Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Kueppers Solutions GmbH

Zukunftscluster Wasserstoff
Abschlussbericht zum Projekt HyInnoBurn

Autor:

Marc Stöver

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03ZU1115HB gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor."

- Abschlussbericht zum Projekt HyInnoBurn -

- Teil II: Eingehende Darstellung -

Zuwendungsempfänger:	Kueppers Solutions GmbH
Förderkennzeichen:	03ZU1115HB
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2021 – 30.09.2024
Berichtszeitraum:	01.10.2021 – 30.09.2024

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis iii

1. Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere Ereignisse, die Einfluss auf das Vorhaben haben könnten 1

1.1.1 Arbeitspaket 1 – Erstellung von Lastenheft und ersten Prototypen 1

1.1.2 Arbeitspaket 1 – Werkstoffauswahl, Prozessentwicklung, Design und Fertigung ... 3

1.2 Arbeitspaket 2 – Experimentelle Charakterisierung erster Prototypen 4

1.3. Arbeitspaket 3 – Entwicklung simulativer Methoden & Validierung durch Bau eines Prüfstands 6

1.3.1 Prüfstandaufbau als praktischer Ansatz 7

1.3.2 Variationen der Dual-Fuel-50kW-Mischeinheit 9

1.4 Arbeitspaket 4 - Skalierung des Brennerkonzeptes 11

1.5.1 Arbeitspaket 5 - Demonstration und Emissionsnachweis 12

1.5.2 Übergang zu wasserstoffbasierten Brenngasgemischen – flexible Dual-Fuel-Versorgung 13

2 Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung 16

3 Änderungen der Aussichten auf Erreichen der Vorhabensziele 17

4 Forschungs- und Entwicklungsergebnisse Dritter 17

5 Notwendige Änderungen der Zielsetzung 17

6 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans – abschließende Stand der wirtschaftlichen und technischen Verwertungsperspektiven 17

Abkürzungsverzeichnis

IFG	Interdisziplinäre Forschergruppen
KPI	Key Performance Indicator
DAP	Digital Additive Production
PBF-LB/M	Pulverbettbasiertes Schmelzen mit Laserstrahl von Metall
CFD	Computational Fluid Dynamics
GWI	Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
TPMS	Triply Periodic Minimal Surface

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung Lastenhefts für Industriegasbrenner der Firma Kueppers Solutions GmbH 2
Abbildung 2: Technologische Ausgangsbasis – RooN SI 150 Brenner H_2-optimiert 2
Abbildung 3: Mehrkanalige Mischeinheit während und nach der Herstellung aus Inconel 7183
Abbildung 4: Prinzip Rekuperatorbrenner der Firma Kueppers Solutions 5
Abbildung 5: modifizierte Mischeinheit für Prototyp 50kW für Anwendung in Rekuperatorbrenner 6
Abbildung 6: Prüfstandentwicklung - mehrteiliger Demonstrator zur Erhöhöung der Abgasezirkulation 8
Abbildung 7: Variationen zur Optimierung des Einsaugungsgebiets 8
Abbildung 8: Mesh eines 50kW Dual-Fuel-Systems 10
Abbildung 9: gewünschte Stabilisierung der Flamme an V-Shroud.....10
Abbildung 10: Überarbeiteter 50kW Dual-Fuel Rekuperatorbrenner-Prototyp.....12
Abbildung 11: Emissionen 50kW Prototyp im Vergleich [Erdgas] 13
Abbildung 12: Freibrandversuche unterschiedlicher Wasserstoff-Erdgas-Stufungen 14
Abbildung 13: Emissionsmessungen am GWI eines 50kW Dual-Fuel-Prototypen (Erdgas)..15
Abbildung 14: Emissionsmessungen am GWI eines 50kW Dual-Fuel-Prototypen (H_2) 16
Abbildung 15: angepasste Zeit- & Meilensteinplanung 17

1. Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere Ereignisse, die Einfluss auf das Vorhaben haben könnten

1.1.1 Arbeitspaket 1 – Erstellung von Lastenheft und ersten Prototypen

Zu Beginn des Projekts erfolgt die systematische Erstellung eines Lastenhefts für die Brennersysteme von Kueppers Solutions. Grundlage dafür bilden die industriellen Anforderungen potenzieller Anwender aus verschiedenen Branchen der Thermoprozesstechnik, darunter die Stahl-, Chemie-, Lebensmittel- und Keramikindustrie. Die Anforderungen an die Brennersysteme variieren je nach Branche und Anwendungsfall stark.

Daher erfolgt im Projektverlauf eine Priorisierung und Fokussierung auf die technologisch und anwendungstechnisch wichtigsten Parameter für wasserstofftaugliche Brennersysteme. Ziel ist es, ein konsistentes, vollständiges und strukturiertes Anforderungsdokument zu entwickeln, das als Grundlage für alle weiteren Entwicklungs- und Optimierungsschritte dient.

Zur strukturierten Erarbeitung des Lastenhefts wird ein fünfstufiger Prozess etabliert:

1. **Strukturierung des Lastenheftschemas:**
   Zunächst wird ein thematisch gegliedertes Gliederungsschema erarbeitet, um eine einheitliche Systematik und Nachvollziehbarkeit sicherzustellen.
2. **Teilen mit Projektpartnern:**
   Im zweiten Schritt wird das initiale Lastenheftdokument an alle Projektpartner verteilt.
3. **Einholen von Änderungsvorschlägen:**
   Die Partner bringen in einer strukturierten Rückmeldeschleife Änderungsvorschläge, Ergänzungen und spezifische Anforderungen ein.
4. **Anpassung auf Basis des Feedbacks:**
   Die Rückmeldungen werden gesammelt, analysiert und in das Lastenheft eingearbeitet.
5. **Gemeinsame Finalisierung im Workshop:**
   Abschließend erfolgt die vollständige Ausfüllung und Konsensbildung über die Inhalte in einem gemeinsamen Workshop aller Beteiligten.

Das Lastenheft ist als dynamisches Dokument angelegt, das über die gesamte Projektlaufzeit hinweg aktualisiert und erweitert wird. Es umfasst die nachfolgenden fünf Hauptkapitel:

Einleitung und Nomenklatur

Einführung, Definition der Begriffe, verwendete Einheiten und Abkürzungen.

Analyseabschnitt

Betrachtung des Gesamtsystems, der Prozessmedien sowie der relevanten Teilsysteme.

Anforderungsliste

Aufschlüsselung in systemspezifische, standortspezifische und testspezifische Anforderungen an das Brennersystem.

Liste abgeleiteter Maßnahmen

Ermittlung und Dokumentation von notwendigen Bedarfsmaßnahmen sowie identifizierten Optimierungsmaßnahmen.

Ein exemplarischer Ausschnitt aus dem Lastenhefts ist in Abbildung 1 dargestellt.

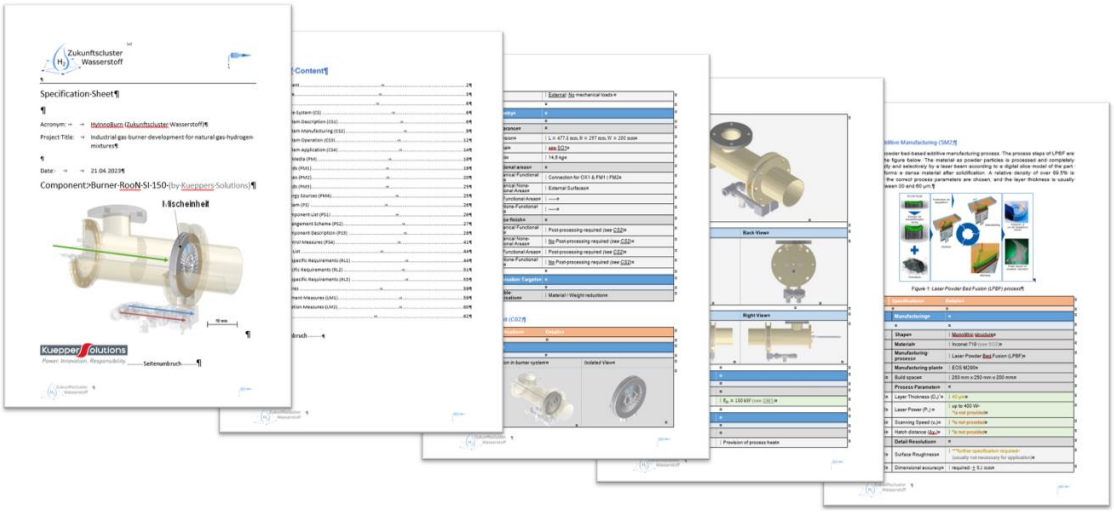


Abbildung 1: Darstellung Lastenhefts für Industriegasbrenner der Firma Kueppers Solutions GmbH

Für die erste experimentelle Untersuchung wird ein marktreifer Brenner aus dem bestehenden Produktportfolio von Kueppers Solutions ausgewählt. Das gewählte System ist für eine thermische Leistung von 150 kW ausgelegt und kann im Betrieb auf ca. 5 kW heruntergeregelt werden. Dieses Modell dient als technologische Ausgangsbasis für die nachfolgenden Entwicklungen und Anpassungen im Hinblick auf den flexiblen Betrieb mit unterschiedlichen Wasserstoffanteilen. Insbesondere die integrierte Mischeinheit dieses Brennertyps bildet den zentralen Baustein für konstruktive und strömungstechnische Optimierungen hinsichtlich Verbrennung, Stabilität und Emissionen im Wasserstoffbetrieb.

