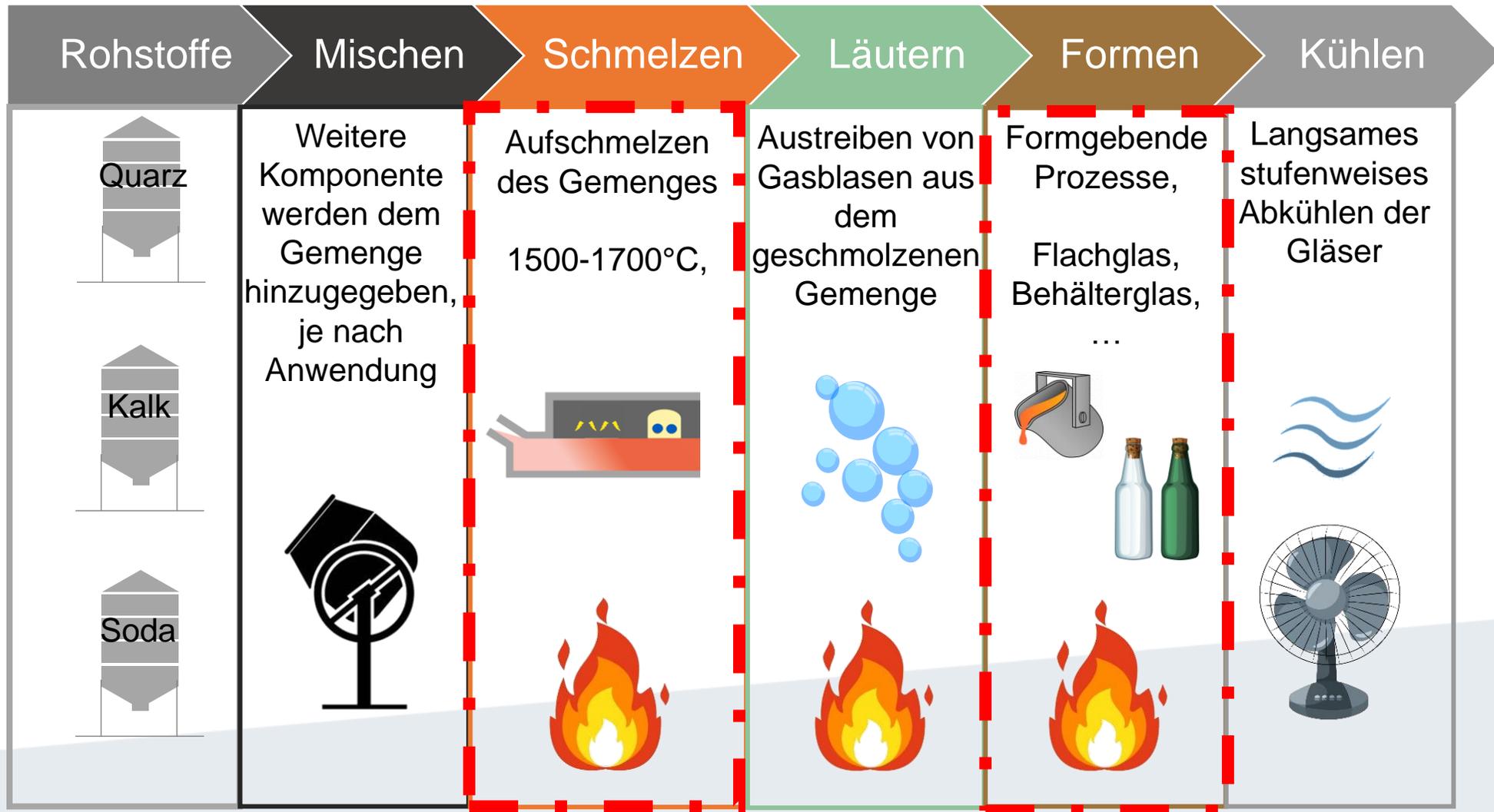
absorbierte Leistung



# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung

- Energieeffizienz erhöhen/ Verluste verringern → schwerer Weg, schon viel getan
- Glasmenge anpassen → Verzicht auf Carbonate, erhöhter Scherbenanteil → laufende Forschung am IGT, bei Fa. Schott etc.
- Andere Formen der elektrischen Energie verwenden → Mikrowellen statt Elektroden
- **Erdgas durch Wasserstoff ersetzen**

# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung



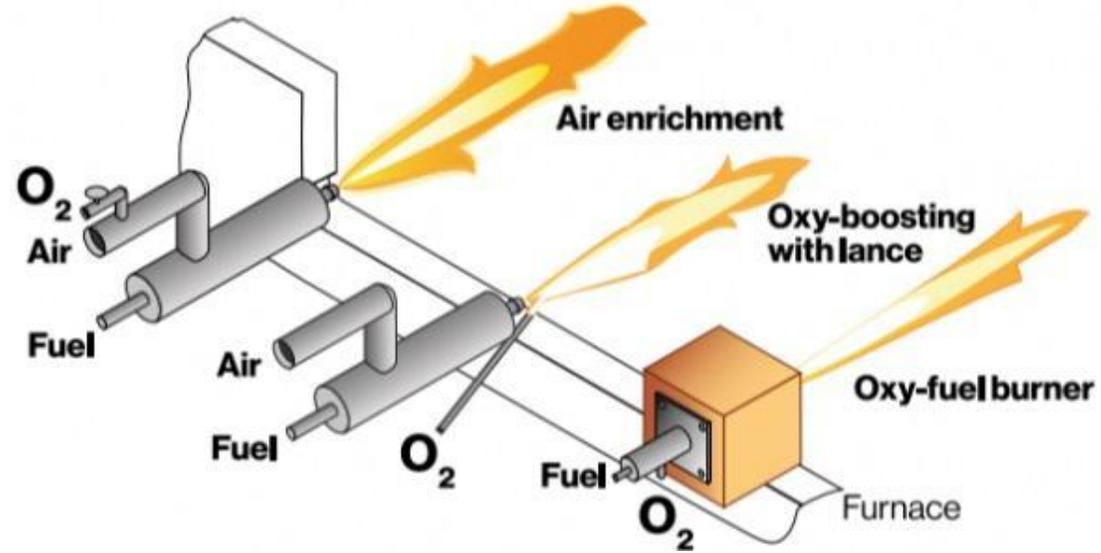
# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung

## Schmelzen

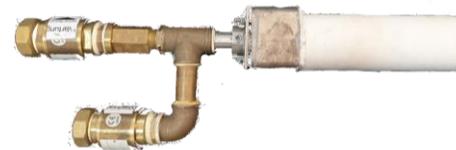
Wenig große Brenner bis 2 MW



Quelle: AirLiquide



DESAG-Brenner

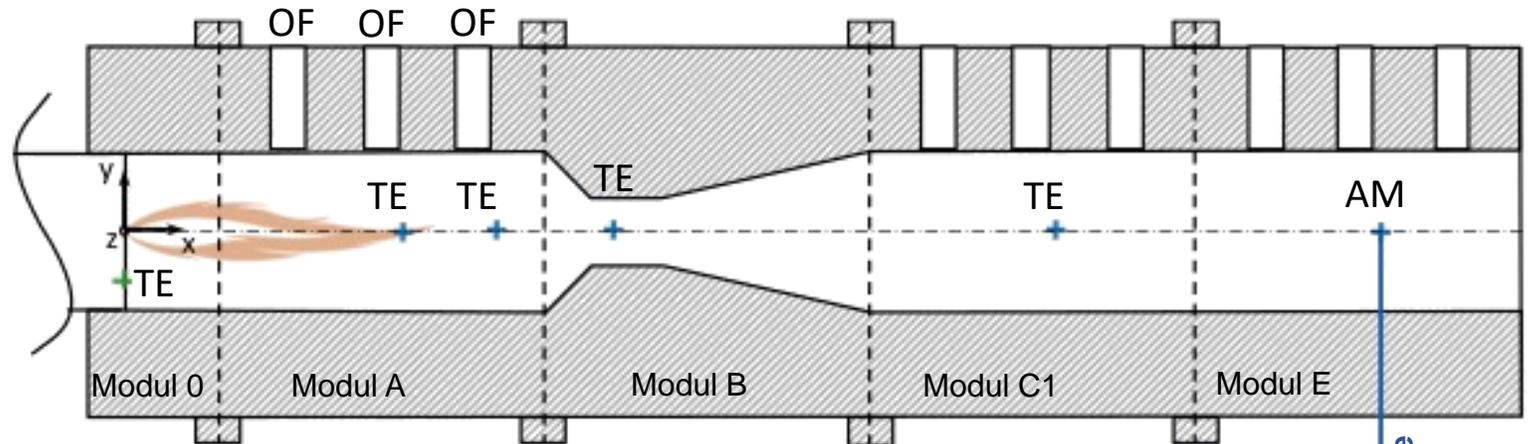
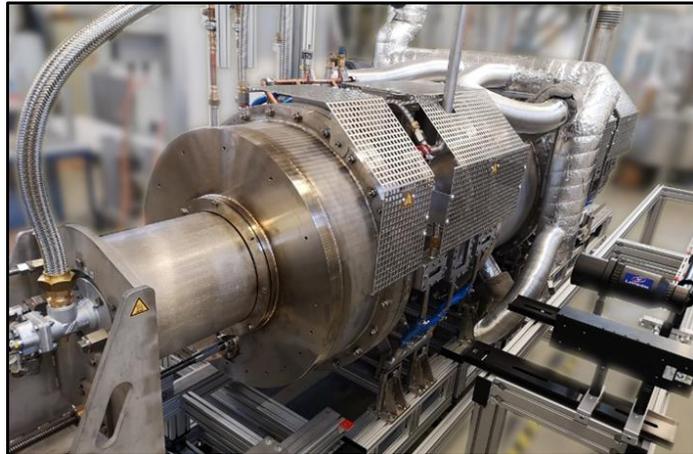


