



Kurzbericht und Projektfazit

# TTgoesH2 - ULoBurn

---

**Leittechnologie-Vorhaben „TTgoesH2“: Integration von Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger in die industrielle und gewerbliche Thermoprozesstechnik**

**Teilprojekt 1 „ULoBurn“: Entwicklung ultra emissionsarmer Verbrennungssysteme in Thermoprozessanlagen durch Wasserstoffeinsatz.**

**Projektzeitraum: 01.01.2021 - 31.12.2023**

Im Rahmen des Programms Leittechnologien der Energiewende bestand die Möglichkeit das Themengebiet „Integration von Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger in die industrielle und gewerbliche Thermoprozesstechnik - TTgoesH2“ umfassend zu untersuchen und mit mehreren parallelen, thematisch eng verbundenen Forschungsvorhaben wesentliche Fragestellungen zu bearbeiten. Aus dem Transformationsansatz und um der zu erwartenden Veränderung als Technologieführer entgegenzutreten, kristallisierten sich drei wesentliche Einzelschwerpunkte für das Leittechnologievorhaben heraus:

- Verbrennungssysteme mit kleinsten Schadstoffemissionen für den Energieträger Wasserstoff bzw. dessen Gemisch mit Erdgas.
- Neuartige Verbrennungsregelungen bei veränderlichen Gasgemischen inkl. der Prozessführung unter veränderten Abgas- und Wärmeübertragungsbedingungen.
- Neue Werkstoffkonzepte für den Einsatz in Thermoprozessanlagen mit veränderten Abgaszusammensetzungen.

Im hier vorgelegten Kurzbericht werden die Ergebnisse des ersten der drei Teilvorhaben vorgestellt.

Die Wissensbasis für die Entwicklung von integrierten Brennern, insbesondere die auslegungsrelevanten verbrennungstechnischen Parameter, in Bezug auf Wasserstoff bzw. Gemische aus Erdgas und Wasserstoff wurden verbreitert und zusammengefasst. Anschließend wurde auf neue Verbrennungssysteme eingegangen, welche die hohen Anforderungen an die Verbrennungsgüte in Hinsicht auf die Abgasemissionen erfüllen müssen. Hauptschwerpunkt sind niedrigste Emissionen von Stickstoffoxiden sowie unverbrannte Bestandteile des Energieträgers Wasserstoff, bzw. Kohlenstoffmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe im Fall von Gasgemischen. Diese Fragestellungen wurden experimentell und numerisch betrachtet und abschließend die Ergebnisse bewertet.

**Keywords:**

*Wasserstoff, Hochtemperaturprozesse, Brennertechnik, Schadstoffe, Stickoxide*

## Ergebnisse Technische Universität Bergakademie Freiberg:

Im Rahmen des Projekts wurde am GWA die Verbrennung von Erdgas mit sukzessiver H<sub>2</sub>-Zugabe experimentell untersucht. Hierfür wurden verschiedene Untersuchungen an einem Prototypbrenner mit angepasster Drallscheibe durchgeführt, diese ist in Interaktion mit dem Hersteller auf der Basis eines BIO50 Brenner konstruiert wurden. Die Arbeiten umfassten experimentelle Untersuchungen im Kaltluft- und Heißwandbetrieb, sowohl im konventionellen Flammen- als auch mit Luftstufung.

Untersuchungen zu Flammenüberwachung und Zündversuchen ergaben, dass ab 50 Vol.-% H<sub>2</sub> bei allen Parameterkombinationen erfolgreich gezündet werden konnte. Zusätzlich war die Überwachung der Flamme nur bis 94 Vol.-% mit einer Ionisationssonde möglich, die Ionisationsströme unterschreiten anschließend bei höheren Wasserstoffkonzentrationen den Grenzwert. Nach dem Installieren einer üblichen Flammenüberwachung im UV-Bereich konnten Flammen von 0-100 Vol.-% Wasserstoff ohne weitere Einschränkungen vermessen werden. Bei höheren Wasserstoffanteilen im Brennstoff stiegen die Stickoxidemissionen steil an, während die CO-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen mit zunehmendem H<sub>2</sub>-Anteil sanken. In den Messkampagnen mit Luftstufung zeigte sich eine vergleichbare Emissionsreduktion von NO<sub>x</sub> wie im Erdgasfall für alle Wasserstoffanreicherungen. Diese Minderungsmethode kann auch weiterhin ohne Einschränkungen eingesetzt werden, auch wenn die finalen NO<sub>x</sub>-Werte immer oberhalb der Erdgaswerte lagen, sind sie doch im Bereich der regulierten gesetzlichen Obergrenzen.