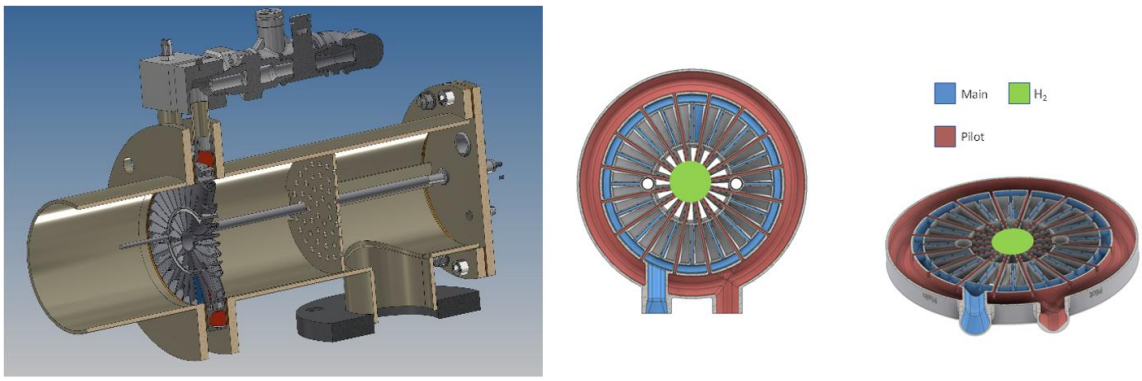


Abbildung 2: Technologische Ausgangsbasis – RooN SI 150 Brenner H_2-optimiert

Die technologische Ausgangsbasis des Brennersystems von Kueppers Solutions umfasst eine mehrkanalige Mischeinheit mit zwei getrennten Kanälen zur gezielten Einstellung des Luft-Brennstoff-Gemischs. Für den Wasserstoffbetrieb wird dieses Konzept erweitert: Ein dritter

Kanal wird integriert, um den Anforderungen an eine separate Wasserstoffzuführung gerecht zu werden. Die resultierenden Verbrennungsbereiche sind:

- Pilot: Innerer Kanal für fettes Erdgasgemisch
- Main: Äußerer Kanal für mageres Erdgasgemisch
- H_2: Separater Kanal zur gezielten Wasserstoffverbrennung

Aufgrund der moderaten thermischen Belastung im Betrieb ohne Luftvorwärmung wird der erste Prototyp der dreikanaligen Mischeinheit aus Inconel 718 gefertigt. Die finale Werkstoffauswahl für einen potenziellen Serienbrenner wird im weiteren Projektverlauf geprüft.

1.1.2 Arbeitspaket 1 – Werkstoffauswahl, Prozessentwicklung, Design und Fertigung

Aufbauend auf dem grundlegenden Konzept der mehrkanaligen Mischeinheit erfolgt die konstruktive Ausarbeitung in enger Abstimmung zwischen Kueppers Solutions und dem DAP. Anschließend wird die Mischeinheit am DAP-Institut mittels Pulverbettverfahren Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M) additiv gefertigt. Die Fertigung erfolgt unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen wie Überhangwinkel, Belichtungsstrategie und notwendige Stützstrukturen.

Die gefertigte Mischeinheit dient als zentrales Bauteil im ersten 50-kW-Brennerprototyp und bildet die Grundlage für die nachfolgende Erprobung sowie die Weiterentwicklung im Rahmen der folgenden Arbeitspakete.

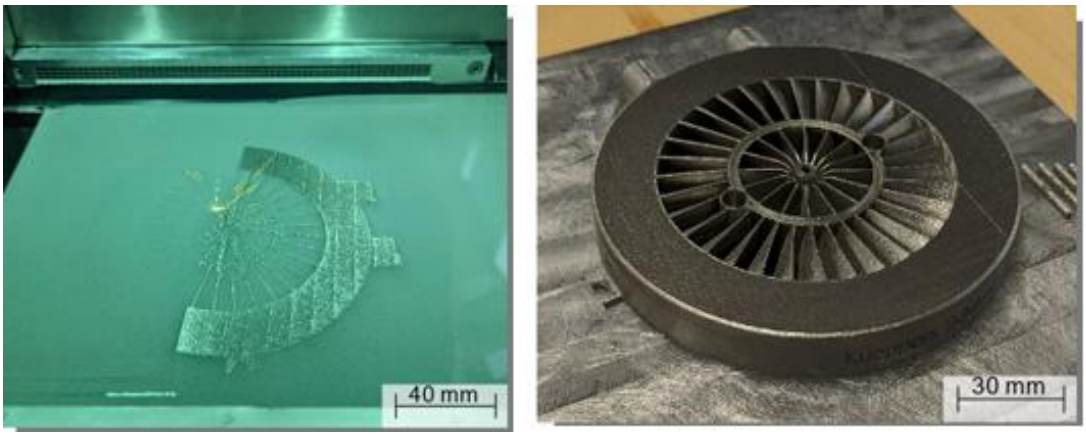


Abbildung 3: Mehrkanalige Mischeinheit während und nach der Herstellung aus Inconel 718

Nach der Fertigstellung wird die Mischeinheit in ein konventionell hergestelltes Gehäuse integriert und auf dem Prüfstand von Kueppers Solutions getestet.

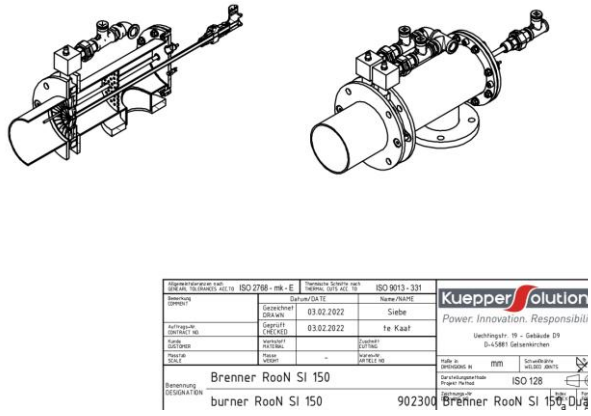


Abbildung 4: Technische Zeichnung Dual-Fuel-Brenner RooN SI 150

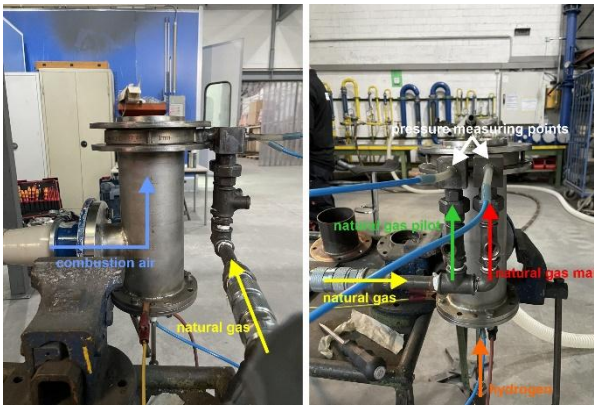


Abbildung 5: Dual-Fuel-Brenner am Versuchsstand der Kueppers Solutions GmbH

Im Rahmen des Projekts kommt für die Fertigung der Mischeinheit der Werkstoff Inconel 718 zum Einsatz. Serienprodukte bestehen hingegen aus dem temperaturbeständigeren Inconel 625. Da im Projekt keine Vorwärmung der Verbrennungsluft vorgesehen ist, erfüllen die Eigenschaften von Inconel 718 dennoch alle relevanten Anforderungen.