Maxon-Brenner



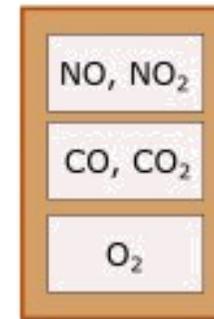
AirLiquide-Brenner

# Versuchsstand – Mehrsegmentbrennkammer



- 4 austauschbare Segmente (max. Wandtemperatur: 1600°C)
- Erfassung der gesamten Flammenlänge durch beweglichen Brennerstein
- Gasmischstrecke aus folgenden Komponenten:
  - Brenngas - Erdgas, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO
  - Oxidator - O<sub>2</sub>, Luft
- Max. Brennerleistung: 50 kW

ABB Multianalysesystem



Kühlsystem



1,09 l/min  
trockenes Abgas

N<sub>2</sub> MFC  
0,98 l/min

Abgasprobe

TE ... Thermoelement  
OF ... optisches Fenster  
AM ... Abgasmessung

# Schmelzbrenneruntersuchungen bis 50kW

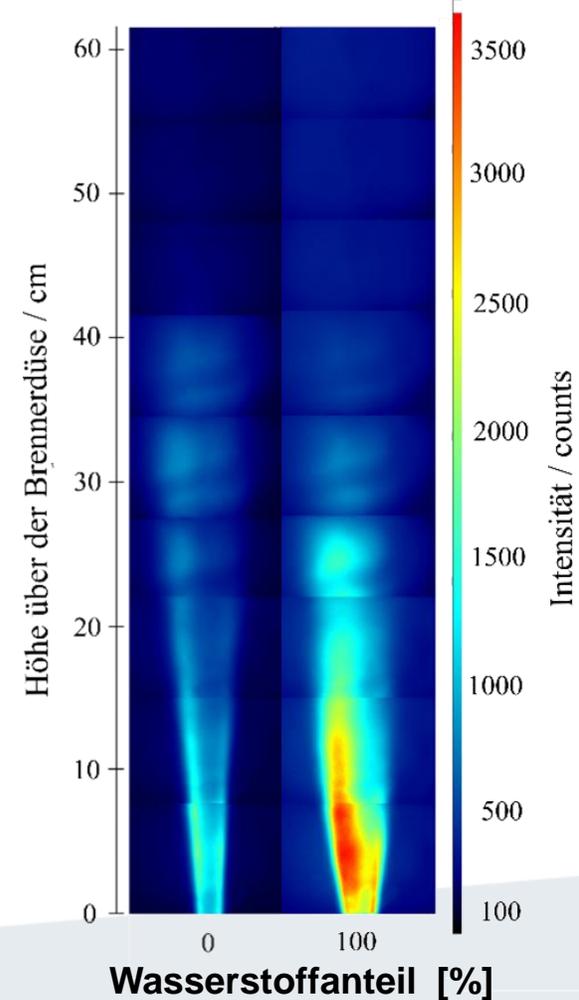
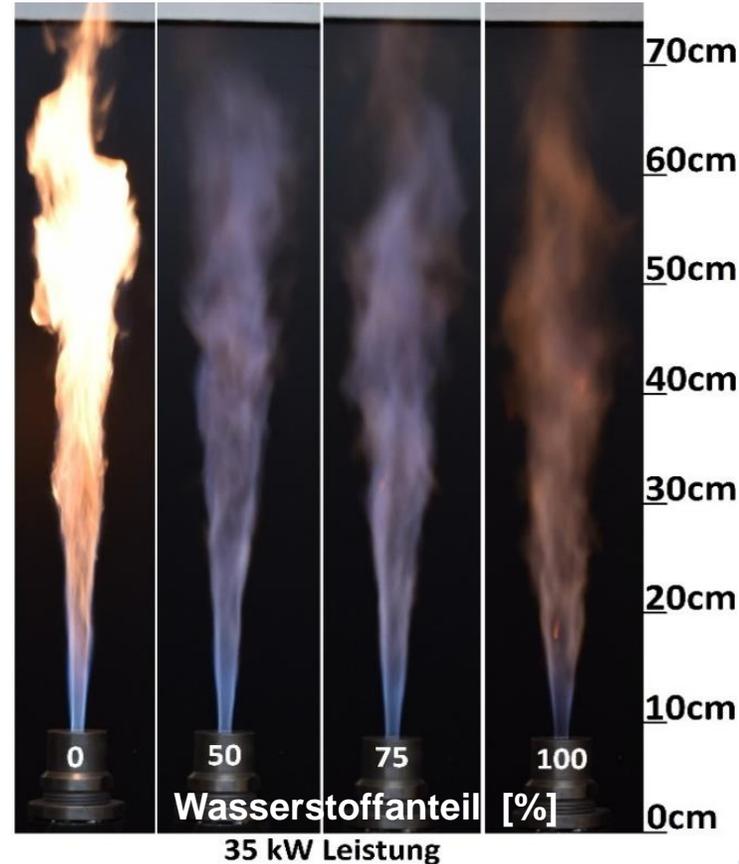
Quelle: Hasche et. al. INFUB, 2024



Inbetriebnahme DESAG Brenner 25 kW Erdgas/Sauerstoff

## Untersuchungen an diesen Flammen

- *Flammenlänge* ➤ *Annähernd konstant*
- *Wärmestrom* ➤ *Sinkt leicht*
- *Spektren* ➤ *Änderungen je nach Anteil*
- *Temperaturfelder* ➤ *Verschiebung messbar - steigt*
- *Abgasemissionen* ➤ *In Arbeit, deutliche Abhängigkeit vom Falschlufteanteil*



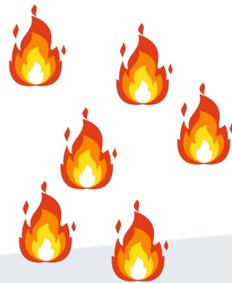
# Mögliche Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung

Schmelzen

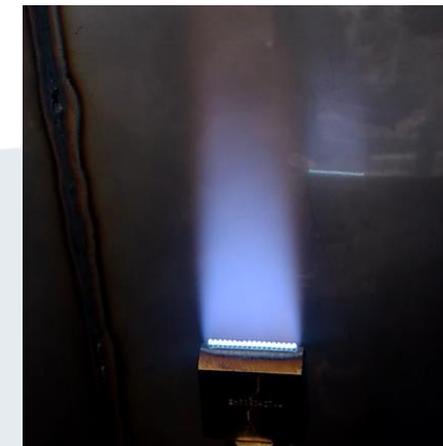
Formen

Wenig große Brenner bis 2 MW

Viele kleine Brenner im Bereich von ein paar kW

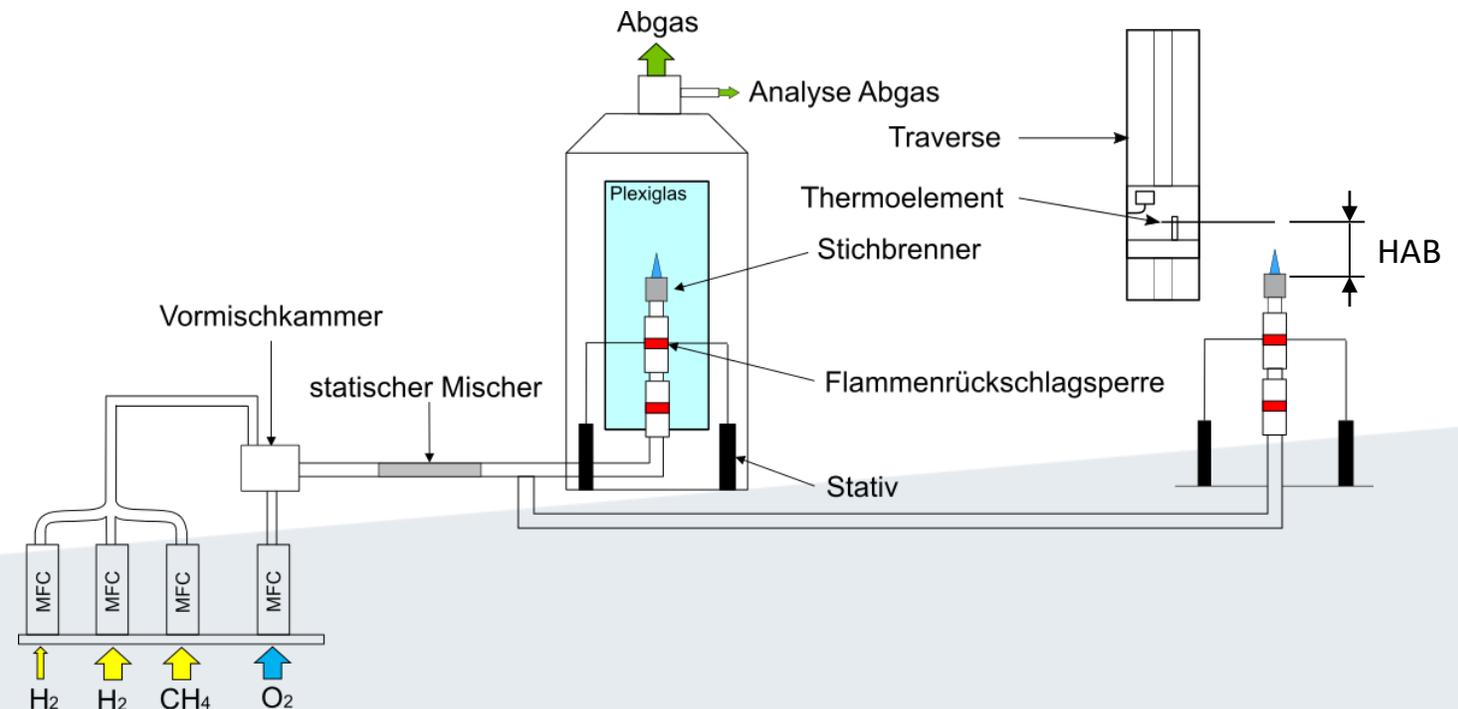
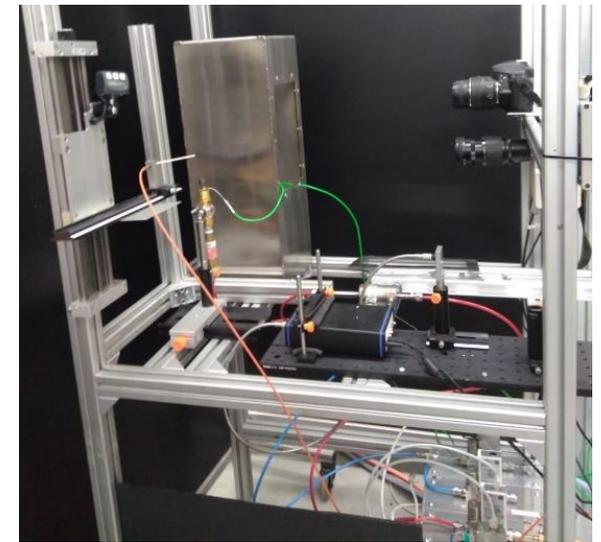


Hot forming - Packaging

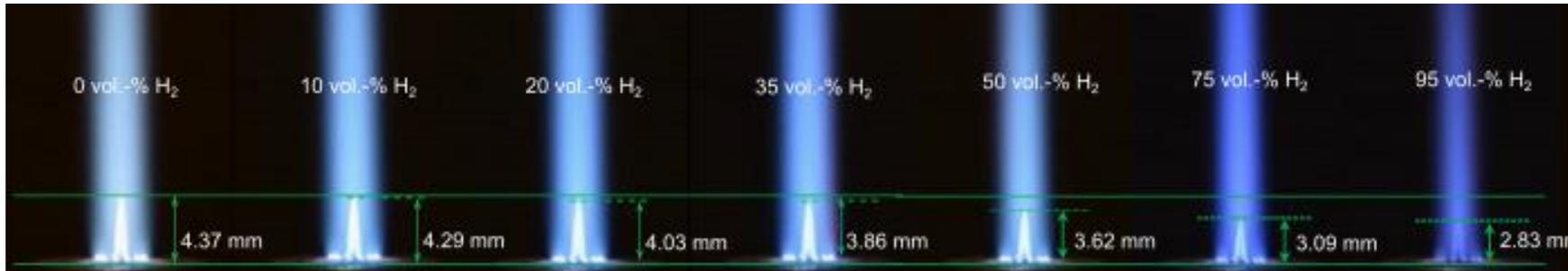


# Versuchsstand Oxyfuelbrenner - Heißformgebung

- Kleinbrennerversuchsstand:  
Brennkammer oder im Freibrand
- Sicherer Betrieb mittels zweier  
Flammenrückschlagsperren
- Brennerleistung bis 5kW
  
- Vormischbetrieb mit Gasmischstrecke  
aus folgenden Komponenten:  
 $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$
- Messungen der  $OH^*$ -Intensitäten  
mittels Chemilumineszenz
- Messung des Temperaturprofils



# Betriebsgrenzen der Oxyfuelbrenner und VIS-Untersuchung



VIS-Aufnahmen des Einlochbrenners, P=0,4 kW,  $\phi=1,0$

Äquivalenzverhältnis [-]	Wasserstoffbeimischung [Vol.-%]						
	0	10	20	35	50	75	100
0,8	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗ (x) ✓
0,9	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗ (x) ✓
1,0	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗ (x) ✓
1,1	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗ (x) ✓
1,2	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗ (x) ✓

## Untersuchungen an diesen Flammen

- *Flammenlänge* ➤ **Sinkt**
- *Wärmestrom* ➤ **Sinkt leicht**
- *Spektren* ➤ **Änderungen je nach Anteil**
- *Temperaturfelder* ➤ **Verschiebung messbar - steigt**



Glühen der Brennerdüse bei 100 Vol.-% H<sub>2</sub>

# Zusammenfassung

- Auswirkung der Mikrowellentechnologie Glasschmelzwannen:
  - Mit geringen konstruktiven Anpassungen an existierenden Wannen einsetzbar
  - Schnelleres Aufschmelzen → höherer Durchsatz
  - Völlig neue Konzepte denkbar → Hybride Beheizungsverfahren
  - **Bis zu 10 kW getestet, bis zu 1 MW vorstellbar**
  
- Auswirkung der Wasserstoffbeimischung an mündungsmischenden und vorgemischten Sauerstoff-Brennern:
  - **Keine konstruktiven Anpassung** der Brenner bei dem Wechsel auf Wasserstoff notwendig
  - Flammenlänge reduziert sich nur geringfügig im Wasserstoffbetrieb
  - Höherer Volumenstrom führt zu **Verbreiterung der Flammenwurzel**
  - OH<sup>\*</sup>-Konzentrationen verändern sich mit steigendem Wasserstoffanteil
  - **Geringer Anstieg der Flammentemperatur**
  - **Geringere Wärmestrahlung** der Wasserstoff-Flamme somit radial nur geringer Temperaturanstieg
  - **Brenner in den Leistungsklassen bis 500 kW für einen Retrofit bereit und bis 2MW in Erprobung!**

# ■ Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

## Danksagung:

**KlimPro-Projekt MiGWa:** CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Glasproduktion durch innovative und klimafreundliche Erwärmung; TP2: Kombiniertes Glasschmelzen mit Mikrowellen und H<sub>2</sub>-Sauerstoff-Verbrennung

**Projektpartner:** Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. und Schott AG

**Finanzielle Unterstützung:** Europäischen Union, DLR und BMBF