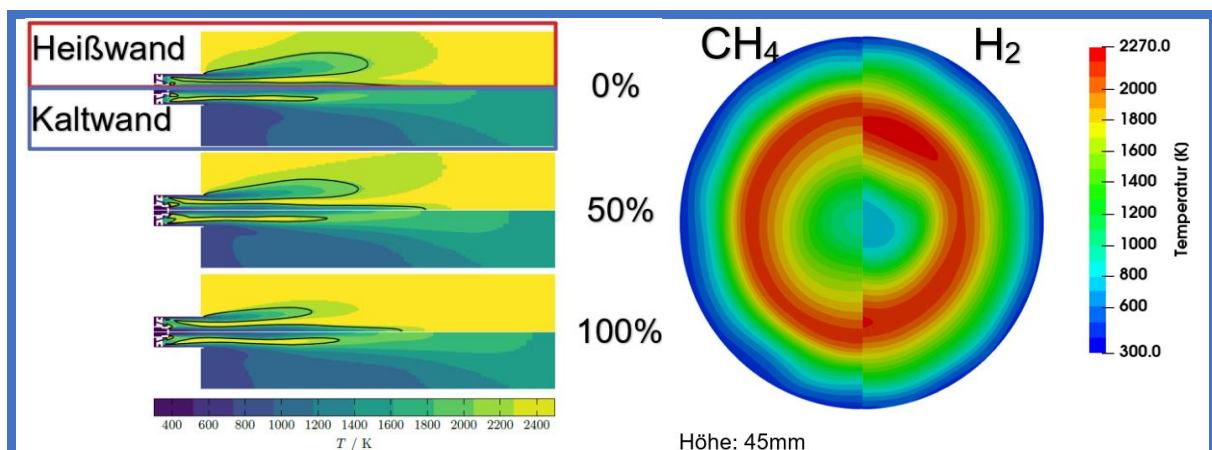


Abbildung 1: Links: Temperatur auf der Symmetrieebene für  $x_{\text{H}_2,\text{B}} = 0$  Vol.-% (oben), 50 Vol.-% (mittig) und 100 Vol.-% (unten) bei adiabatem (jeweils obere Hälfte) und bei gekühltem Brennkammermantel (jeweils untere Hälfte). Die schwarze Linie entspricht der Isolinie für  $T = 1900$  K. Rechts: Veranschaulichung der Wandströmung; links CH<sub>4</sub> und rechts die H<sub>2</sub> Flamme

Simulationen konnten die Trends in der Temperatur und dem NO<sub>x</sub>-Verhalten abbilden. Dabei wurden im Heißwandbetrieb trotz Berücksichtigung von Strahlung und Wärmeverlusten die Stickstoffemissionen im Wasserstoffbetrieb noch deutlicher überschätzt als im Erdgasbetrieb. Im Fall einer Brennkammer mit kalter Wand konnten bis 30 Vol.-% Wasserstoffanteil die NO<sub>x</sub>-Werte ausreichend genau ermittelt werden. Effekte der Luftstufung konnten mittels Simulation abgebildet werden. Numerische Simulationen mit reduzierten Mechanismen bis DRM19 haben keine deutlichen Verbesserungen gebracht. Die aktuell implementierten Post-Solver für NO<sub>x</sub> und die vorhandenen Scale-up Methoden für Brennkammern im gasbefeuerten Betrieb sind unserer Meinung nach nur eingeschränkt für den Wasserstoff/Erdgasbetrieb nutzbar.