Zur Überprüfung möglicher fertigungstechnischer Abweichungen zwischen einer konventionellen Erdgas-Mischeinheit und der neu entwickelten Dual-Fuel-Mischeinheit erfolgt im Rahmen der Qualitätskontrolle eine experimentelle Untersuchung der Druckverluste an den Gasdüsen. Wie in **Abbildung 6** dargestellt, zeigen sich über verschiedene Leistungsbereiche hinweg nur vernachlässigbare Unterschiede.

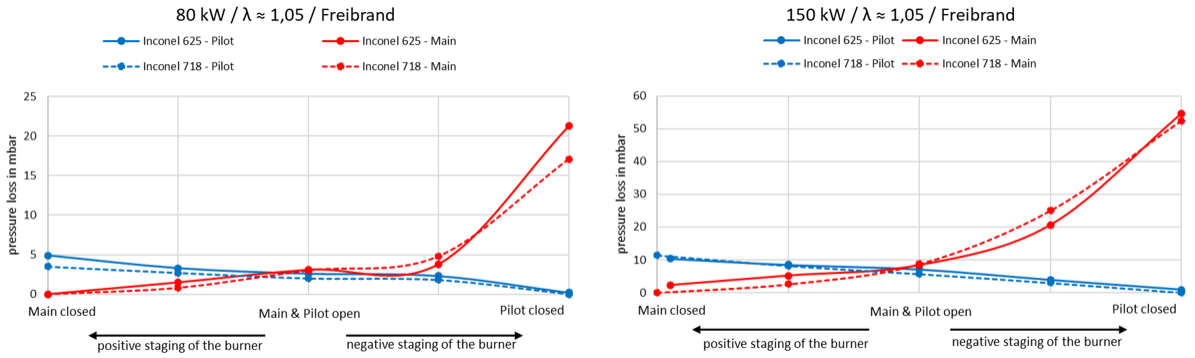


Abbildung 6: Vergleich der Druckverluste der Gasdüsen für die Werkstoffe IN625 und IN718

1.2 Arbeitspaket 2 – Experimentelle Charakterisierung erster Prototypen

Der bisherige Fokus des ersten Prototyps des mehrkanaligen H_2-Brennersystems liefert wesentliche Erkenntnisse, die sich vor allem auf die Brennstoffstufung und damit Ausprägung einer zweiteiligen Verbrennung konzentrieren. Hierbei wird bewusst in einem Teil der Verbrennung ein kräftiges Gemisch und in dem zweiten Teil der Reaktion ein mageres Gemisch angestrebt. Die detaillierten Erkenntnisse bedürfen weiterer Untersuchungen.

Um Effekte von rezirkulierendem Abgas genauer zu untersuchen hat Kueppers Solutions das Design des ersten 50kW Prototypen weiter optimiert und das Prinzip der Mischeinheit auf einen Rekuperatorbrenner angewandt, der für die Anwendung indirekter Beheizungssysteme genutzt werden kann. Der Vorteil liegt vor allem in dem Vorhandensein von zurückströmendem Abgas, dessen man sich im Zuge von weiteren reduzierenden Effekten auf die Stickoxidbildung, bedienen möchte. Neben der gestuften Verbrennung und der Anpassung von unterschiedlichen Luftverhältnissen, die bereits einen großen Fokus in den Untersuchungen dieses Forschungsprojektes erfahren, können so nun auch die Eigenschaften durch Rezirkulation von Abgas genauer untersucht werden.

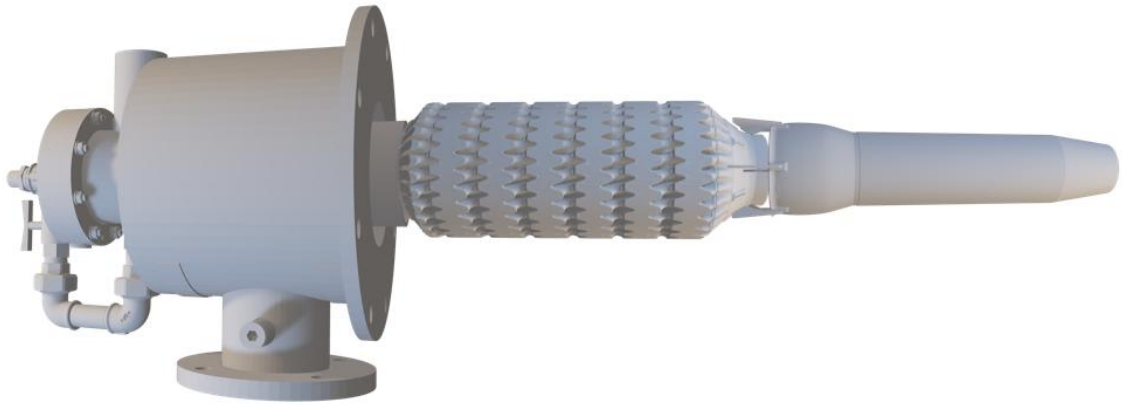


Abbildung 4: Prinzip Rekuperatorbrenner der Firma Kueppers Solutions

Generell wird ein Rekuperatorbrenner zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduktion von Schadstoffemissionen eingesetzt. Der Hauptvorteil eines Rekuperatorbrenners liegt in seiner Fähigkeit, die Wärme aus den Abgasen zurückzugewinnen und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft zu nutzen. Auch bei einem Rekuperatorbrenner wird Brennstoff und Luft vermischt und im Anschluss das Gemisch gezündet und verbrannt, wodurch heiße Verbrennungsgase entstehen.
In dem konkreten Anwendungsfall erfolgt die Verbrennung über den modifizierten Prototypen.

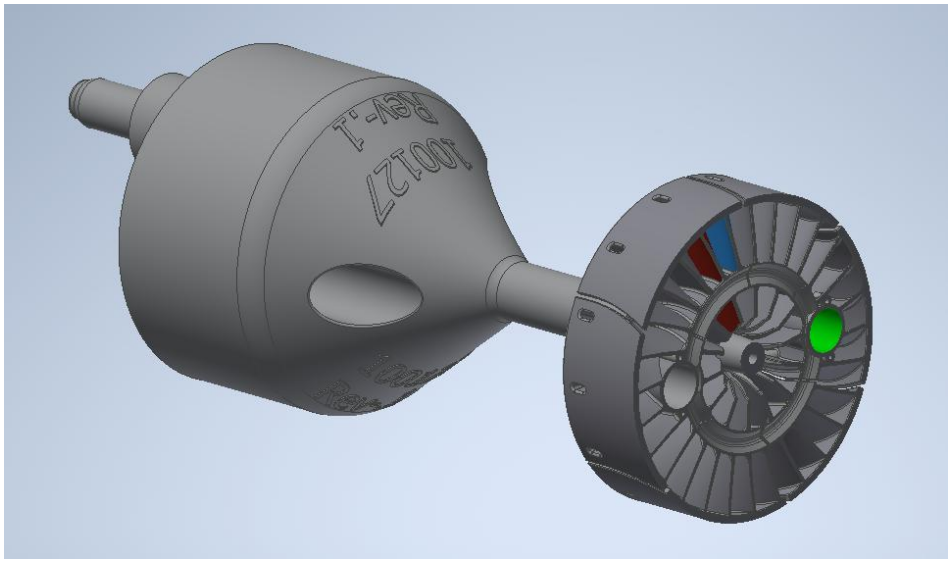


Abbildung 5: modifizierte Mischeinheit für Prototyp 50kW für Anwendung in Rekuperatorbrenner

Die heißen Abgase, die den Brenner verlassen, strömen durch einen Wärmetauscher, den sogenannten Rekuperator. Im Rekuperator geben die Abgase einen Teil ihrer Wärme an die Frischluft ab, die dem Brenner zugeführt wird. Die vorgewärmte Luft wird dann wieder in den Brennprozess eingespeist, was eine Effizienzsteigerung im Vergleich zu Kaltluftprozessen mit sich bringt. Durch die Vorwärmung der Verbrennungsluft wird weniger Brennstoff benötigt, um die gleiche Verbrennungstemperatur zu erreichen, was die Energieeffizienz des Systems erhöht.