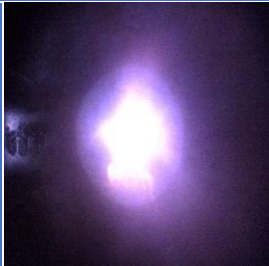




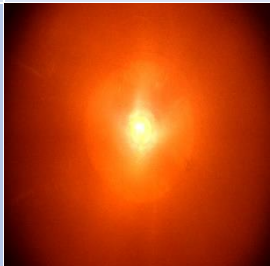
## Ergebnisse DBI:

Untersuchungen am DBI – Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg haben gezeigt, dass bei einem Anstieg des Wasserstoffanteils, bereitgestellt durch die im Zeitraum neu installierte Gasmischanlage mit einer maximalen Wasserstoffzufuhr von 370 m<sup>3</sup>/h (ca. 1 MW thermisch), die Temperaturbelastung und Emissionen eines unmodifizierten Erdgas-Gebläsebrenners, integriert in ein wassergekühltes 500 kW Prüfflammrohr, ansteigen.

*Zu den wesentlichen Erkenntnissen der Untersuchungen zählen:*

- Mit steigendem Wasserstoffanteil im Brenngas nimmt die Flammgeschwindigkeit zu, wodurch die Flammenfront trotz höheren Brennstoffvolumenstroms näher an die Gasdüsen rückt und die Temperaturbelastung des Brenners sich verstärkt. Dem folgend steigt diese Belastung mit dem Wasserstoffanteil im Brennstoff, sinkt wiederum mit höherer Leistung. Bei hohen Wasserstoffanteilen und niedriger Leistung überschreitet die Temperatur des Brennerkopfes teilweise 900 °C (siehe Tabelle 1), lag deutlich über der Zundergrenztemperatur des Brennerkopf-Materials.
- Bei niedriger Brennerleistung führt schon eine geringe Wasserstoffbeimischung zu einer Zündung nahe der Gasdüse. Durch die notwendige Reduzierung des Luftvolumenstroms für eine konstante Luftzahl entstehen vermutlich Zonen mit lokalem Sauerstoffmangel, was zur Bildung von Kohlenmonoxid führt (siehe Tabelle 1, 140 kW/20 Vol.% H<sub>2</sub>). Deshalb war eine Erhöhung der Grundlast um etwa 10-15 % nötig.
- Die NO<sub>x</sub>-Emissionen steigen bei konstanter Leistung mit dem Wasserstoffgehalt im Brenngas. Bei Brenngasmischungen mit ≥ 90 Vol.-% Wasserstoff sinken die NO<sub>x</sub>-Emissionen mit steigender Leistung. Der Verlauf der NO<sub>x</sub>-Emissionen ähnelt dem der Temperaturen an der Primärstauscheibe, was darauf hindeutet, dass die Stickoxide hauptsächlich aus der Oxidation von Luftstickstoff bei hohen Temperaturen stammen (Zeldovich-Mechanismus).

Tabelle 1 Ergebnisdarstellung ausgewählter, repräsentativer Messpunkte – Dargestellt sind die Temperatur Mittig der Primärstauscheibe (T<sub>Prim,Mit</sub>) sowie Stickoxid- (NO<sub>x</sub>) und Kohlenmonoxid (CO)-Konzentrationen in Abhängigkeit von Brennerleistung und Wasserstoffgehalt im Brenngas für eine Luftzahl von 1,05.

$\lambda = 1,05$	140 kW	350 kW	500 kW
20 Vol. % H <sub>2</sub>			
T <sub>Prim,Mit</sub> (°C)	239,8	148,4	117,3
NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> (3% O <sub>2</sub> ))	67,6	70,0	77,5
CO (ppm)	25,7	0,0	0,0
100 Vol. % H <sub>2</sub>			
T <sub>Prim,Mit</sub> (°C)	751,7	550,8	542,6
NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> (3% O <sub>2</sub> ))	202,3	133,0	140,1
CO (ppm)	0,0	0,0	0,0

## Ergebnisse IOB:

Der Fokus der Arbeiten am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen lag auf der experimentellen Untersuchung eines Brennerprototypen, der auf Basis eines kommerziell verfügbaren Rekuperatorbrenners ausgelegt wurde. Dabei wurde der Wasserstoffgehalt in Erdgas in einem Bereich von 0 bis 100 Vol.-% variiert. Die thermische Leistung des Brenners wurde im Laufe der Untersuchungen mit 20 kW konstant gehalten. Der Brenner wurde sowohl im konventionellen Flammenmodus als auch im flammlosen Modus betrieben. Die experimentellen Untersuchungen wurden zunächst im Kaltluftbetrieb und anschließend mit extern vorgewärmter Verbrennungsluft (ca. 500 °C) vorgewärmt, um den realen Betrieb des Rekuperatorbrenners abzubilden. Die experimentellen wurden an einem semi-industriellen Prüfstand im Technikum durchgeführt. Die Brennkammer ist u.a. mit Temperaturmessstellen und Abgasanalysegeräten (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O) ausgestattet. Als Versuchsparameter wurden neben dem Brennermodus (Flamme/flammlos) und der Verbrennungslufttemperatur auch die Ofenraumtemperatur, die Primärluftzahl und die Sauerstoffkonzentration im trockenen Abgas variiert.

Abbildung 2 zeigt das Flammenverhalten, wenn der Wasserstoffgehalt im Brennstoff kontinuierlich erhöht wird. Es ist festzustellen, dass die Flamme deutlich kürzer wird und sich die Reaktionszone in Richtung des Brennerkopfes und hinein verschiebt. Dies ist deutlich daran zu erkennen, dass die keramische Brennkammer am Brennerkopf ab ca. 80 Vol.-% anfängt zu glühen.

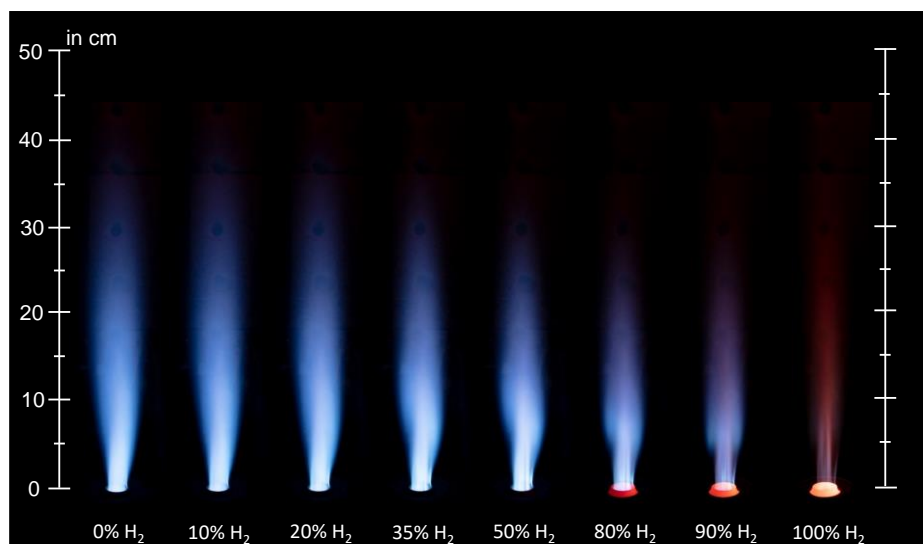


Abbildung 2: Flammenbilder verschiedener H<sub>2</sub>-Zumischung zu Erdgas in Vol.-%,  $\lambda_{\text{primär}} = 0,6$ ,  $d_{\text{BK}} = 25$  mm und 3 Vol.-% O<sub>2</sub> im trockenen Abgas bei ca. 550 °C mittlerer Ofenraumtemperatur (Verschlusszeit 6 s, Blende f/11, ISO 200)

Der Fokus der Arbeiten lag jedoch auf der Messung der Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>). Dazu ist in Abbildung 3 ein Effekt-Diagramm aus einer statistischen Analyse der Messwerte dargestellt, das den Einfluss der Wasserstoffzumischung auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigt. In diesem Fall wird der Brennerbetrieb für Kalt- und Heißluft im Flammen- und im flammlosen Modus verglichen. Für alle Modi steigen die NO<sub>x</sub>-Emissionen für einen steigenden H<sub>2</sub>-Gehalt an, allerdings sind die Emissionen für den flammlosen Betrieb deutlich geringer als im Flammenbetrieb. Zusätzlich steigen die Emissionen deutlich an, wenn die Verbrennungsluft vorgewärmt wird.