1.3. Arbeitspaket 3 – Entwicklung simulativer Methoden & Validierung durch Bau eines Prüfstands

In Anlehnung an die Experimente aus AP 2 werden in AP 3 auch durch Kueppers Solutions simulative Ansätze entwickelt. Diese haben weniger die Untersuchung direkter Verbrennungscharakteristika, wie zum Beispiel der Flammstabilität, im Fokus, sondern konzentrieren sich vor allem darauf reduzierende Effekte der NOx-Emissionen zu erzielen. Kueppers Solutions verfolgt hier vor allem den Ansatz Abgas aus der Verbrennungszone abzuzweigen und erneut der Verbrennung zuzuführen. Die Erfahrungen von anderen Brennertypen auf diese neu entwickelten Prototypen anzuwenden, wird in diesem Zusammenhang als große Chance verstanden. Auch wenn im Rahmen dieses Projektes generell nicht auf die Einflussnahme durch vorgewärmte Verbrennungsluft eingegangen wird, so werden dennoch die Effekte auf eine Reduzierung der Stickoxidbildung durch Abgasrezirkulation genauer untersucht.

Analog hierzu soll der Brennerprototyp von Kueppers Solutions zu einem späteren Zeitpunkt von den erzielten Ergebnissen profitieren, um einen Transfer auf zukünftige Serien zu ermöglichen. Dies gilt es zudem in Form eines finalen Demonstrators zu einem späteren Zeitpunkt im Gas- und Wärme-Institut in Essen durch entsprechende Abgasmessung zu validieren.

Wie bereits erwähnt besteht bei industriellen Feuerungsprozessen generell die Problematik der Bildung von Stickoxiden (NOx), die durch Luftvorwärmung und vor allem den Einsatz vom Wasserstoffbegünstigt wird. Bei der Methode der Abgasrezirkulation wird ein Teil der Abgase in das Brenngemisch zurückgeführt, um die Entstehung von NOx deutlich zu verringern. Diese Rezirkulation wird durch ein gezielt eingestelltes Strömungsverhalten erreicht, das von der Geometrie der Brennerkonfiguration abhängt. Das Strömungsprofil muss ein Unterdruckgebiet erzeugen, das die Abgase in das Brenngemisch saugt, ähnlich dem Prinzip eines Flugzeugflügels, der genügend Unterdruck erzeugen muss, um abzuheben und in der Luft zu bleiben. Hauptaugenmerk der weiteren Methodenfindung liegt hierbei bei einer optimalen Geometriefindung des Brennerprototypen zur Erzeugung eines möglichst hohen Unterdruckgebiets. Generell und nach vorhandener Literatur wird für die weitere Betrachtung davon ausgegangen, dass sich höhere Rezirulationsraten proportional zur Reduktion der NOx-Emissionen verhält. Die Strömungsverhältnisse sollen dazu so eingestellt werden, dass ein ausreichender Unterdruck erzeugt wird, um Abgase effektiv zurückzuführen.

1.3.1 Prüfstandaufbau als praktischer Ansatz

Um eben diese Strömungsverhältnisse möglichst optimal im Sinne einer hohen Ansaugung und dadurch bedingten Rezirkulation einzustellen wird ein Versuchsstand mittels additiv gefertigter Kunststoffbauteile erzeugt. Das Ziel ist es hierdurch möglichst viele Ansätze aus den Simulationen praktisch nachzufahren und statische und dynamische Unterdrücke, sowie Rezirkulationsraten der unterschiedlichen Ansätze aufzunehmen. Die Geometrien des Prototypen werden hierzu leicht angepasst, um einen größeren Einfluss auf die Rezirkulation zu nehmen. Diese Komponenten sind der Rekuperatorausgang, das Flammrohr, der eigentliche Prototyp (auch Mischeinheit) und ein benötigter Konus an der Mischeinheit.
Auf Grundlage dieser Einflussgeometrien wurde ein vereinfachter Demonstratoraufbau ermöglicht und auf einem Kunststoffdrucker additiv gefertigt, um die reale Strömungssituation am Modell nachzubilden.

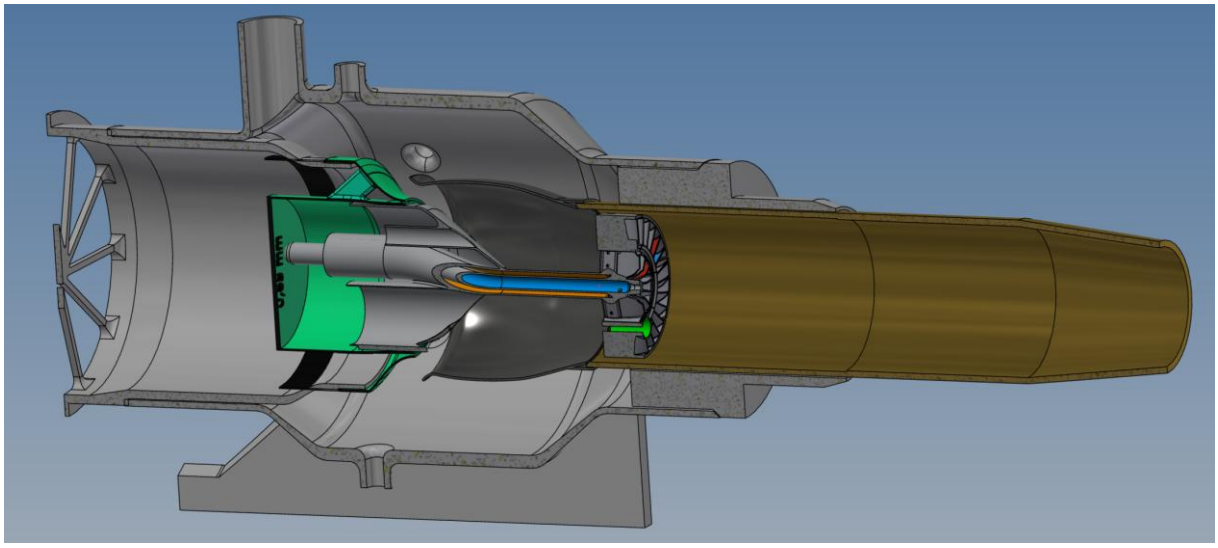


Abbildung 6: Prüfstandentwicklung - mehrteiliger Demonstrator zur Erhöhöung der Abgasezirkulation

Der Korpus dieses Demonstratoraufbaus bildet den vereinfachtem Rekuperatorausgang, an den ein Seitenkanalverdichter angeschlossen wird, um den Frischluftstrom in die Rezirkulationszone nachzubauen. Die steckbausteinartig gefertigten Komponenten können leicht ausgetauscht werden, um schnell viele unterschiedliche Konfigurationen prüfen zu können. Unterschiedliche Messstellen sorgen dafür, den Unterdruck statisch und dynamisch zu messen und mittels eines Zuflussrohres die Rezirkulation messbar zu machen. Die zugeführte Luft strömte durch das verschiebbar gelagerte Flammrohr zurück in die Umgebung. Die Einsaugrate wird als Maß für die Rezirkulation über eine zusätzliche Volumenstrommessung am Zuflussrohr messbar gemacht. Es wurden möglichst viele Variationen der benannten Einflussgeometrien entworfen, gelistet und nach Effektivität sortiert. Diese wurden ebenfalls auf dem Kunststoffdrucker additiv gefertigt und auf dem beschriebenen Demonstratorprüfstand getestet.

Abbildung 7: Variationen zur Optimierung des Einsaugungsgebiets

Für den Rekuperatorausgang, das Flammrohr und für die Mischeinheit werden diverse potentiell sinnvolle Variationen erzeugt und deren Zusammenspiel untersucht. Es ergaben sich mehrere hundert theoretische Konfigurationen, die durch schnell erfolgende Tests und

Diskussionen auf eine prüfbare Zahl reduziert werden konnte. Dies herausgefahrene optimale Geometriefindung ähnlich zu der in Abbildung 3 dargestellten, gilt es zudem in einem angepassten Prototypen zu finalisieren und dann warm zu testen. Die bisherigen Auswertungen und Erkenntnisse erlauben hier vielversprechende Auswirkungen auf die Reduktion der NOx-Emissionen. Die finalen Ergebnisse dieses Arbeitspaketes werden im Abschlussbericht zusammen mit den Ergebnissen des finalen Demonstrators im Gas- und Wärme-Institut in Essen durch entsprechende Abgasmessung validiert.