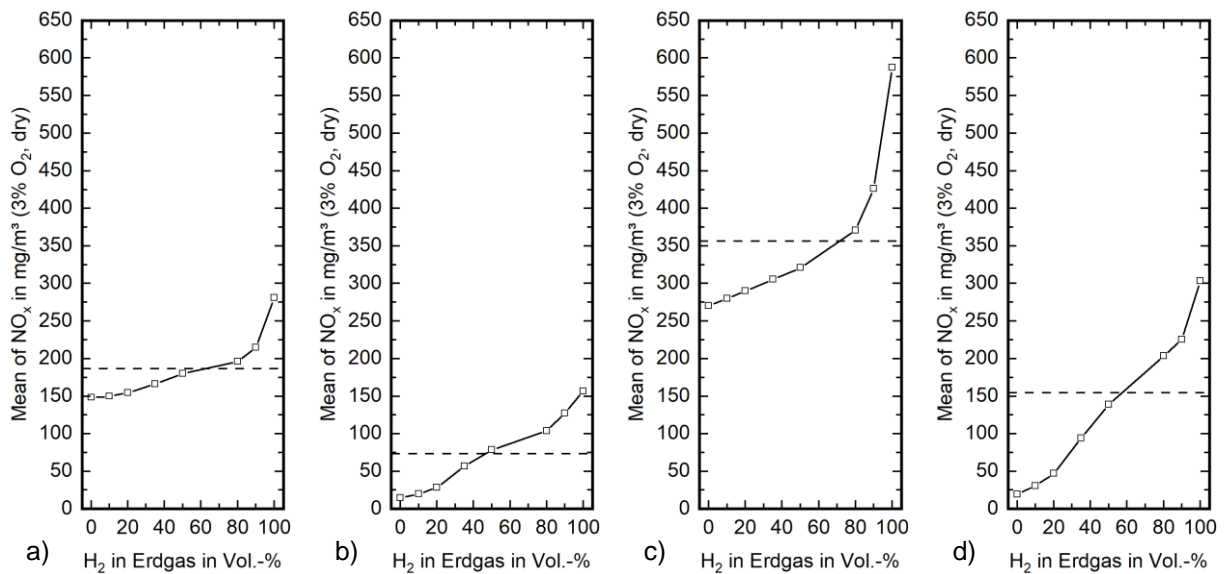


Abbildung 3: Effekt-Diagramme des H<sub>2</sub>-Anteils in Erdgas und der Auswirkung auf die mittleren NO<sub>x</sub>-Emissionen, a) Flamme, Kaltluft, b) Flammlösung, Kaltluft, c) Flamme, Heißluft, d) Flammlösung, Heißluft

### Zusammengefasste Erkenntnisse:

Im Folgenden wird die Ableitung einer Roadmap für den Einsatz von Wasserstoff in Industrieöfen anhand der erwarteten Schritte in deutschen und europäischen Gasnetzen beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl Gasnetzsegmente mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff im Erdgasnetz als auch Segmente mit etwa 100 Vol.-% H<sub>2</sub> (gemäß der 5. Gasfamilie nach [31]) vorkommen können. Grundsätzlich können außerhalb von Europa auch größere Bereiche bei H<sub>2</sub>-Zumischung möglich sein. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich weltweit in öffentlichen Gasnetzen eine Grenze einstellt, die mit einfachen technischen Mitteln beherrschbar ist.

### **Wasserstoffzumischung bis 20 Vol.-%:**

Aus den Ausführungen in dieser Studie sowie den bisherigen Untersuchungen an Verbrennungssystemen kann grundsätzlich geschlossen werden, dass

- Effekte auf die Werkstoffe von Thermoprozessanlagen vernachlässigbar sind,
- sich Feuerungssysteme größtenteils auf den höheren H<sub>2</sub>-Gehalt einstellen lassen,
- Leistungseinschränkungen und Änderungen der Flammendimensionen vernachlässigbar sind,
- Gasversorgungs-, Luftversorgungs- und Abgassysteme ausreichend dimensioniert sind,
- Flammenüberwachungssysteme sicher funktionieren sowie
- die verwendeten Werkstoffe und Komponenten der Gasversorgung und des Brenners für Wasserstoff-Gehalte bis 20 Vol.-% geeignet sind.

Trotz dieser grundsätzlichen Erwägung wird dringend empfohlen, den Betrieb eines Verbrennungssystems mit Wasserstoffzumischung bis zu 20 Vol.-% zu testen. Unter bestimmten Betriebsbedingungen können in Ausnahmefällen Störungen auftreten, die technische Einschränkungen erfordern. Während dieser Tests sollten neben Sicherheitsüberprüfungen insbesondere die Einhaltung von Effizienzstandards für Verbrennungssysteme und Emissionsgrenzwerten, insbesondere bezüglich NO<sub>x</sub>, überprüft werden. Für die getesteten Brenner wurden in diesem Bereich jedoch nur geringfügige Erhöhungen festgestellt. Es besteht die Möglichkeit,

dass Abweichungen möglicherweise konstruktive Änderungen am Verbrennungssystem erforderlich machen.

Eine offene Fragestellung für weitere Forschungsansätze betrifft insbesondere die Entwicklung einer adaptiven Verbrennungsregelung (Luftzahlregelung) beim Auftreten von Gasbeschaffenheitsschwankungen, wobei der Fokus auf dem Wasserstoffgehalt des Brenngases liegt. Mit der zu erwartenden Steigerung der Brennstoffkosten und den Anforderungen an die Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen gewinnt dieser Forschungsansatz zunehmend an Bedeutung.

#### **Wasserstoffversorgung gemäß der 5. Gasfamilie, Gruppe A und D (ca. 100 Vol.-%):**

Insbesondere im oberen Bereich des Wasserstoffgehalts (über 70 Vol.-%) sind die Auswirkungen auf die Konstruktion von Feuerungssystemen und Thermoprozessanlagen nicht mehr zu vernachlässigen. Der Anpassungsbedarf variiert jedoch je nach Anwendungsfall erheblich. Die folgenden Hinweise sollen als Leitfaden für die Eignungsprüfung und als Ausgangspunkt für konstruktive Anpassungen dienen.

Die Effekte auf die Thermoprozessanlage resultieren vorrangig aus dem deutlich höheren Wasserdampfgehalt des Abgases und dem veränderten Oxidationsverhalten der Konstruktionswerkstoffe:

- Der deutlich höhere Taupunkt des Abgases (73 °C bei Luftzahl ca. 1,0) kann insbesondere bei porösen bzw. durchlässigen Wärmedämmmaterialien zur Kondensation im Bereich der äußeren Gehäusewand von Anlage und Abgasführung führen. Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine Kondensation verhindern (Vermeidung von Gasströmen in der Wärmedämmung, Einsatz von Dampfsperren, Anhebung der Außenwandtemperatur). Es sind Empfehlungen für An- und Abfahrprozeduren zu entwickeln.

Bei Feuerungssystemen sind in den meisten Fällen konstruktive Anpassungen zu erwarten. In vielen Fällen sind technologische Lösungen grundsätzlich vorhanden. Sie sind jedoch den individuellen Bedingungen des Feuerungssystems und der Thermoprozessanlage anzupassen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Effekte benannt werden:

- Veränderung der Flammgeometrie:
  - Typisch sind eine Verkürzung der Flamme und eine Annäherung an den Brennermund.
  - Feuerungssysteme mit einem hohen Regelbereich zeigen die stärksten Änderungen.
  - Eine Veränderung der Flammgeometrie kann eine erhöhte Geräuschentwicklung nach sich ziehen.
  - Eine Veränderung der Flammgeometrie kann Einfluss auf Brennraum und Brennermaterialien haben.
  - Bei Vormischbrennern steigt die Neigung zum Flammenrückschlag.
  - Die Betriebskennfelder von Brennern sind zu überprüfen.
- Einschränkung bei der Flammenüberwachung:

Ionisationsbasierte Überwachungseinrichtungen sind meist nicht in der Lage ein ausreichend stabiles Signal bereitzustellen. UV-Sensoren bzw. thermische Sensoren sind grundsätzlich geeignet.
- Die Neigung zur erhöhten NO<sub>x</sub>-Bildung resultiert eindeutig aus der höheren Energiedichte in der Verbrennung und der höheren adiabaten Flammentemperatur. Je nach Arbeitstemperatur

der Thermoprozessanlage sind Maßnahmen zur Minderung bzw. Abgasreinigung zu entwickeln.