1.3.2 Variationen der Dual-Fuel-50kW-Mischeinheit

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen in Arbeitspaket 2 sowie dem zuvor beschriebenen Teil von AP 3, in dem insbesondere durch Kaltversuche positive Effekte einer Beimischung oxidierter Abgase in die Oxidationszone untersucht wurden, entwickeln die Projektpartner numerische Modelle zur Beschreibung der turbulenten Verbrennung und der strömungsmechanischen Prozesse (CFD). Ziel ist es, die Modellbildung iterativ mit den Messergebnissen aus AP 2 abzugleichen, um robuste und übertragbare Simulationsansätze zu entwickeln. Die wesentlichen CFD-Simulationen werden dabei primär durch die beteiligten Forschungseinrichtungen durchgeführt. Dies ermöglicht einen fundierten methodischen Vergleich der Ansätze und Ergebnisse aller Partner. Der Abgleich sowie der gezielte Wissenstransfer der Simulationsmethoden von den Forschungseinrichtungen zu den Industriepartnern stellen einen zentralen Bestandteil des Projekts dar und fungieren als verbindendes Element der interdisziplinären Zusammenarbeit.

Zum Einsatz kommen zwei Modellierungsstrategien mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad: die Large Eddy Simulation (LES) zur hochaufgelösten Analyse feinskaliger Phänomene sowie Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) bzw. Unsteady RANS (URANS) für großskalige Strömungssimulationen. LES ermöglicht eine differenzierte Abbildung turbulenter Strukturen und erlaubt insbesondere eine detaillierte Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Turbulenz und chemischer Reaktion.

Inspiriert durch die positiven Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zur Abgasrezirkulation entwickelte Kueppers Solutions eine Vielzahl an Varianten der Mischeinheit, die zunächst simulationsgestützt analysiert wurden. Dabei wurde insbesondere die Geometrie der Strömungskanäle sowie das Verhältnis der eingebrachten Gase systematisch angepasst. Durch gezielte Variation der Strömungsgeschwindigkeiten konnte eine stabile, NO_x-arme Flammenbildung erzielt werden. Im Anschluss an die simulationsgestützte Optimierung wurden ausgewählte Varianten experimentell am firmeninternen Prüfstand validiert; einzelne Prototypen kamen zudem im Rahmen weiterführender Untersuchungen am Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI) zum Einsatz. Eine wesentliche Rolle spielte dabei die Integration

eines separaten Wasserstoffkanals, der eine schnelle und gezielte Eindüsung des Wasserstoffs in die Oxidationszone ermöglichte. Besonders hervorzuheben ist der positive Einfluss des variabel gestalteten Rezirkulationsverhältnisses, welches sich bei der Verbrennung wasserstoffhaltiger Gemische als wirksamer Hebel zur NO_x-Reduktion erwiesen hat.

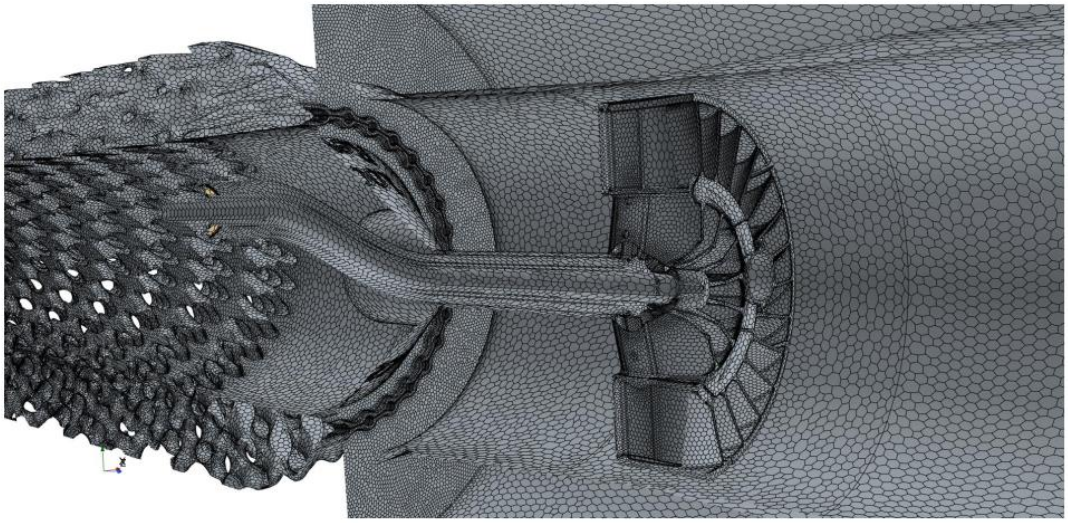


Abbildung 8: Mesh eines 50kW Dual-Fuel-Systems

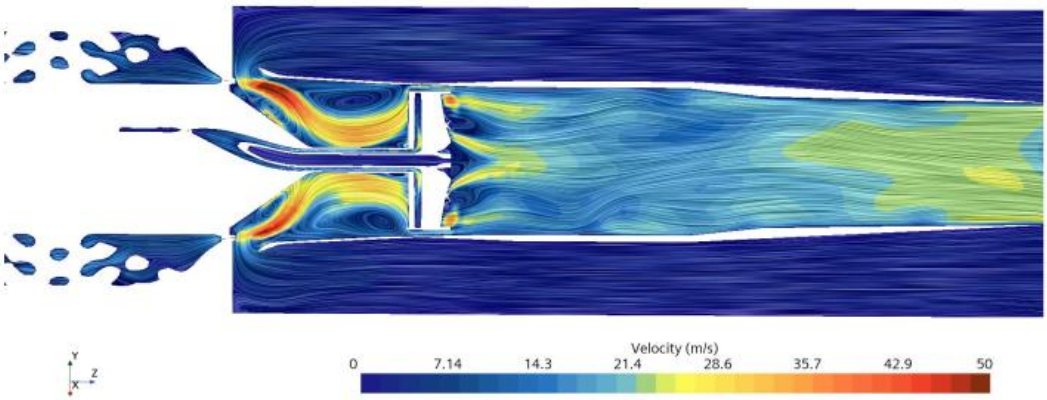


Abbildung 9: gewünschte Stabilisierung der Flamme an V-Shroud

Die abgebildete Strömungssimulation zeigt die Geschwindigkeitsverteilung sowie die resultierenden Strömungsrichtungen innerhalb der untersuchten Mischeinheit bei Betrieb mit Erdgas und Luft. Die Simulation bildet ausschließlich den kalten Strömungszustand ab, also ohne chemische Reaktion. Besonders markant sind die ausgeprägten Rezirkulationszonen im inneren Bereich der Brennergeometrie, welche zur effektiven Rückführung heißer Gase und damit zu einer verbesserten Durchmischung beitragen.

Die Strömungskanäle sind so ausgelegt, dass im zentralen (inneren) Bereich ein fetteres Erdgas-Luft-Gemisch vorliegt, während in den äußeren Regionen ein magereres Gemisch eingespeist wird. Diese Verteilung unterstützt eine stabile Flammenführung sowie eine gestufte Re-

aktion mit verringerter Spitzentemperatur. Die Farbskala der Geschwindigkeit zeigt lokale Maxima an den Düsenöffnungen, aus denen sich eine überlagerte Hauptströmung ausbildet, flankiert von kleinräumigen turbulenten Wirbeln.
Die Simulation bestätigt, dass die gewählte Strömungsführung und Geometrie sowohl die rasche Einspeisung als auch eine kontrollierte Vermischung der Medien ermöglichen – beides essenzielle Voraussetzungen für eine stabile, emissionsarme Verbrennung bei späterer Zündung.

1.4 Arbeitspaket 4 - Skalierung des Brennerkonzeptes

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete wurde ein finaler 50-kW-Brennerprototyp realisiert, der gezielt die dort gewonnenen Erkenntnisse integriert und technologisch weiterentwickelt. Im Zentrum stand dabei die konsequente Übertragung der optimierten Strömungs- und Verbrennungsführung auf einen unserer iRecu®-Brenner. Dieser hochentwickelte Rekuperatorbrenner zeichnet sich durch eine besonders energieeffiziente Bauweise aus und nutzt eine additiv gefertigte TPMS-Struktur (Triply Periodic Minimal Surface), um extrem hohe Luftvorwärmraten von über 90 % zu erzielen – ein im industriellen Maßstab außergewöhnlicher Wert, der zu hohen feuerungstechnischen Wirkungsgraden führt. Gerade in diesem thermisch hochbelasteten Umfeld ist das Verhalten der Flamme von zentraler Bedeutung. Mittels einer gezielt stabilisierten, emissionsarme Flamme lassen sich trotz hoher Effizienz zeitgleich geringe NOx-Emissionen realisieren.
Zur Erreichung wurden zwei wesentliche Entwicklungen miteinander kombiniert. Zum einen kam eine weiterentwickelte Dual-Fuel-Mischeinheit zum Einsatz, die eine flexible und homogene Mischung von Wasserstoff und Erdgas ermöglicht. Zum anderen wurden gezielte Anpassungen im Bereich der Abgasrückführung vorgenommen, die zuvor im Rahmen umfangreicher Kaltprüfungen und experimenteller Demonstratoraufbauten evaluiert worden waren. Diese Maßnahmen führten zu einer verbesserten Kontrolle der Verbrennungstemperaturen sowie einer signifikanten Reduktion der Stickoxidemissionen – auch bei wasserstoffhaltigen Brennstoffen.
Die konstruktiven und strömungstechnischen Anpassungen wurden zunächst am hauseigenen Prüfstand von Kueppers Solutions erprobt. Aufbauend auf den dort erzielten Ergebnissen erfolgte eine weiterführende Validierung der Brennereigenschaften im Rahmen offizieller Versuchskampagnen am Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI). Die dort gewonnenen Messdaten bestätigten die Wirksamkeit der eingesetzten Maßnahmen und unterstrichen das hohe Potenzial einer so optimierten Dual-Fuel-Mischeinheit für den zukünftigen Einsatz in wasserstoffbasierten Hochtemperaturprozessen.

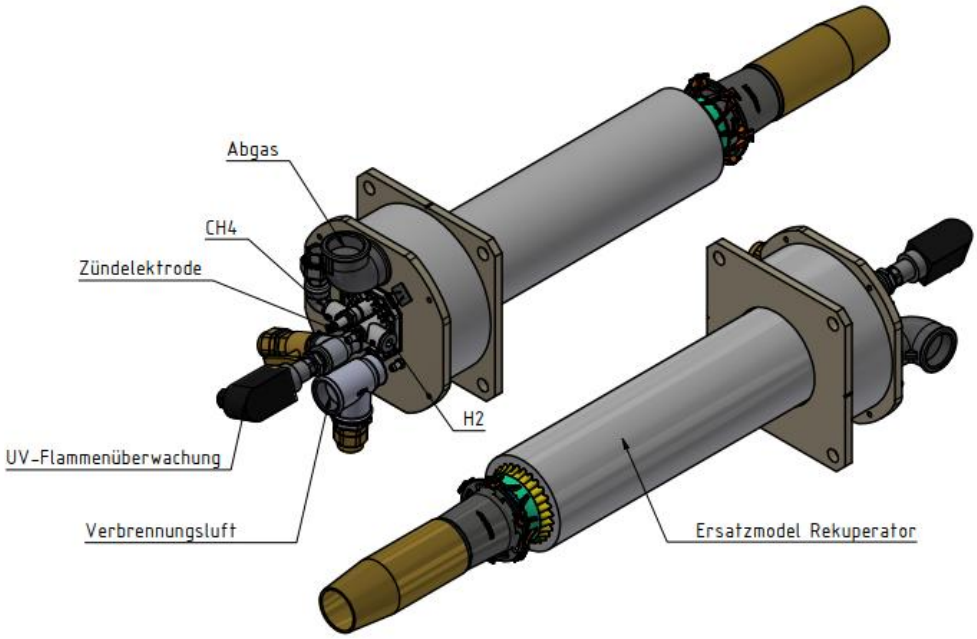


Abbildung 10: Überarbeiteter 50kW Dual-Fuel Rekuperatorbrenner-Prototyp

1.5.1 Arbeitspaket 5 - Demonstration und Emissionsnachweis

Bezugnehmend auf die zuvor erläuterten Konzepte zur Emissionsminderung wurde der entwickelte 50 kW-Prototypbrenner in einem Strahlrohr unter realitätsnahen Bedingungen bei mittleren Strahlrohrtemperaturen von 920 °C getestet. Die Versuche fanden am unternehmensinternen Prüfstand statt.

Die nachfolgende Grafik zeigt den Vergleich der Emissionen (NO_x, CO sowie Restsauerstoffgehalt im Abgas) zwischen dem iRecu-Prototyp und einem konventionellen Rekuperatorbrenner:

Es zeigt sich deutlich, dass der iRecu-Brenner signifikant geringere NO_x-Emissionen (rote Linie, durchgezogen) über den gesamten Lastbereich hinweg aufweist – ein Ergebnis der zuvor beschriebenen Maßnahmen wie Absenkung des Sauerstoffpotentials durch Rückführung heißer Abgase, gestufte Verbrennung sowie lokale Sauerstoffverarmung. Die CO-Emissionen bleiben dabei konstant niedrig und liegen auf ähnlich niedrigem Niveau wie beim Referenzbrenner. Gleichzeitig ist der Restsauerstoffgehalt im Abgas leicht reduziert, was auf eine effizientere Verbrennung und geringere Luftüberschüsse hinweist.

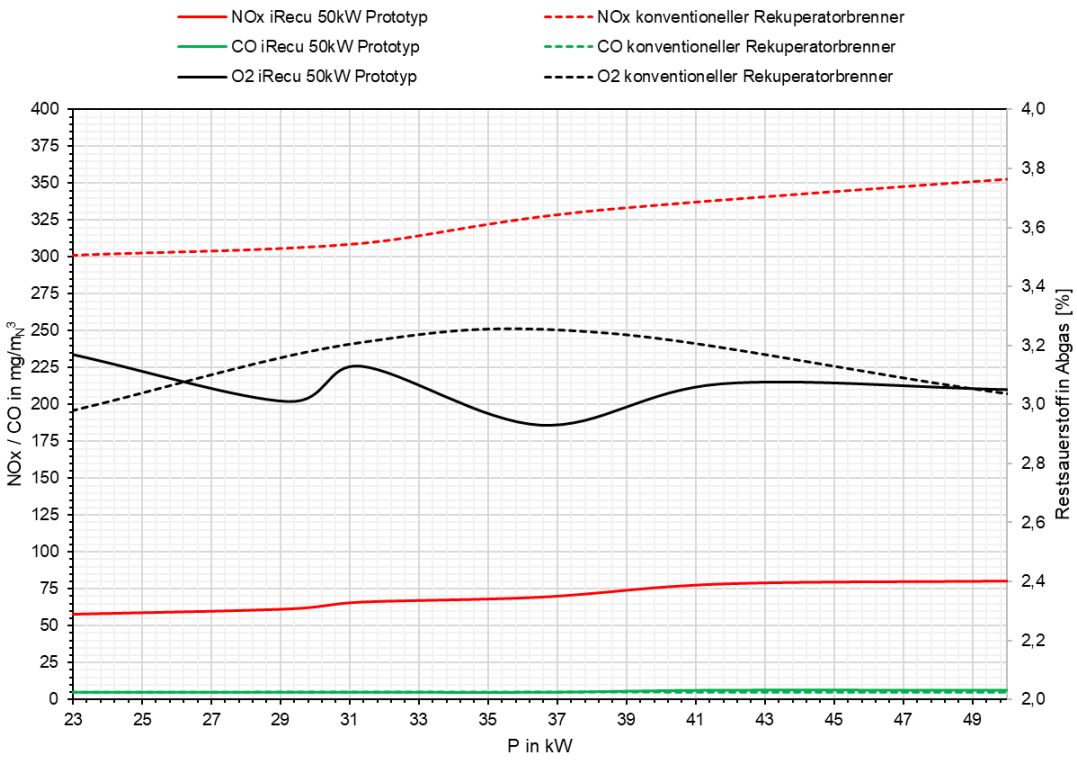


Abbildung 11: Emissionen 50kW Prototyp im Vergleich [Erdgas]

Die NO_x-Reduktion um über 70 % im Vergleich zum konventionellen System verdeutlicht die Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen und markiert einen entscheidenden Fortschritt im Hinblick auf emissionsarme Hochtemperaturprozesse.

1.5.2 Übergang zu wasserstoffbasierten Brenngasgemischen – flexible Dual-Fuel-Versorgung

Im Anschluss an die Validierung des iRecu-Brenners mit Erdgas wurden schrittweise Wasserstoffbeimischungen untersucht, um das Verhalten des Systems unter verschiedenen Brenngaszusammensetzungen zu analysieren. Die nebenstehende Bildreihe zeigt exemplarisch den optischen Flammenverlauf bei einer schrittweisen Erhöhung des Wasserstoffanteils von 0 % auf 100 %. Bereits visuell wird die zunehmende Reaktivität und Veränderung der Flammstruktur mit wachsendem Wasserstoffanteil deutlich. Besonders bei 100 % Wasserstoffanteil ist die Flamme für das menschliche Auge nahezu unsichtbar. Um dennoch eine visuelle Beurteilung zu ermöglichen, wurde hier eine spezielle Bildgebung auf Basis der Emissionen von OH-Radikalen eingesetzt. Diese Methode erlaubt es, die ansonsten unsichtbare Flamme sichtbar zu machen und deren Ausbreitung zu analysieren.

Die technische Umsetzung dieser Flexibilität wurde durch eigens entwickelte Dual-Fuel-Mischeinheit bzw. Weiterentwicklung des ursprünglichen 50kW-Prototypen ermöglicht. Durch den

Einsatz additiver Fertigung konnten separate und jeweils strömungsoptimierte Brenngaskanäle realisiert werden. Diese wurden gezielt auf die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Erdgas und Wasserstoff ausgelegt.
Im Speziellen erfordert der Wasserstoff aufgrund seiner:

- hohen Diffusionsgeschwindigkeit,
- geringen Zündenergie und
- signifikant höheren adiabaten Flammentemperatur

eine deutlich raschere und gezielte Zufuhr in die Reaktionszone.

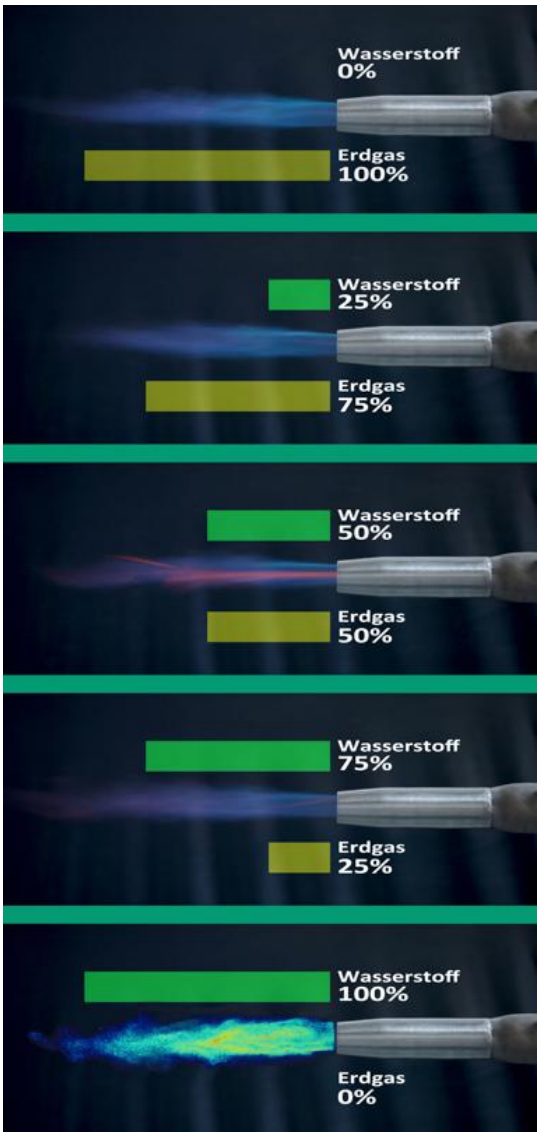


Abbildung 12: Freibrandversuche unterschiedlicher Wasserstoff-Erdgas-Stufungen

Die Brenngaskanäle für Wasserstoff wurden daher so gestaltet, dass der Wasserstoff frühzeitig, aber lokal kontrolliert eingetragen wird, um eine stabile und gleichmäßige Flammenbildung

zu gewährleisten. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, lokale Überhitzung oder Hot-Spots zu vermeiden – ein zentraler Aspekt bei Hochtemperaturprozessen mit potenzieller Materialbeanspruchung.

Diese konstruktive Freiheit durch additive Fertigung ermöglichte eine kompakte, aber hochfunktionale Brennereinheit, welche sowohl rein erdgasbasierten Betrieb als auch den vollständigen Umstieg auf Wasserstoff erlaubt – einschließlich aller Zwischenmischungen. Damit ist der Brenner bereit für den schrittweisen Übergang hin zu CO_2-freien Industrieprozessen.

Letztlich erfolgte die Umsetzung des Dual-Fuel-Betriebs mit Erdgas und Wasserstoff am GWI. Hierbei kam ein eigens entwickelter, angepasster Prototyp zum Einsatz, der eine flexible Brennstoffzufuhr über eine additive gefertigte Mischeinheit ermöglicht. Diese erlaubt eine präzise Steuerung der Gaszufuhr über getrennte und auf die jeweilige Verbrennungscharakteristik optimierte Brenngaskanäle. Dies ist insbesondere bei der Verwendung von Wasserstoff essenziell, da dieser aufgrund seiner deutlich höheren Flammentemperatur und schnelleren Reaktionskinetik besonders rasch und gleichmäßig in die Reaktionszone eingebracht werden muss.

Für die Versuchsreihe wurden praxisnahe Ofenbedingungen mit einer mittleren Ofenraumtemperatur zwischen 950 °C und 1150 °C gewählt. Die thermische Leistung variierte dabei im Bereich von 0 bis 40 kW. Um industrielle Bedingungen zu simulieren, wurde die Luftvorwärmung auf 400 °C begrenzt.

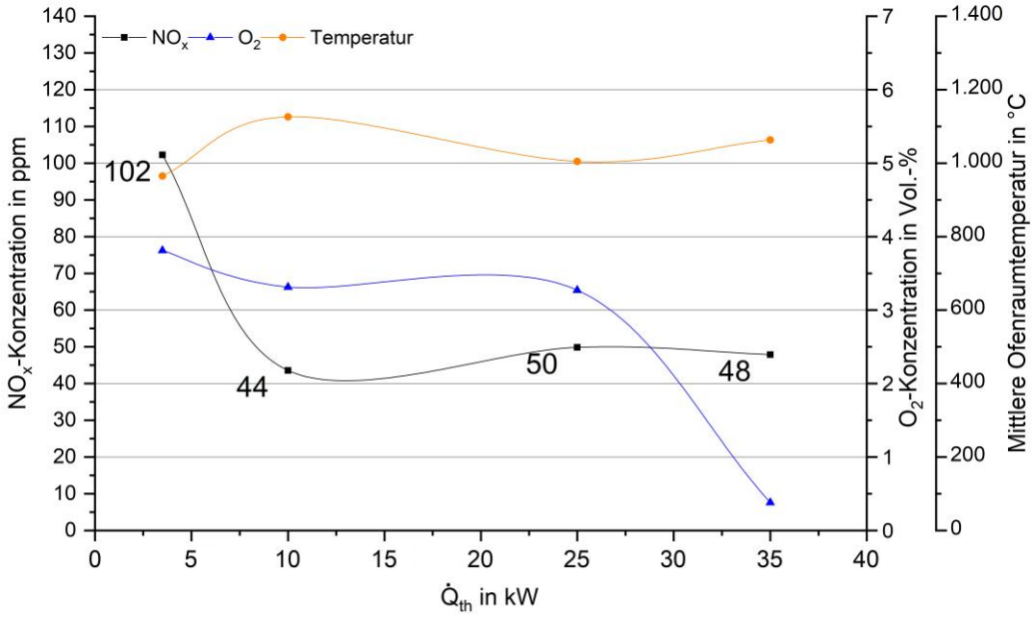


Abbildung 13: Emissionsmessungen am GWI eines 50kW Dual-Fuel-Prototypen (Erdgas)

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom verwendeten Brennstoff. Während beim Erdgasbetrieb die NO_x-Konzentrationen bei niedrigen Leistungen moderat ausfallen und ein typisches Minimum bei bzw. ab mittlerer Leistung (ca. 10 kW) erreicht wird, zeigen sich beim Wasserstoffbetrieb deutlich höhere Emissionen, insbesondere im unteren Leistungsbereich. Mit steigender Leistung sinkt jedoch auch hier der NO_x-Ausstoß signifikant. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer angepassten Brennergeometrie und -führung, um auch bei wasserstoffreichen Betriebsmodi emissionsarme Verbrennung zu ermöglichen.

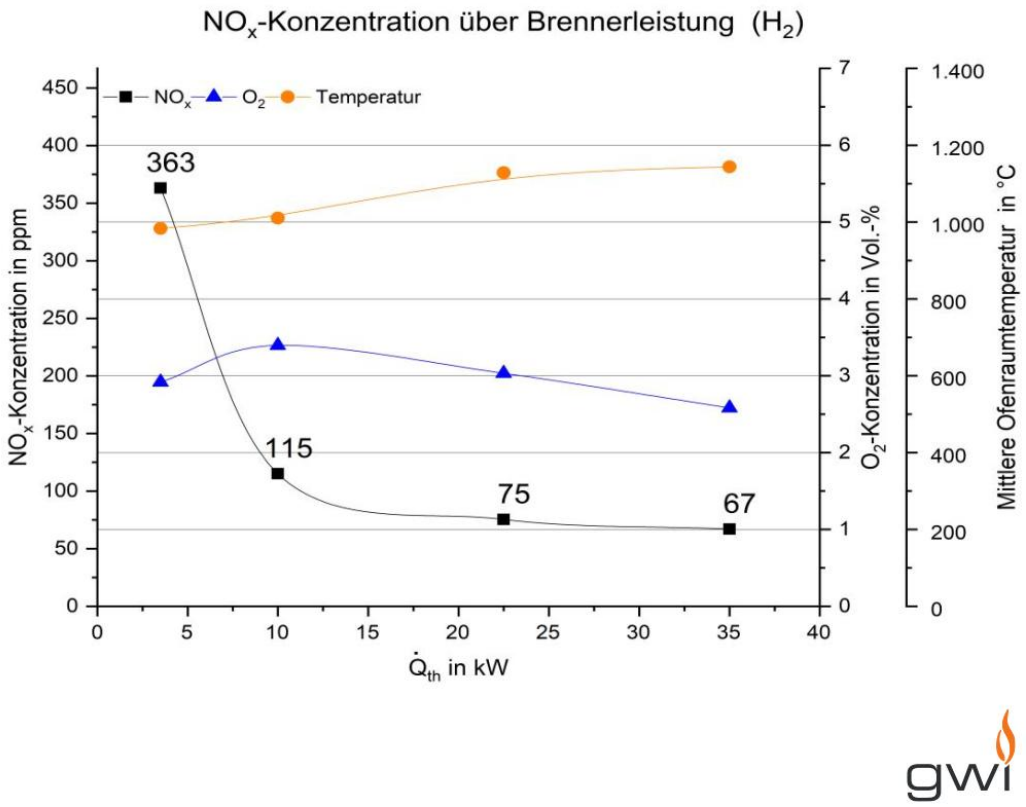


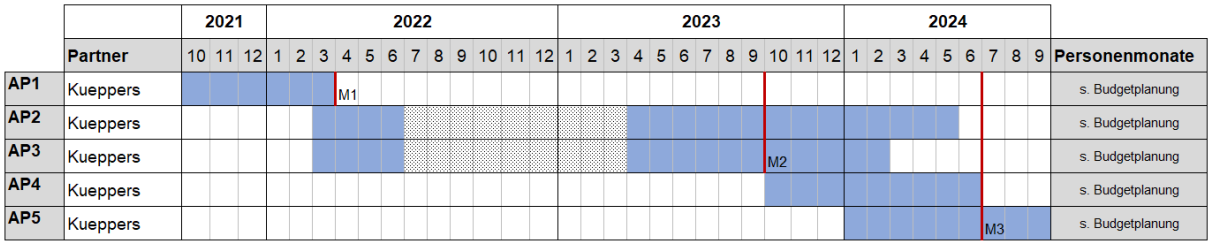
Abbildung 14: Emissionsmessungen am GWI eines 50kW Dual-Fuel-Prototypen (H_2)

2 Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Aufgrund von Herausforderungen bei der Einrichtung der Messtechnik und der Validierung der Mess- und Auswertungsmethode anhand eines vereinfachten Brennersystems am Institut für Verbrennungstechnik Technische Verbrennung (ITV) musste der Beginn der Messungen an den Kueppers-Brennern verschoben werden. Entgegen der ursprünglichen Planung war das ITV gezwungen, die Brennertests nicht im Brennerlabor des ITV durchzuführen, sondern auf eine alternative Laboreinrichtung auszuweichen, um trotz der genannten Herausforderungen Messdaten mit alternativen Messmethoden generieren zu können.

Diese unvorhergesehenen Mehrarbeiten beim ITV haben den experimentellen Teil des Projekts zur Flammencharakterisierung um etwa neun Monate verzögert. Während dieser Zeit konnte an der Simulation weitergearbeitet werden. Die Messergebnisse bezüglich Flammentopologie, Mischungszustand und Flammenstabilität wurden erzeugt. NO_x-Messungen sowie weitere Versuchsreihen konnten erfolgreich absolviert werden, um Aufschluss über die zu untersuchenden Charakteristika zu geben.

Ein finaler Demonstrator des Kueppers Solutions-Brenners wurde, wie ursprünglich geplant, im Gas- und Wärme-Institut für abschließende Emissionsmessungen eingesetzt. Auf dieser Basis konnte gemeinsam mit dem DAP die geplante Designoptimierung hinsichtlich einer verbesserten 3D-Druckbarkeit aller Komponenten vorgenommen werden.



Meilensteine:

M 1	Erstellung des Lastenhefts, Auslegung des ersten 50-kW-Prototypen
M 2	Simulation und Experimente mit ersten Prototypen zur Ermittlung geeigneter Flammbilder, Fertigungsgerechtes Design (DfAM)
M 3	Demonstratoren gefertigt, Demonstration bei Endanwender und Emissionsnachweis erfolgt

Abbildung 15: angepasste Zeit- & Meilensteinplanung

3 Änderungen der Aussichten auf Erreichen der Vorhabensziele

Im Berichtszeitraum haben sich die Aussichten auf das Erreichen der Ziele nicht geändert.

4 Forschungs- und Entwicklungsergebnisse Dritter

Im Berichtzeitraum sind keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5 Notwendige Änderungen der Zielsetzung

Es ist keine Änderungen in der Zielsetzung notwendig.

6 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans – abschließende Stand der wirtschaftlichen und technischen Verwertungsperspektiven

Im Rahmen des vorliegenden Projekts sind seitens Kueppers Solutions keine Erfindungen entstanden und es wurden keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen. Die entwickelten

Konzepte und technischen Lösungen bauen auf bestehendem Know-how auf und werden im Rahmen der bestehenden unternehmerischen Aktivitäten weiterentwickelt.

Kueppers Solutions verfolgt bereits seit mehreren Jahren eine strategische Ausrichtung hin zur additiven Fertigung und hat wesentliche Teile der eigenen Fertigungstiefe konsequent auf AM-Prozesse (Additive Manufacturing) umgestellt.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse ist als hoch einzuschätzen. Es besteht ein wachsender Bedarf an emissionsarmen, wasserstofffähigen Brennerlösungen im In- und Ausland, insbesondere in energieintensiven Branchen wie der Stahl-, Glas-, Keramik- und chemischen Industrie. Die im Projekt entwickelten Konzepte stoßen auf konkretes Interesse bei Marktteilnehmern, die angesichts steigender regulatorischer Anforderungen und laufender Transformationsprozesse investitionsbereit sind. Kueppers Solutions wird seine technologischen Kompetenzen im Bereich der additiv gefertigten Brennerkomponenten weiter ausbauen und gezielt auf die Anforderungen dieses dynamischen Marktes ausrichten.