- Bei gleichbleibender Dimensionierung der Gasquerschnitte und gleichen Drücken am Brenner sind Leistungseinschränkungen mit maximal 25 % (Gruppe A: 98 Vol.-% H<sub>2</sub>) bzw. ca. 9 % (Gruppe D: 99,97 Vol.-% H<sub>2</sub>) zu erwarten. Sie sind aber durch eine einfache Anpassung des Brennervordrucks kompensierbar.
- Gasversorgungs-, Luftversorgungs- und Abgassysteme sind typischerweise bei einer Umstellung von Erdgas ausreichend dimensioniert. Es ist mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichbleibenden Druckverlusten in der Gaszuleitung zu rechnen. Daraus kann aber im Einzelfall eine erhöhte Geräuschbelastung resultieren.

Zusammenfassend lautet die Schlussfolgerung für den Einsatz von Gasen der 5. Gasfamilie, dass ein individueller Entwicklungsbedarf für alle Feuerungssysteme besteht. Es stehen grundsätzlich zahlreiche Technologieoptionen zur Verfügung. Dazu sollten in einer gemeinschaftlichen Anstrengung die Auslegungsgrundlagen für die Dimensionierung von Düsensystemen am Brennerkopf, Flammenstabilisierungsmechanismen sowie die Sicherheitseinrichtungen überarbeitet werden. Grundsätzlich ist der Industrieofen- und Feuerungsanlagenbau mit diesem Ansatz gut aufgestellt, um die Entwicklungen zum Bedarf an klimaneutralen Wasserstofftechnologien Rechnung zu tragen und mit der Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur mitzuhalten. D.h., dass mit dem Fortschreiten der Wasserstoffversorgung dringender Handlungsbedarf besteht um sichere und zuverlässige Systeme bis ca. 2030 zur Verfügung zu stellen.

### **Stickstoffoxidemissionen:**

Die Autoren kritisieren die gegenwärtigen Grenzwertdefinitionen in mg/m<sup>3</sup> (trocken) als ungerecht für den Vergleich von NO<sub>x</sub>-Emissionen verschiedener Brennstoff-Oxidator-Kombinationen. Sie zeigen dies besonders am Beispiel des Verbrennungssystems Wasserstoff-Sauerstoff auf, wo das Abgas bei nahezu stöchiometrischer Verbrennung ( $\lambda \approx 1$ ) hauptsächlich aus Wasserdampf besteht und eine Bezugnahme auf trockenes Abgas unmöglich wird. Stattdessen wird die Angabe der Emissionen in mg/kWh als weitaus sinnvollere Alternative betrachtet, da sie direkt mit dem tatsächlich emittierten Massenstrom korreliert werden kann. Die Unternehmen sollten diese Vorschläge eingehend prüfen und anschließend in überarbeiteten Normen und Gesetzen verankern. Diese Diskussion wurde im Rahmen der Projektlaufzeit mehrmals in PBA-Treffen behandelt und unterstützt.

## Impressum

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Gas- und Wärmetechnische Anlagen

Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg

Bearbeiter: Prof. H. Krause, Dr. S. Eckart



GAS- UND  
WÄRMETECHNISCHE  
ANLAGEN

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI)

Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg

Bearbeiter: Hr. M. Wiersig, Hr. P. Götze



RWTH Aachen, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik

Kopernikusstraße 10, 52074 Aachen

Bearbeiter: Prof. H. Pfeifer, Dr. N. Schmitz, Hr. L. Sankowski



Institut für  
Industrieofenbau  
und Wärmetechnik

Dieses Teilprojekt der Leittechnologieprojektes „TTgoesH2“ wurde gefördert unter der IGF-Projektnummer 31 LBG durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Wir bedanken uns ganz herzlich.

Für detaillierte Informationen zum Schlussbericht, wenden Sie sich bitte an die FOGI ([martina.hofner@vdma.org](mailto:martina.hofner@vdma.org)) oder den Projektkoordinator Prof. Krause ([Hartmut.Krause@iwtt.tu-freiberg.de](mailto:Hartmut.Krause@iwtt.tu-freiberg.de)).



Forschungsgemeinschaft  
Industrieofenbau e. V.



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages