

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

25/01/2024

Projekttitlel:

Bluetifuel - Blue flames for low-emission
combustion using non-carbon eco-fuels

Projektnummer:

881129

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

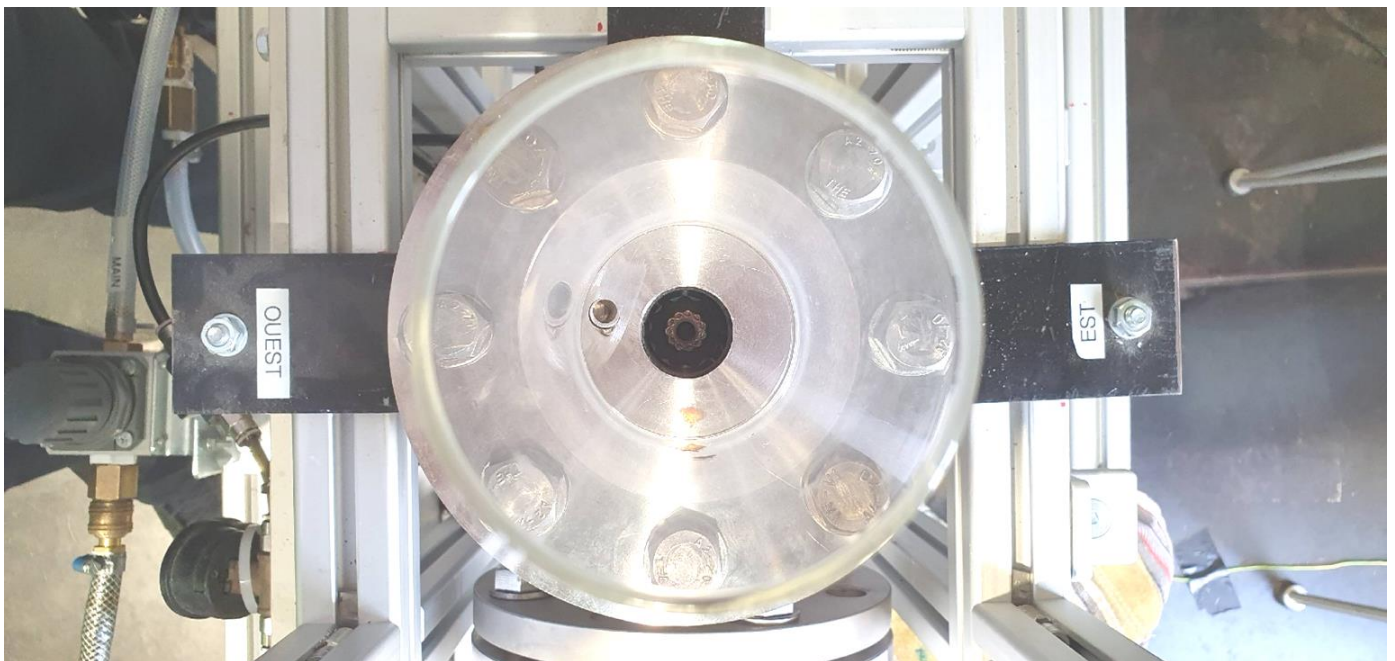
Ausschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/01/2021
Projektende	31/12/2023
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Combustion Bay One e. U. (Konsortialführer) P&P Industries AG (Konsortialpartner) FH JOANNEUM GmbH (Konsortialpartner)
AnsprechpartnerIn	Fabrice Giuliani
Postadresse	Schuetzenhofgasse 22/7
Telefon	0316 22 89 80
Fax	0316 22 89 80 15
E-Mail	fabrice.giuliani@cbone.at
Website	www.CBOne.at

Bluetifuel

Blue flames for low-emission combustion using non-carbon eco-fuels

AutorInnen:

Andrea Hofer, CBOne



**Blue flames
for low-emission combustion
using non-carbon eco-fuels**

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Pulsierte Verbrennung	7
3.2	Laborversuche Kilowattbereich	8
3.3	Versuche im MW-Bereich	11
3.4	CFD	12
3.5	Digital Twin	13
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	14
4.1	Ergebnisse pulsierte Verbrennung	14
4.1.1	Wasserstoffflamme ohne Pulsation	14
4.1.2	Wasserstoffflamme mit Sirenen-induzierter Pulsation	14
4.1.3	Spektralanalyse	15
4.1.4	Temperatur- und Abgasmessungen	16
4.2	Ergebnisse Laborversuche Kilowattbereich	18
4.2.1	Wasserstoffflamme	18
4.2.2	Wasserstoff und gemischte Ecofuels	19
4.3	MW-Brenner	22
4.4	CFD-Analysen	22
4.5	Ergebnisse Digital Twin	24
5	Ausblick und Empfehlungen	25
6	Literaturverzeichnis	25
7	Anhang	26
8	Kontaktdaten	26

2 Einleitung

Ausgelöst durch die vorherrschende Problematik des Klimawandels und durch die zusätzlich auftretende Verknappung der fossilen Energieträger wurden neue Wege für Ecofuels beschritten. Eine Technologie namens „Power-to-X“ liefert einen vielversprechenden Energiespeicher für erneuerbare Ressourcen. Dabei kann durch überschüssigen Strom aus Wind-, Solar- oder Wasserkraft ein nicht-konventioneller Ecofuel generiert werden, welcher in der bestehenden europäischen Gas- und Ölinfrastruktur gespeichert wird. Dieser klimaneutral gewonnene Brennstoff kann zur Deckung der elektrischen Residuallast oder zur Deckung des Wärmebedarfs herangezogen werden.

In diesem Projekt beschäftigen wir uns speziell mit kohlenstofffreien Ecofuels, welche CO₂-frei verbrennen, wie Wasserstoff H₂, Ammoniak NH₃, Verbindungen wie Schwefelwasserstoff H₂S und jede beliebige Mischung dieser Stoffe, die meist in unterschiedlichen Verfahren/Prozessen als Nebenprodukte anfallen, aber noch nicht industriell thermisch verwertet werden, siehe Abbildung 1. Grund für die mangelnde thermische Verwertung dieser Stoffe liegt einerseits in gewissen, neuartigen Sicherheitsrisiken, andererseits in der hohen Fluktuation der Zusammensetzung dieser Brennstoffe, da Verunreinigungen auftreten.

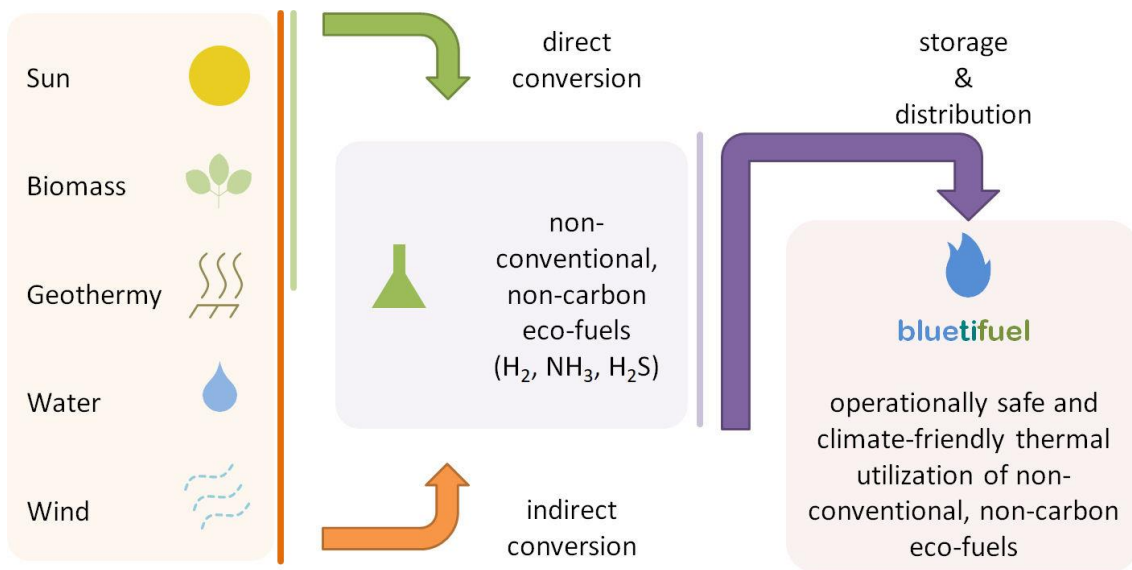


Abbildung 1: Das Projekt Bluetifuel - Der Betrieb von thermischen Anlagen (Energie, Hochtemperaturprozessen, Verfahrenstechnik) soll ohne CO₂-Emissionen ermöglicht werden.

Im Rahmen des Projektes „Bluetifuel“ will das Konsortium, bestehend aus, Combustion Bay One e.U., FH JOANNEUM GmbH und P&P Industries AG eine vollständig digitalisierte Verbrennungstechnologie entwickeln, welche auf Basis einer präzise-gesteuerten, erzwungenen Flammenturbulenz arbeitet. Durch die kontrolliert erhöhte Flammenaktivität, ersichtlich durch die Veränderung der Flammenform und der Energiedichte, kommt es zu einer sehr guten Vermischung der Reaktanden, was einen vollständigen Ausbrand der teilweise toxischen Brennstoffe gewährleistet. Zusätzlich können unerwünschte, gasförmige Schadstoff wie Stickoxide (NO_x) auf ein Minimum reduziert werden, da der Pulsationsprozess die Möglichkeit bietet, Mischungen mit instabilem Verbrennungsvorgang stabil ablaufen zu lassen. Des

Weiteren wird die thermische Verwertung von H₂S zur Produktion von Schwefelsäure verwendet, wodurch der Bereich der Verfahrenstechnik erschlossen wird. Diese Strategie weist hohes Potential in Hinblick auf die bestmögliche Nutzung von kohlenstofffreien Ecofuels auf, da eine flexible, kompatible und sichere Anwendung von gemischten Brennstoffen oder Reinstoffen, erfolgt. Entscheidende Vorteile in Bezug auf die Betriebssicherheit werden durch die Möglichkeit der thermischen Verwertung des Brennstoffes im stark verdünnten Zustand dargelegt. Digitalisiert wird ein Prozess, der eine hochgradig reaktive Kraftstoffdynamik mit schnellen Messungen und schnell ansprechenden Aktuatoren verbindet. Die Digitalisierung ist das wichtigste Merkmal des Projekts, bei dem Messungen, Entscheidungen und Aktuatorik im Kilohertzbereich arbeiten. Der digitale Regelkreis enthält einen adaptiven Einlass, der starke Schwankungen des Energiegehalts des Brennstoffes verfolgen kann, einen pulsierten Brenner, welcher das Ergebnis einer früheren Studie über die vollständige Verbrennung von Biogasen mit niedrigem Energieinhalt ist, und die Kontrolle der Schadstoffe im Abgas. Der pulsierte Verbrennungsprozess wird durch Messung der Schadstoffkonzentration und automatischer Adaption der Eintrittsbedingungen (Regelkreis) optimiert, um eine vollständige Verbrennung der Reaktanden zu erreichen und den Stickoxid- und Rußgehalt der Abgase zu minimieren. In diesem Kooperationsprojekt bei niedrigem Entwicklungslevel (ca. TRL 4) wird sich Combustion Bay One mit der Entwicklung der pulsierten Verbrennung und ihrer Anpassung an die kohlenstofffreien Ecofuels befassen. Die FH JOANNEUM wird für experimentelle Tests im Labormaßstab, für die Validierung des Regelkreises und für die Erstellung eines Digital Twins der Anlage verantwortlich sein. Die P&P Industries AG wird einen Demonstrator im industriellen Labormaßstab realisieren und im firmeninternen Labor testen. Ziel liegt darin, diese Technologie für thermische Leistungen im Megawatt-Bereich zu validieren. Dieses Verfahren ist disruptiv und der Bluetifuel-Brenner im großen Labormaßstab wird der erste seiner Art sein. Der Fokus des Projektes liegt darin, einen positiven Beitrag zur Erreichung der Energiewende in Österreich und Europa zu schaffen. Am Ende des Projekts soll ein Weg für eine sichere und optimale Nutzung von kohlenstofffreien Ecofuels aufgezeigt werden.

Diese Arbeit ist so strukturiert, dass zunächst ein Überblick über das Projekt Bluetifuel gegeben wird. Danach werden einzelne Arbeitspakete genauer beschrieben und die angewendeten Methoden erklärt bzw. die verwendeten Materialien und Hilfsmittel genannt. Anschließend werden die dadurch erreichten Ergebnisse dargestellt und beschrieben. Abschließend werden mögliche weiterführende Schritte genannt und der Erfolg des Projekts bewertet.

3 Inhaltliche Darstellung

Das strategische Hauptziel des Bluetifuel-Projektes besteht darin, die Vorteile einer ultramageren Verbrennung in Bezug auf die Stickoxidperformance mit einer präzise gesteuerten, hoch digitalisierten, erzwungenen Flammenpulsation zu kombinieren und damit eine sichere, stabile, vollständige und emissionsarme thermische Verwertung der Ecofuels H₂, NH₃ und H₂S zu gewährleisten.

3.1 Pulsierte Verbrennung

Für die emissionsarme thermische Verwertung von Ecofuels wurde zunächst ein neuartiges Wasserstoffbrennerdesign mit ausreichender Stabilität gegen Flashbacks (die Flamme springt in den Einlass, was den gesamten Brenner beschädigen kann) entwickelt und getestet. Der Brenner nutzt eine vorgemischte, magere Verbrennung von Wasserstoff, bei der eine abgehobene Flamme durch Drallstabilisierung vom Flashback abgehalten wird. Um die Stabilität gegen Flashbacks zu testen wird überprüft, ob die Beschallung mittels Pulsationseinheit (Sirene), siehe Abbildung 2, die Flamme beeinflusst.

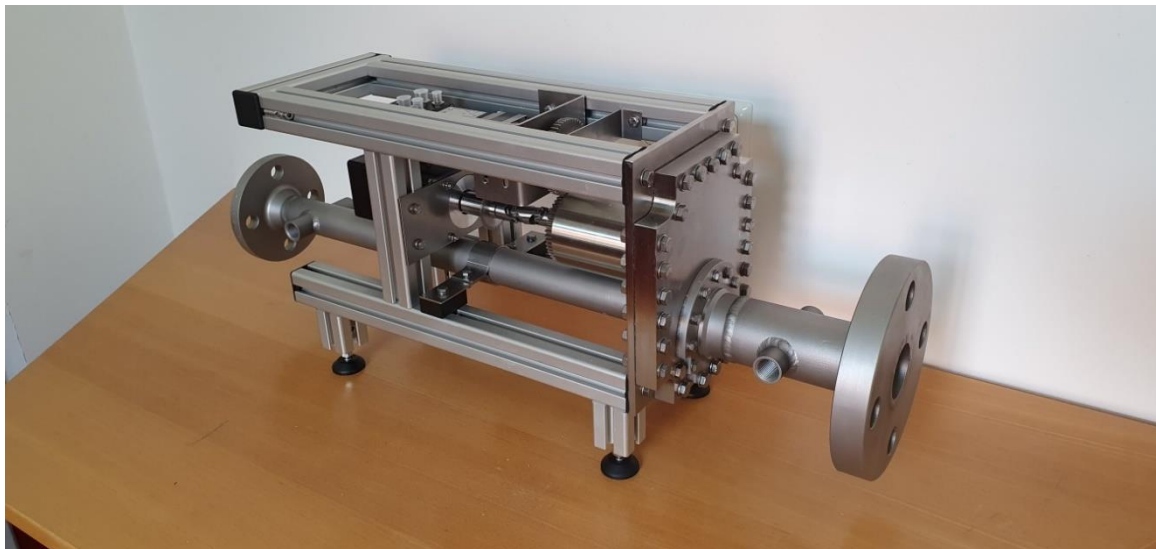
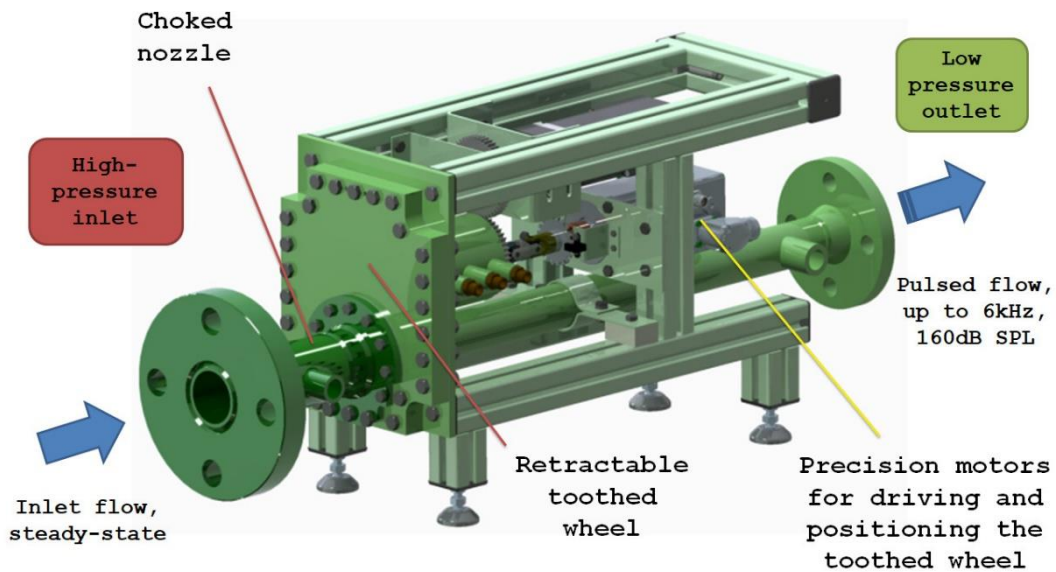


Abbildung 2: Sirene E mit Überblick über die Bestandteile

Die Sirene (genannt Sirene E) erzeugt eine Pulsation indem ein Zahnrad mit hoher Kadenz einen kritischen Luftstrahl abschert. Der Motor kann dabei so geregelt werden, dass eine Variation der Frequenz oder der Amplitude stattfindet. Abbildung 3 zeigt das „Kölner Dom“ genannte Sirenenprofil zur Detektion von Flammen-Eigenfrequenzen. Dabei wird zunächst die Amplitude konstant gehalten während die Frequenz variiert, danach anders herum. Um den Einfluss des Schalls auf die Flamme zu charakterisieren

wurden Versuchsdurchläufe mit und ohne Flamme durchgeführt. Dadurch können die Moden detektiert werden, die von der Flamme verstärkt oder absorbiert werden und es zeichnet sich eine akustische Wechselwirkung ab. Diese Moden werden anschließend analysiert, um festzustellen, ob der Einfluss positiv oder schädlich ist.

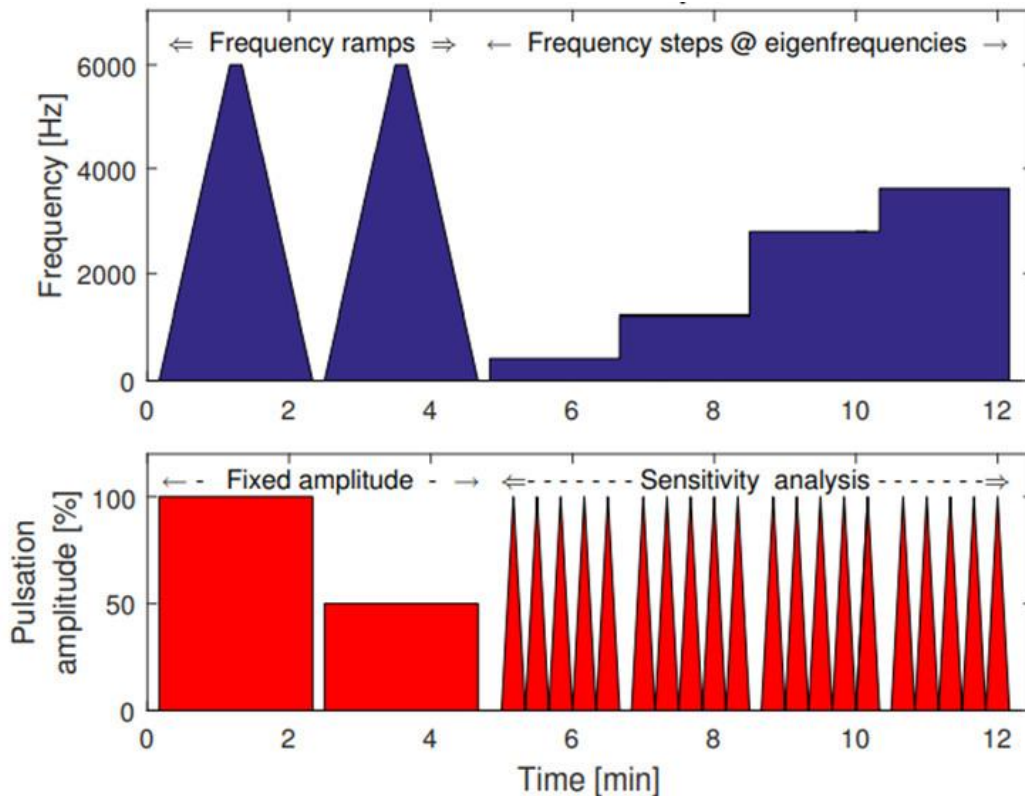


Abbildung 3: Verfahrenprofil "Kölner Dom" zur Detektion von Eigenfrequenzen der Flamme

Die Steuerung erfolgt über ein Labview-Interface von einem Laptop. Es ermöglicht die Übermittlung des gewählten Verfahrensprofils an die Sirene bei gleichzeitiger Echtzeitinformation über den Sirenenstatus und eine Anpassung der Datenerfassung des Sensors in Abhängigkeit von Beginn und Dauer der einzelnen Testsequenzen. Zusätzlich erfolgt eine Echtzeitanalyse mit Datenausgabe über die maximale Frequenzspitze, wobei das Ergebnis in das weitere Testprofil einfließt.

3.2 Laborversuche Kilowattbereich

Tests wurden im Bereich kW und MW durchgeführt, mit kW-Tests am Testgelände der FH Joanneum und MW-Tests bei P&P Industries. Um aussagekräftige Informationen aus den Versuchen gewinnen zu können wurde zunächst eine automatische Methode zur Detektion von Eigenmoden der Flamme programmiert und an Wasserstoff- und Propanflammen getestet. Für die dafür notwendige thermoakustische Pulsation wurde eine optimierte Sirene E geplant, dimensioniert und hergestellt. Zusätzlich wurde ein Digital Twin entwickelt, um die Ergebnisse der Tests digital nachvollziehen zu können und um eine automatische Datenprotokollierung zu erhalten. Dazu wurden Massenstromregler von Alicat besorgt und an einem PC mittels Labview ausgelesen. Die kW-Testanlage mit einer schematischen Darstellung

des Brenners ist in Abbildung 4 zu sehen. Der Brenner ist der von CBOne entwickelte Brenner CBO4, mit der Modifikation, dass der Vormischer mit einem 3D-gedruckten Modell vom Typ „Blume“ ersetzt wurde (in der schematischen Darstellung als zentrales grünes Element zu sehen). In Abbildung 4 befindet sich ganz links im Bild eine Meggitt VM600-Karte mit 16 Erfassungskanälen bei 100 kHz (echte Parallelfrequenz) und 10 Sekunden vollem Speicher. Diese Karte ermöglicht die Aufzeichnung von Schalldruck, Vibration und Helligkeit mit sehr hoher Taktrate. In der Mitte befinden sich die Alicat-Massenstromregler, rechts oben die Zündanlage und rechts unten der Brenner. Dabei wird die einströmende Luft zunächst durch einen Swirler (Drallgeber) gedreht und dann mit Wasserstoff vorgemischt.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

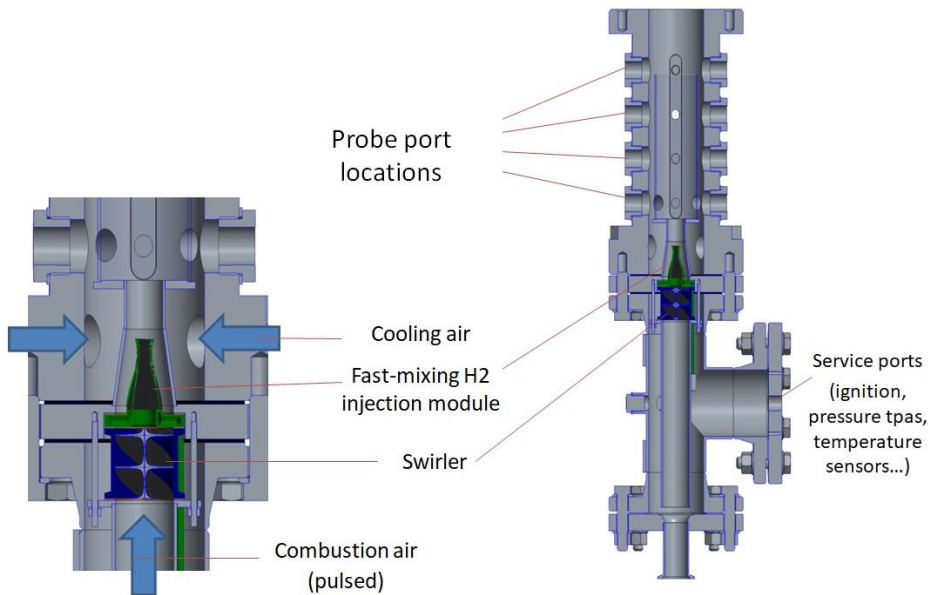


Abbildung 4: kW-Testanlage im Turbolabor der FH Joanneum (oben) und schematische Übersicht über den Brenner (unten rechts) mit Zoom auf den Bereich mit Drallgeber und Vormischer (unten links).

Um das thermo-akustische Verhalten einer mageren Wasserstoffflamme zu analysieren wurden Verbrennungsexperimente mit und ohne Pulsation durch die Sirene durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Flamme in Form und Position insbesondere dann beeinflusst wird, wenn die Pulsation der Sonde eine Eigenfrequenz der Flamme trifft. Um Daten über die Flamme zu erhalten wurde die neueste Version der Emotion-Sonde (FFG-Projektnummer: 861004) eingesetzt. Diese Sonde besitzt vier optische Sensoren, einer neutral ohne Farbfilter, drei Sensoren mit je einem Filter in rot, grün oder blau. Sie ist ursprünglich für konventionelle Treibstoffe konzipiert, Tests mit Wasserstoff zeigten jedoch eine gute Eignung für diesen Brennstoff. Als Grund gilt die hohe Infrarotstrahlung von Wasserstoffflammen, welche vor allem

vom Sensor ohne Farbfilter und dem Sensor im roten Bereich (Infrarot-Bereich) detektiert wurden. Dabei ist eine exakte Ausrichtung der Sonde auf die Flamme essentiell.

3.3 Versuche im MW-Bereich

Der MW-Demonstrator, genannt „Burner King“, ist zweistufig und wird additiv gefertigt aus Inconel 718. Darstellungen sind zu sehen in Abbildung 5. 20 % der Luftströmung wird von der Pilotstufe übernommen, der Rest von der Hauptstufe. Der Brenner ist auf eine maximale thermische Leistung von 2 MW ausgelegt, mit einem Designpunkt bei 1 MW. Zusätzlich wurde eine Miniaturvariante, genannt „Mini King“, im Maßstab 1:10 aus demselben Material gefertigt und mit Butan getestet, um schnell und sicher einen ersten Eindruck der Brennergeometrie zu bekommen. Die Planung für die MW-Tests mussten mehrfach revidiert werden, weil essentielles Equipment für Wasserstoff teilweise schlecht verfügbar war.

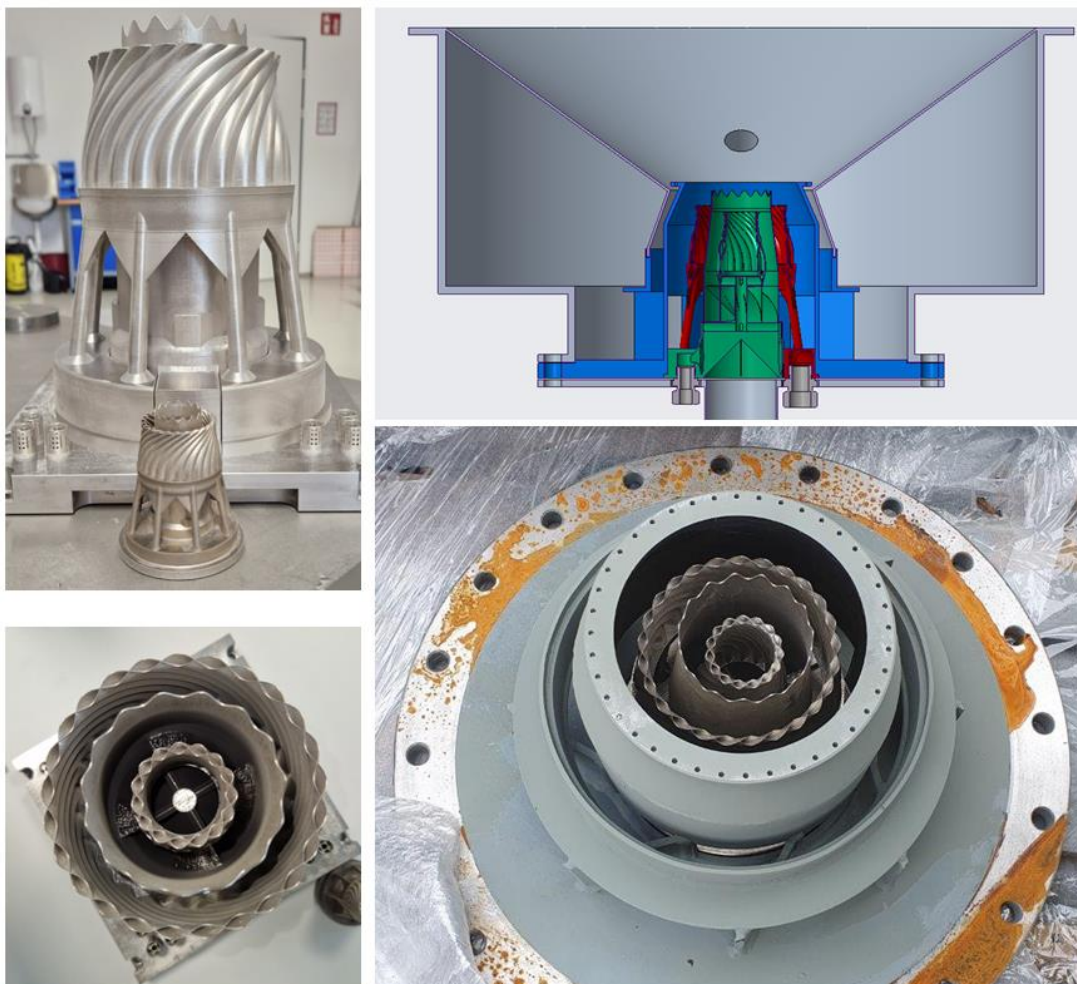


Abbildung 5: Zweistufiger MW-Brenner „Burner King“, additiv gefertigt aus Inconel 718 Pulver.

Die Tests mit der Miniaturvariante fanden im Freien am Betriebsgelände von P&P Industries statt, welches für Verbrennung von gefährlichen Gasen zertifiziert ist. Getestet wurden Durchflussmessung und Flammenbildung bei verschiedenen Betriebsbereichen und verschiedenen Gasen wie Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff. Ein großer Ventilator sorgte für eine minimale Belüftung, damit alle gefährlichen Gase sofort verdünnt werden. Stickstoff wird verwendet um die Leitungen zu spülen und

gleichzeitig die Wasserstoffversorgung zu stoppen. Diese Methode verhindert ein Zurückbrennen (Flashback) der Wasserstoffflamme. Abbildung 6 zeigt ein Prozessflussdiagramm des Aufbaus.

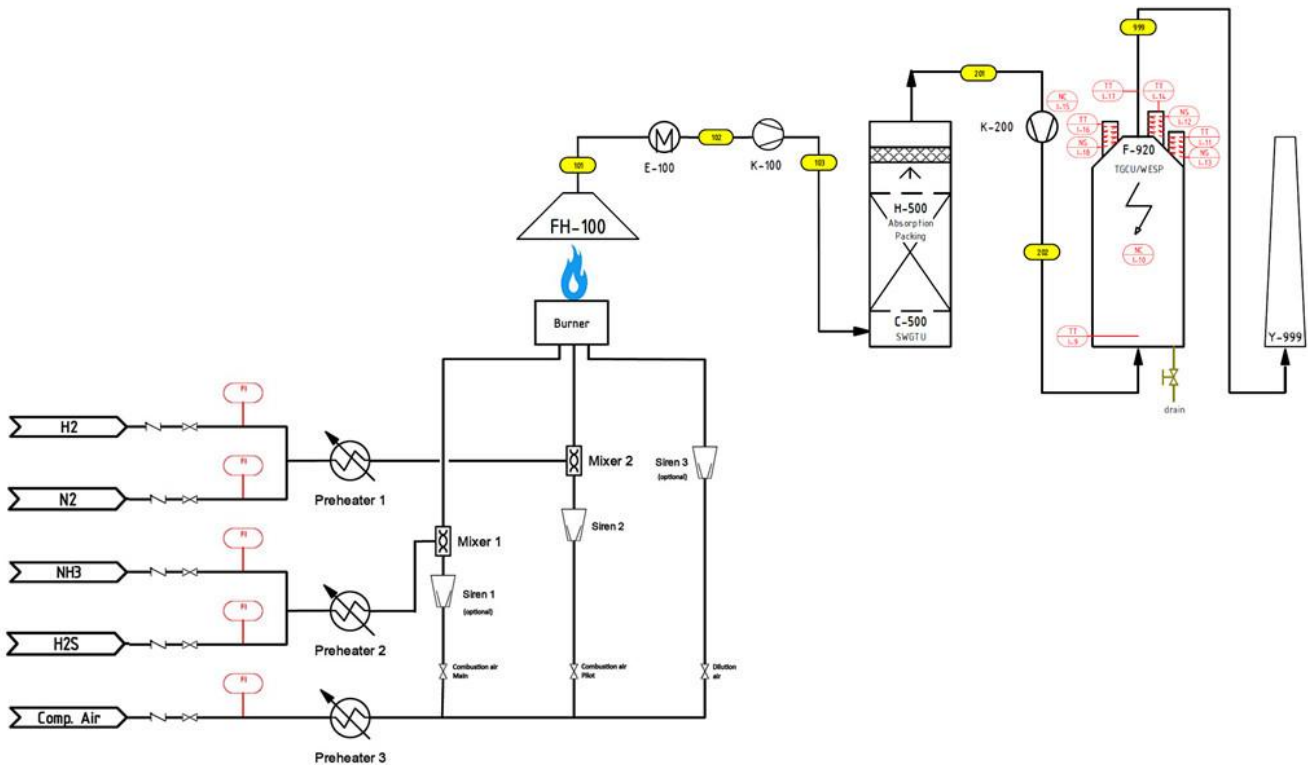


Abbildung 6: Prozessflussdiagramm

Die Sirene ist an den Luftkanal für die Pilotstufe angeschlossen und erhält Druckluft von einem Kompressor. Sie stellt 10 % der notwendigen Luftmenge für die Pilotstufe bereit. Die restliche Luft wird von einem Gebläse zur Verfügung gestellt.

3.4 CFD

Im Bereich der Verbrennung werden numerische, nicht-reaktive und reaktive Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen angewendet für die Darstellung der Verbrennung als Digital Twin. Über rein aerodynamische (nicht-reaktive) Simulation der Pilotstufe ohne Wasserstoffinjektion konnte eine erste Abschätzung der Flammenposition ermöglicht werden. Verwendet wird das open source Paket OpenFOAM mit den solvern pisoFoam (turbulent, nicht reaktiv) und reactingFoam bzw. xiFoam (turbulent, reaktiv). Das Mesh – die Diskretisierung des zu untersuchenden Strömungsbereichs – wird möglichst einfach gehalten, um schneller zu Ergebnissen zu kommen. Zwei unterschiedliche Meshes werden mit verschiedenen Modellen untersucht. Zunächst wird ein achsensymmetrisches 2D-Mesh erzeugt, um mittels nicht-reaktiver Berechnungen zu überprüfen, ob Strömungsdesign und Brennstoffplatzierung akzeptabel sind. Danach wird mit reaktiven Simulationen die Flammenpositionierung überprüft. Ist diese in Ordnung werden die vorigen Schritte für eine 3D-Geometrie wiederholt.

Zusätzlich wird der Injektor für die kW-Tests separat simuliert. Ziel dabei ist die Untersuchung der Wasserstoffverteilung entlang der Vormischstrecke und das Austrittsprofil in die Brennkammer.

3.5 Digital Twin

Für die Aktivitäten betreffend dem Digital Twin der Bluetifuel-Technologie wurde ein Steuer- und Messsystem entwickelt, welches präzise und reproduzierbare Randbedingungen für die Experimente und ein gleichzeitigen Plausibilitätscheck durch Abgleich mit theoretischen Daten ermöglicht. Dieses System inkludiert vier Massenstromregler von Alicat und ein compactRIO-Datenaquisesystem. An das cRIO-Gerät können Sensoren an Module angeschlossen werden, im aktuellen Fall vier Temperatursensoren und drei Schnelldrucksonden. Die Alicat-Geräte steuern und protokollieren Massenströme. Labview agiert als zentrale Kontrollstation und übernimmt sämtliche Kommunikation und Steuerung mit den genannten Geräten. Zusätzlich funktioniert es als Echtzeit-Datenanzeige, bei der die Mengen an Luft bzw. Treibstoff nach Wunsch eingestellt werden können und protokolliert sämtliche gesammelten Werte samt Zeitstempel. Das Labview-Interface ist in Abbildung 7 zu sehen.

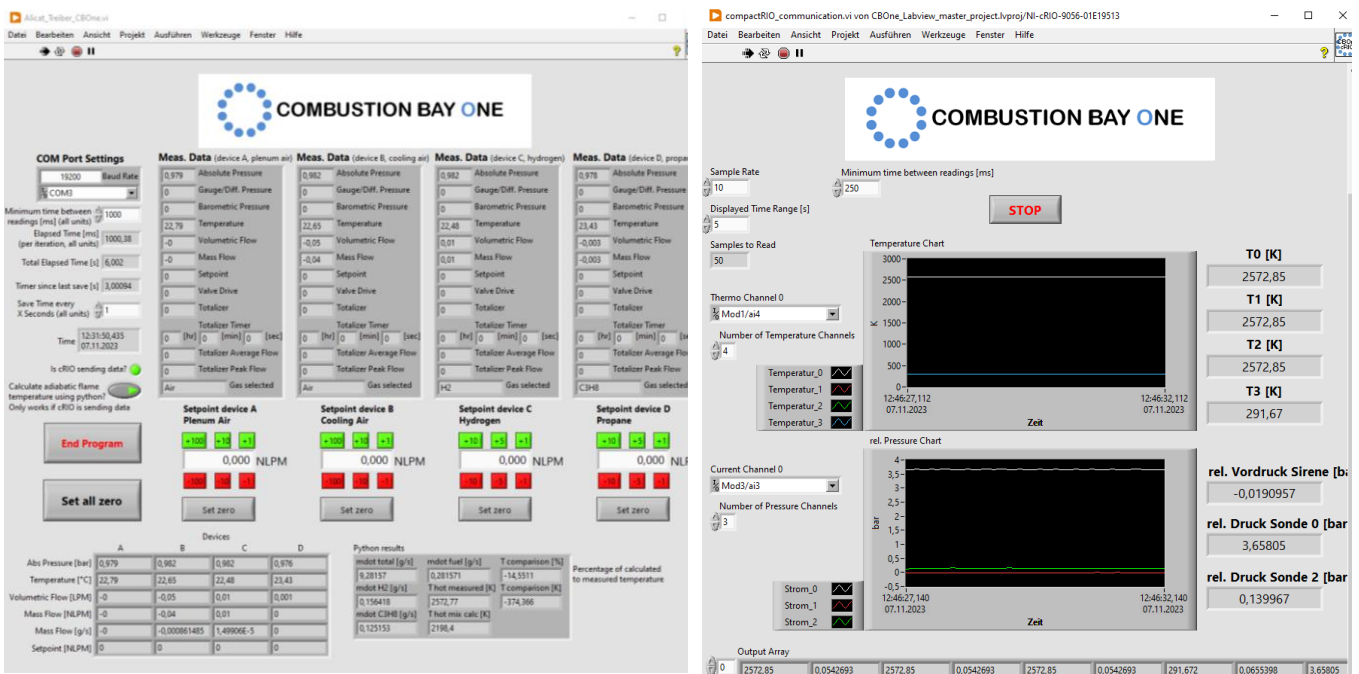


Abbildung 7: Benutzeroberfläche der Labview-Steuerzentrale. Links: Alicat-Massenstromregler, rechts: compactRIO

Ein optional aktivierbares Modul berechnet auf Basis der gemessenen Massenströme die zu erwartende Flammentemperatur und vergleicht das Ergebnis mit gemessenen Temperaturen. Das Modul ruft eine Python-Instanz auf, die wiederum auf das frei verfügbare thermodynamische Paket Cantera für die Berechnungen zurückgreift. Dieser Trick ist notwendig, damit die Ergebnisse an Labview retourniert und protokolliert werden können. Die Protokollierung startet automatisch, sobald das Programm läuft. In Cantera findet die Berechnung in zwei Schritten statt, zunächst wird in einem Reaktor-Netzwerk der Treibstoff mit der Hauptluft gemischt, was der Vormischung entspricht. In einem zweiten Schritt wird das chemische Gleichgewicht mittels Variation der Gibbs-Enthalpie ermittelt sowie die thermische Leistung und das Äquivalenzverhältnis Phi.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen zusammengefasst, dass die emissionsarme, sichere Verbrennung von nicht-kohlenstoffhaltigen Treibstoffen beherrschbar und effizient ist. Der Iterationsprozess zwischen Tests im kW-Bereich und CFD-Analysen liefert hochwertige Ergebnisse, insbesondere bei der Verbrennung von Wasserstoff. Ein Technologiedemonstrator für den kW-Bereich wurde entwickelt, hergestellt und validiert, der Digital Twin erhält eine fortwährende Modellkomplexität und der Technologiedemonstrator für den MW-Bereich wurde entwickelt und hergestellt. Das Interesse an Emissionsreduktion durch erzwungene Pulsation in der Verbrennung durch Industriebetriebe ist durch einen LOI belegt.

4.1 Ergebnisse pulsierte Verbrennung

Der Effekt einer Sirenen-induzierten Pulsation auf eine magere, vorgemischte Wasserstoff-Flamme wurde untersucht. Der Bluetifuel-Injektor generiert die in Abbildung 8 zu sehende drallstabilisierte Flamme bei teils vorgemischtem Wasserstoff im kW-Bereich. Links ist der Fall ohne Sirene zu sehen, rechts ist sie aktiviert bei einer Frequenz von 360 Hz. Die Vorauswahl passender Resonanzfrequenzen geschieht automatisiert über einen Regelkreis, die schlussendliche Wahl wird manuell getroffen. Abgesehen vom Aktivierungsstatus der Sirene sind die Fälle ident.

4.1.1 Wasserstoffflamme ohne Pulsation

Ohne Sirene treten über den Querschnitt gesehen die höchsten Wasserstoffkonzentrationen und Temperaturen im Zentrum auf, was zu einem großen Temperaturgradienten vom Zentrum zur Flammrohrwand führt. Die Flamme positioniert sich nahe am Brennereinlass, was tendenziell leichter zu Flashback führen kann. Die hohen Temperaturen im Zentrum sorgen für höhere NO-Emissionen, da thermische Stickoxide aus Luft-Stickstoff vor allem ab 1550 °C entstehen und darüber ein exponentielles Wachstum aufweisen.

4.1.2 Wasserstoffflamme mit Sirenen-induzierter Pulsation

Bei einer thermo-akustischen Anregung mittels Sirene bei einer Frequenz von 360 Hz stabilisiert sich die Flammenfront bei einem größeren Abstand zum Brennereintritt und erscheint diffuser mit geringerer Strahlungsintensität. Das Temperaturprofil zeigt, dass der Gradient vom Zentrum zur Flammrohrwand wesentlich kleiner ist, was einer homogeneren Verteilung entspricht. Dies deutet darauf hin, dass durch die Pulsation bei passender Resonanzfrequenz die Vormischung verbessert wird.

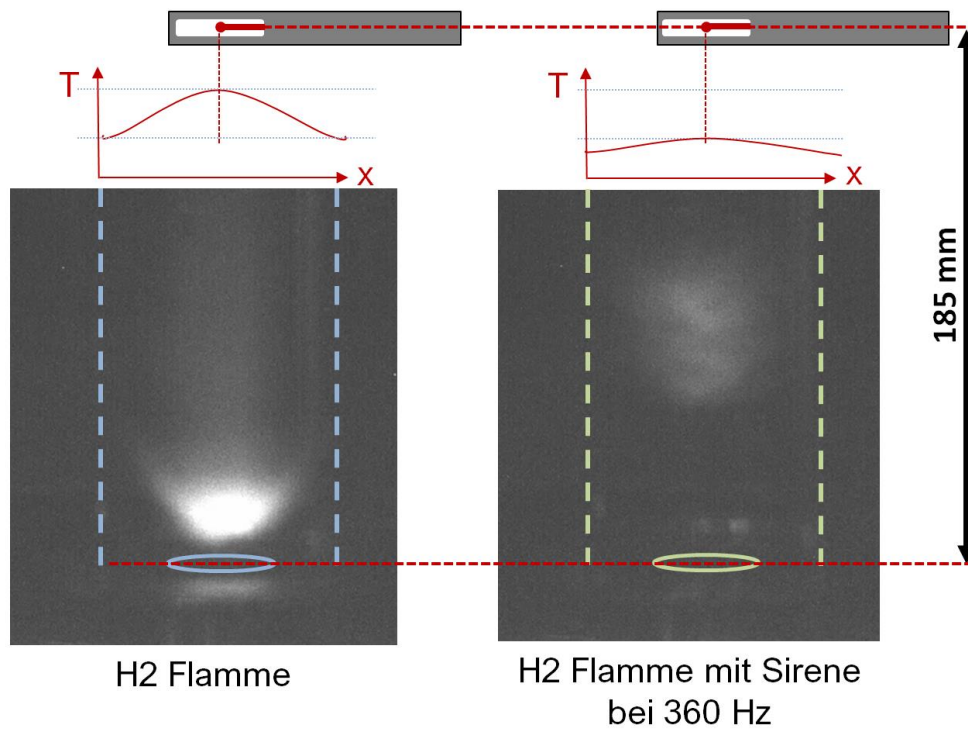


Abbildung 8: Wasserstoffflamme mit Temperaturverlauf am Austritt des Flammrohrs mit und ohne thermoakustische Anregung der Flamme mittels Sirene.

4.1.3 Spektralanalyse

Um die akustischen Einflüsse der Sirene auf die Flamme darzustellen wurden Spektralanalysen vom selben Sirenenprofil mit und ohne Flamme durchgeführt, zu sehen in Abbildung 9. Die dargestellten Signale wurden von zwei Mikrofonen aufgenommen.

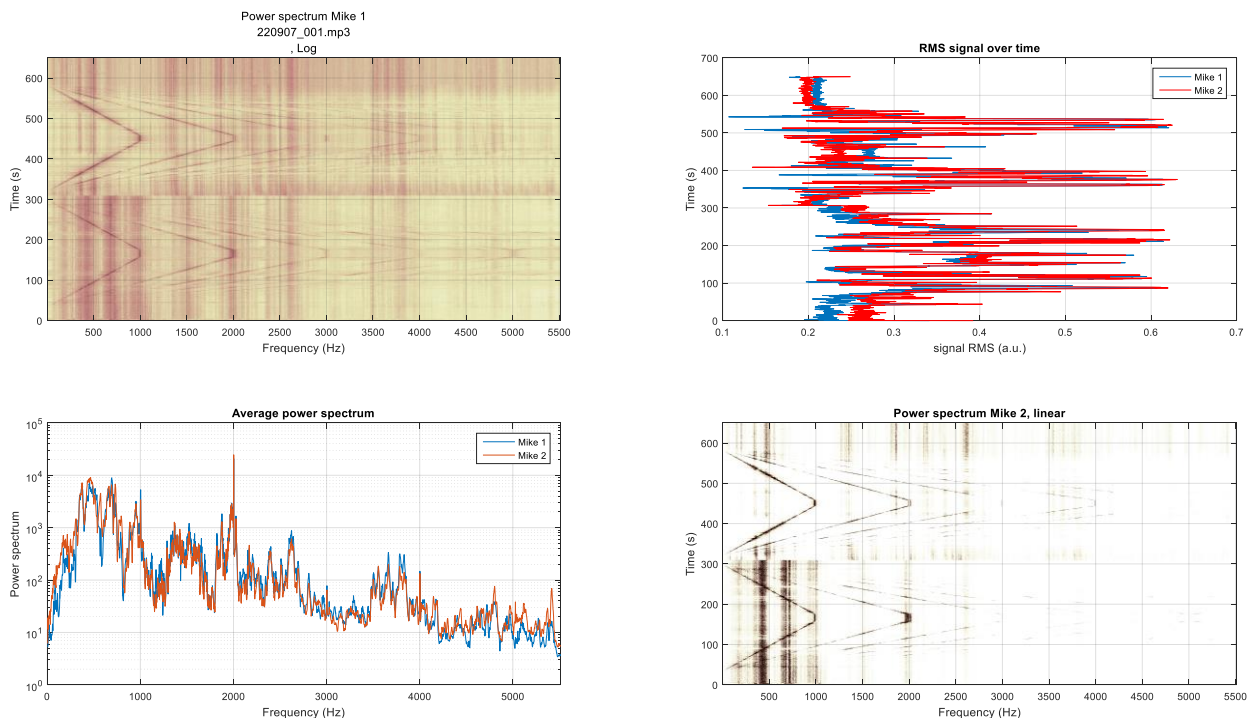


Abbildung 9: Spektralanalyse des vom Brenner erzeugten Schalls. Während der ersten Versuchshälfte (untere Bildhälfte) ist eine Flamme vorhanden, während der zweiten Hälfte erloschen.

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem Fall mit und ohne Flamme. Zusätzlich sind die Frequenzrampen der Sirene in den Leistungsspektra gut zu erkennen. Ein weiterer Aspekt, der untersucht wurde, war die Wirkung der thermo-akustischen Anregung auf eine H₂-Flamme unter Flashback-Bedingungen (Betriebspunkt, wo kleinste Schwankungen im Massenstrom an Luft oder H₂ zu einem Flashback führen). Nach derzeitigem Wissensstand kann das Eintreten des Flashbacks zwar nicht verhindert werden, jedoch kann die thermo-akustische Anregung bei passender Frequenz den Eintritt soweit verzögern, dass etwaige Gegenmaßnahmen getätigt werden können.

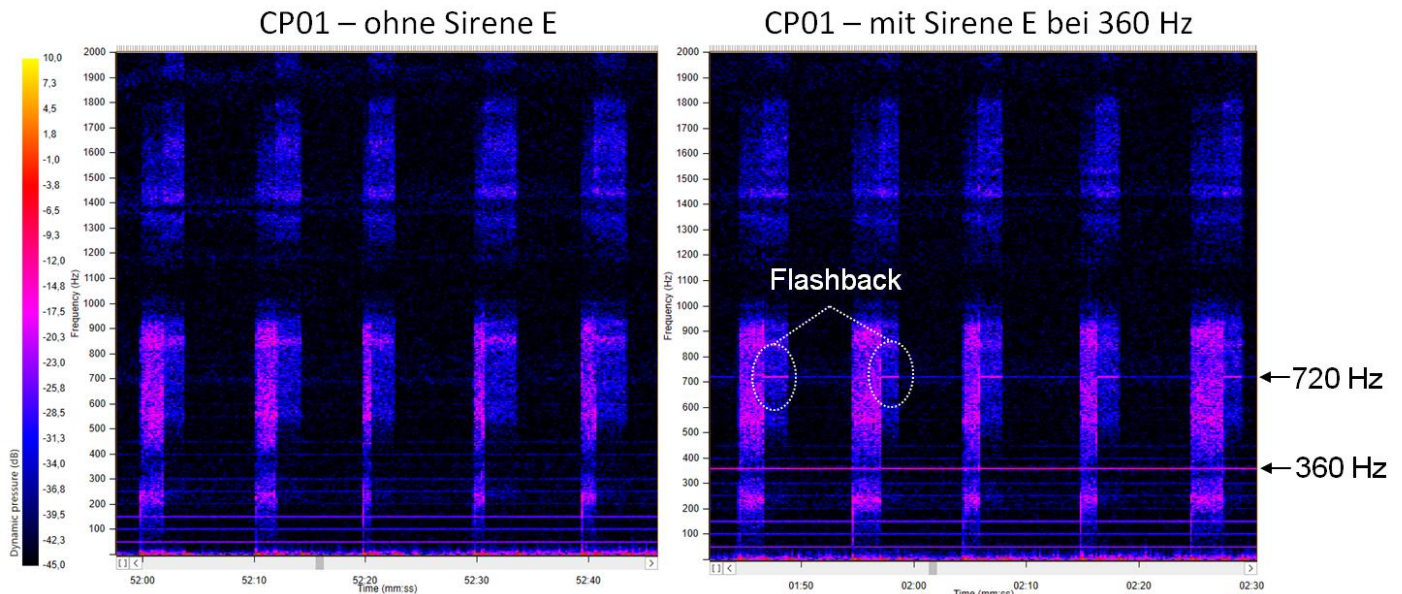


Abbildung 10: Effekt der thermoakustischen Anregung mittels Sirene-E auf eine Wasserstoffflamme dargestellt im Frequenzbereich nahe der Flashback-Grenze.

In Abbildung 10 ist das Verhalten der H₂-Flamme unter Flashback-Bedingungen im Frequenzbereich mit und ohne Pulsation der Sirene-E dargestellt. Spezifisch für den in Bluetiful verwendet Testaufbau zeigte sich, dass bei Eintritt des Flashbacks ein Teil der akustischen Energie der Flamme in einen höheren Frequenzbereich verschoben wird. Betrachtet man den Fall mit aktiver Sirene ist ersichtlich, dass ein Teil der akustischen Energie der Sirene und Flamme von der Fundamentalen (360 Hz) in die erste Harmonische (720 Hz) verlagert wird. Dieses Verhalten kann genutzt werden, um einen Indikator für Flashback-Events zu generieren, indem in Echtzeit eine Überwachung des Frequenzbandes um die erste Harmonische der Anregungsfrequenz der Sirene durchgeführt wird. Dies könnte zu einer frühzeitigen Erkennung von Flashbacks führen und dadurch die Lebensdauer von H₂-Brennern deutlich erhöhen.

4.1.4 Temperatur- und Abgasmessungen

Die bei Pulsation beobachtete homogenere Temperaturverteilung im Flammrohr führt zu einer deutlichen Reduktion an NO-Emissionen (Stickoxid-Emissionen) im Abgas, zu sehen in Abbildung 11. Die Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der Abgastemperatur und der NO-Emissionen bei alternierender Aktivierung der Sirene E. Eine Wasserstoffflamme erzeugt kein CO₂, aber durch die hohen Flammentemperaturen Stickoxide aus in der Luft vorhandenen Stickstoff. Diese Emissionen werden durch die Sirene E um 87 % reduziert, weil der zentrale Temperatur-Hotspot aufgebrochen und auf den gesamten Querschnitt verteilt wird. Die niedrigeren Temperaturen sorgen dann für weniger Emissionen.

Durch zusätzliche Messungen von Wasserstoff im Abgas konnte ausgeschlossen werden, dass die Temperaturreduktion durch eine unvollständige Reaktion hervorgerufen wurde.

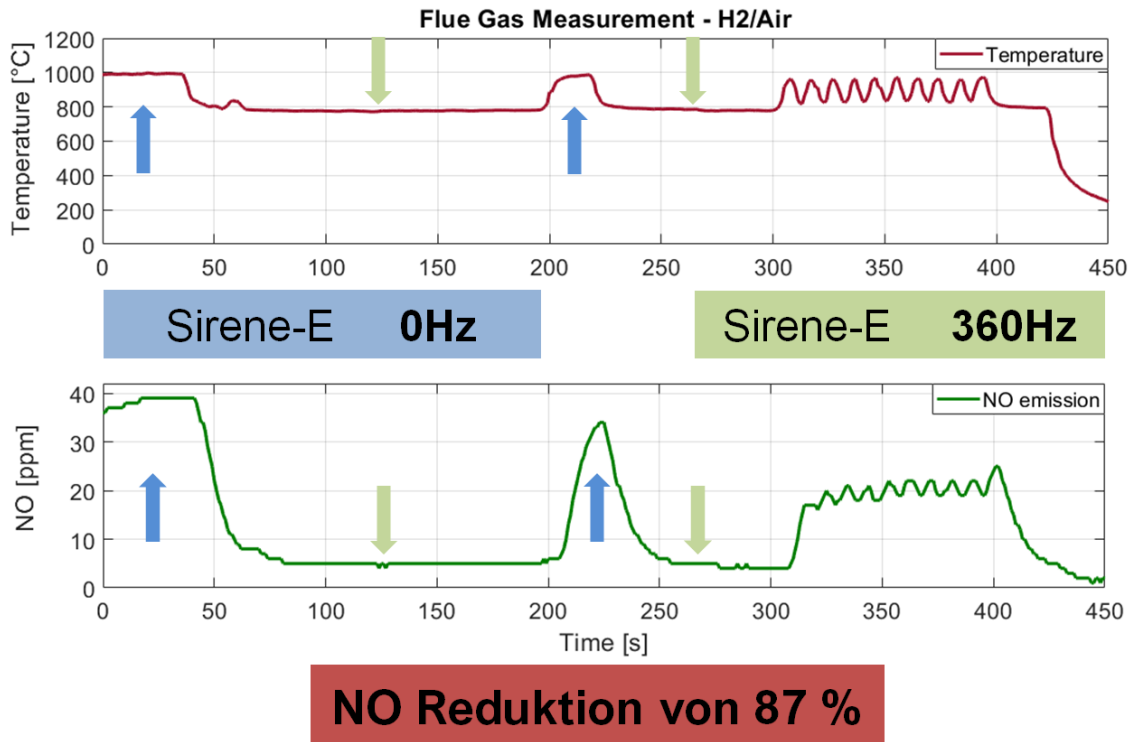


Abbildung 11: Abgastemperatur- und Emissionsmessung einer Wasserstoffflamme mit und ohne thermoakustische Anregung mittels Sirene E.

Der gleiche Trend wurde auch bei einer Ammoniak-Wasserstoff-Flamme beobachtet. Abbildung 12 zeigt den Temperatur- und NO- Emissionsverlauf. Bei der Verbrennung von Ammoniak wird der Hauptanteil der NO-Emissionen über den Brennstoff und die Reaktion selbst generiert, was die enormen Mengen an Stickoxiden erklärt. Mit thermo-akustischer Anregung der Sirene-E wurde eine Reduktion von 54% an NO-Emissionen beobachtet. Jedoch liegen die Werte der Stickoxide auch bei Reduktion um die Hälfte in einem nicht-tolerierbaren Bereich, wodurch eine Nutzung von Ammoniak als Brennstoff fraglich bleibt. Zusätzliche Messungen des Ammoniak-Gehalts im Abgas zeigten auch, dass im Referenzfall sowie im angeregten Fall konstant Rest-Ammoniak im Abgas verbleibt, was auf eine nicht-vollständige Reaktion schließen lässt. Dies stellt ein gesundheitliches wie auch operatives Risiko für die Verwendung von Ammoniak als Brennstoff dar.

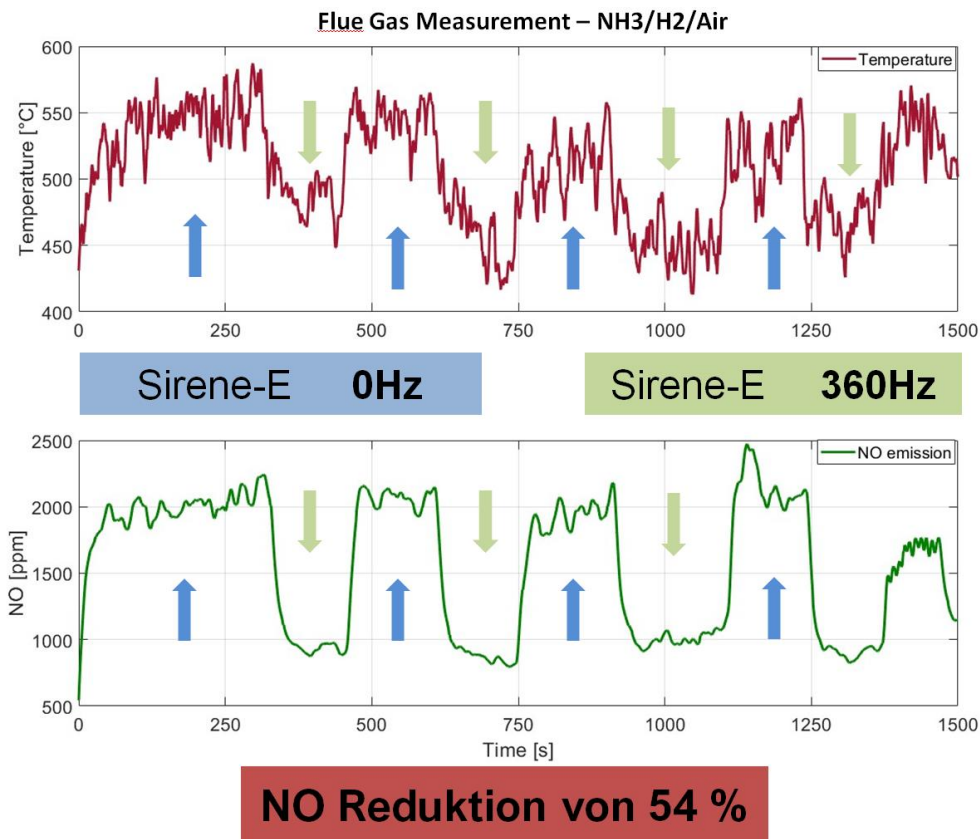


Abbildung 12: Abgastemperatur- und Emissionsmessung einer Wasserstoff-Ammoniak-Flamme mit und ohne thermoakustische Anregung mittels Sirene E.

4.2 Ergebnisse Laborversuche Kilowattbereich

4.2.1 Wasserstoffflamme

Tests wurden in Eggenberg an der FH Joanneum und in Wildon bei P&P Industries durchgeführt. Es wurde zunächst überprüft, ob der von CBOne entwickelte CBO4-Brenner für Wasserstoff- bzw. dual fuel-Verbrennung geeignet ist. Dafür wurde die Pilotstufe mit Wasserstoff getestet. Tatsächlich stabilisierte sich die Flamme, indem sie sich an den Strömungsteiler anhängt, ohne ihn zu beschädigen, zu sehen in Abbildung 13. Um erste Ergebnisse der CFD-Strömungssimulationen anzuwenden wurde ein Vormischer vom Typ „Blume“ eingebaut. Es dauerte eine Weile, bis die Unterschiede im Flammenverhalten zwischen den Standorten erklärt werden konnten. Ein wichtiges Detail hatte dabei die größte Rolle: Der Drallgeber (Wirbelgenerator) war unterschiedlich. Einer erzeugte einen achsensymmetrischen Wirbel, der andere einen leicht asymmetrischen Wirbel. Eben diese Asymmetrie sorgte für eine leichte Störung der Flamme. Die Beobachtung der Flammen erfolgte mit einer emotion-Sonde, die in einem früheren FFG-Projekt entwickelt wurde. Die Sonde wurde ursprünglich für kohlenstoffhaltige Treibstoffe entwickelt, es zeigte sich aber, dass sie ebenso gut in der Beobachtung von Öko-Kraftstoffflammen ist – ganz ohne Anpassungen. Diese Vielseitigkeit ist ein hervorragendes Zeichen und notwendig, um mit derselben Sonde das Flammenverhalten von unterschiedlichen Treibstoffen zu analysieren.

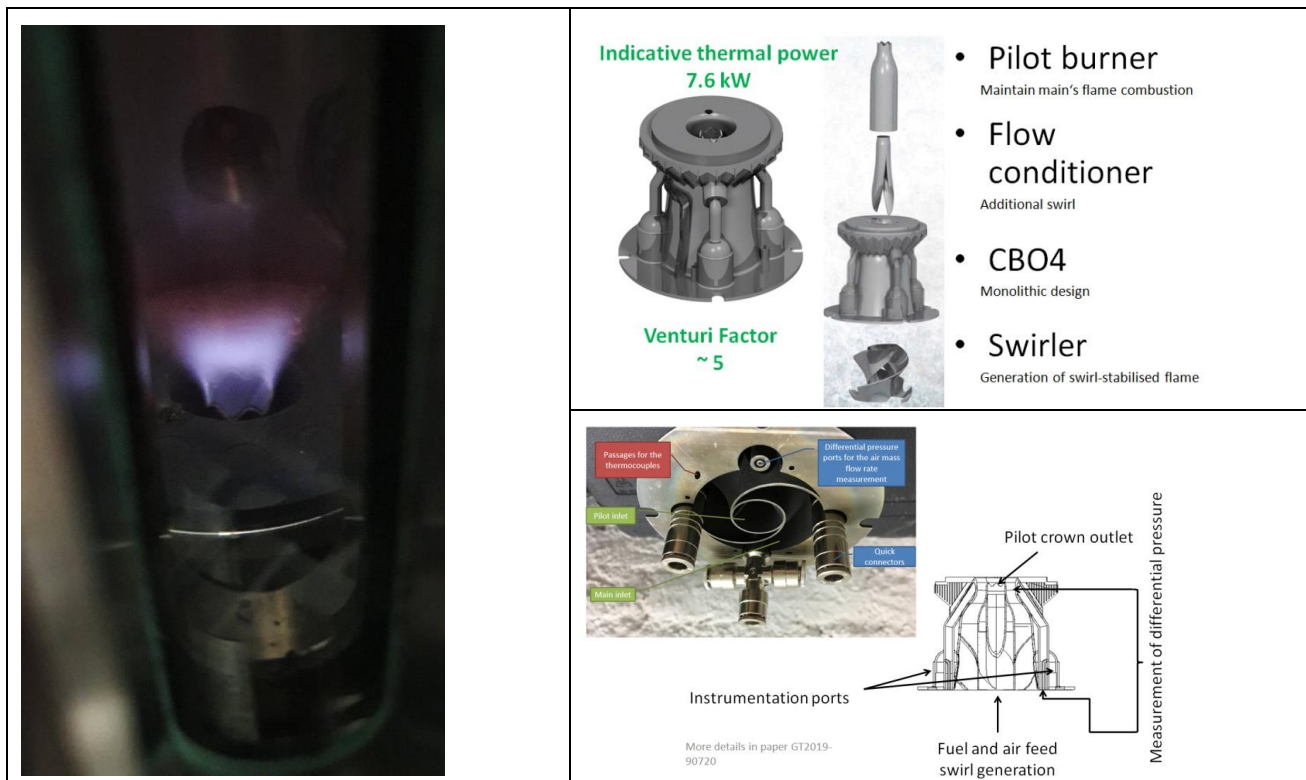


Abbildung 13: Konfiguration für dual-fuel Tests mit dem CBO4-Brenner. Links: stabile H2-Luft Pilotflamme. Rechts: Brennergeometrie.

4.2.2 Wasserstoff und gemischte Ecofuels

In Wildon wurden Hochleistungstests mit Wasserstoff (H₂), Schwefelwasserstoff (H₂S) und Ammoniak (NH₃) durchgeführt. Insbesondere H₂S ist extrem giftig, darum wurden strengste Sicherheitsmaßnahmen ergriffen. Getestet wurde zunächst eine Wasserstoffflamme mit abwechselnd aktivierter und deaktivierter Sirene. Messungen der Abgastemperatur und Konzentrationen von O₂ und NO sind in Abbildung 14 zu sehen. Es zeigt sich der positive Einfluss der Sirene auf die magere Verbrennung durch niedrigere Abgastemperaturen, niedrigerer NO-Werte und höherer O₂-Konzentration. Dieser Test war eine Verifikation, dass die Ergebnisse unabhängig vom Messort sind bzw. dass die Messgeräte nicht durch die Umgebung beeinflusst werden.

Die Versuche mit H₂S und NH₃ wurden in ein- und zweistufigen Konfigurationen durchgeführt, mit einer vorangestellten vorgemischten H₂-Pilotflamme bei zweistufiger Konfiguration. Das Ergebnis ist, dass H₂S die zweistufige Konfiguration benötigt und alleine nicht brennt. Mit einer H₂-Pilotflamme ergibt sich eine intensiv blaue Flamme, zu sehen in Abbildung 15 links. Im Gegensatz dazu ist NH₃ für eine zweistufige Verbrennung ungeeignet. Die Flamme erzeugt inakzeptable Mengen an unverbrannten Bestandteilen in dieser Konfiguration, siehe Abbildung 15 Mitte. Die gelbe Flamme ist ein Zeichen für eine Diffusionsflamme und keine vorgemischte Flamme. In einer einstufigen Konfiguration kann die Flamme ebenfalls nicht existieren. Interessanterweise brennt NH₃ in einstufiger Konfiguration sehr gut, wenn es vor der Injektion mit H₂ gemischt wird, dargestellt in Abbildung 15 rechts. Das thermoakustische Verhalten der Flamme scheint dabei nicht oder kaum vom Mischungsverhältnis abzuhängen.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(H₂/lpm: 10, Air/lpm: 150, T/°C: 20.4, f/Hz: 365)

Brennstoff: Wasserstoff

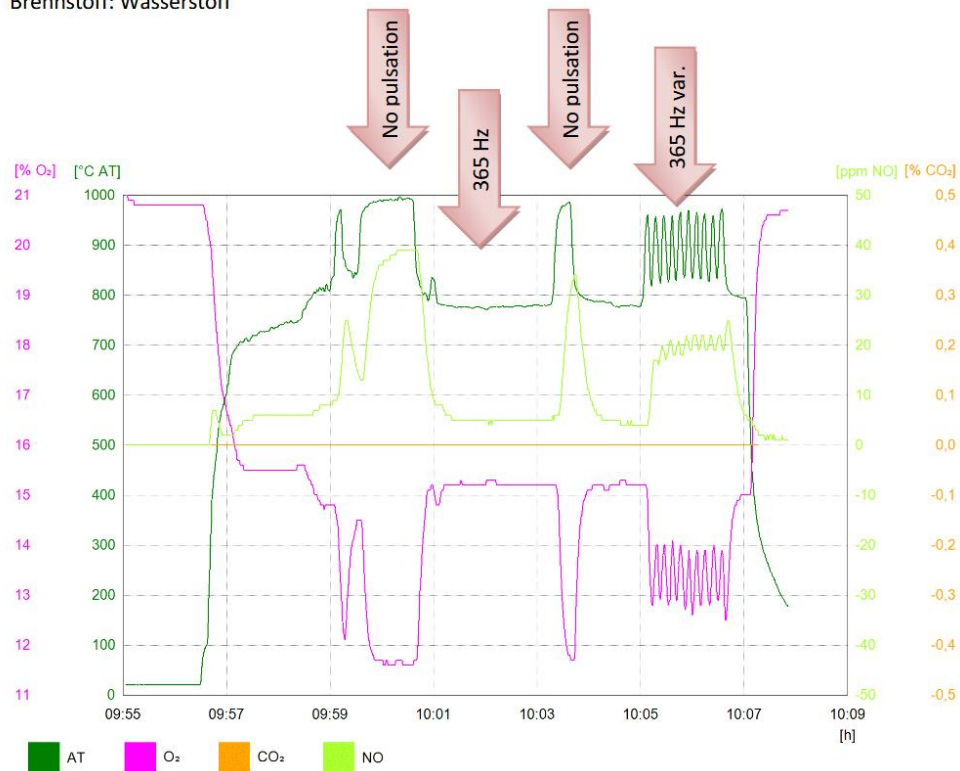


Abbildung 14: Positiver Einfluss der Sirene auf eine H₂-Flamme. Bei einer Pulsation von 365 Hz ist die Vormischung besser, darum steigt die O₂-Konzentration, während Abgastemperatur und NO-Konzentration sinken.

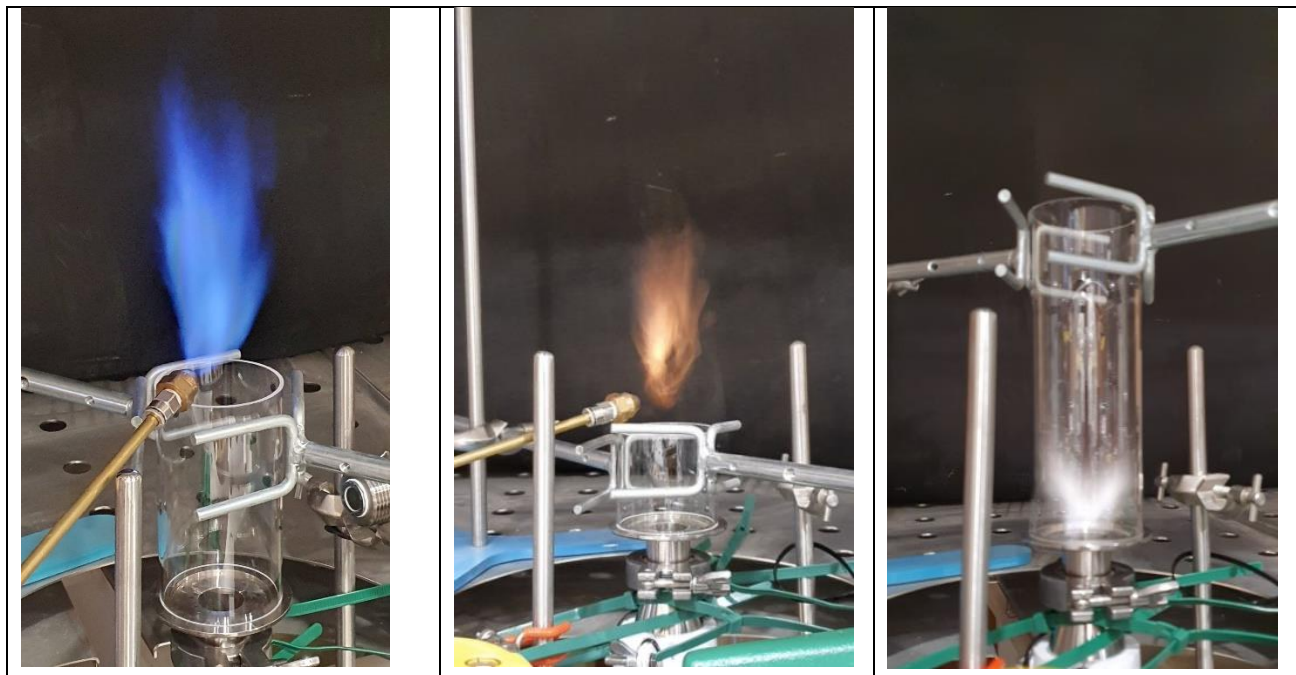


Abbildung 15: Vergleich zwischen einer gestuften Verbrennung (links – H₂S, Mitte – NH₃), bei der eine unsichtbare H₂-Flamme im Pilot für die Zündung sorgt, und einer einzelnen Verbrennung, bei der H₂ und NH₃ vor der Einspritzung gemischt werden.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Für die einstufige Verbrennung einer NH₃-H₂-Mischung wurde der Einfluss von Pulsationen durch die Sirene auf die Verbrennung getestet. Wie bei reiner H₂-Verbrennung zeigt die Sirene positive Einflüsse auf die Verbrennung in Form von niedrigeren NO-Werten. Trotz niedrigerer Temperaturen sind die NO-Konzentrationen wesentlich höher und sind weit außerhalb des akzeptablen Bereichs. Grund ist, dass Ammoniak Stickstoff enthält, der bei Verbrennung freigesetzt wird und mit Sauerstoff rekombiniert.

- B1: NH₃/lpm: 5, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 21.8, f/Hz: 0
 - B2: NH₃/lpm: 5, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 21.8, f/Hz: 330
 - B3: NH₃/lpm: 5, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 21.8, f/Hz: 365
 - B4: NH₃/lpm: 5, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 21.9, f/Hz: 460
 - B5: NH₃/lpm: 10, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 22.4, f/Hz: 0
 - B6: NH₃/lpm: 10, H₂/lpm: 6.5, Air/lpm: 140, T/°C: 22.7, f/Hz: 330
- Brennstoff: Wasserstoff + Ammoniak (Mix1)

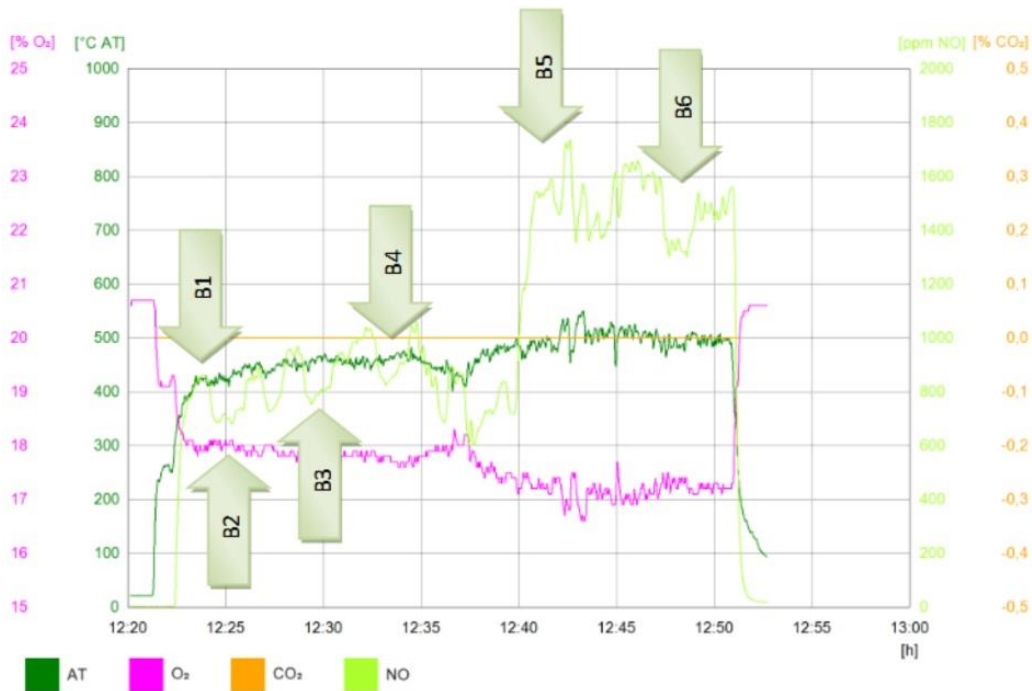


Abbildung 16: Emissionswerte mit H₂-NH₃-Gemisch. Die NO-Werte werden durch Pulsation reduziert, bleiben aber äußerst hoch.

Insgesamt zeigt sich, dass sich Wasserstoff sehr gut eignet als Brennstoff in Bezug auf die Bluetifuel-Technologie, wobei ein adäquates Sicherheitskonzept vorausgesetzt wird. Ammoniak beziehungsweise Ammoniak gedopt mit Wasserstoff konnte in der Bluetifuel-Konfiguration nicht überzeugen. Die NO-Emissionen konnten zwar erheblich reduziert werden, doch das Ammoniak und die Rest-NO-Emissionen sind nicht tolerierbar in Bezug auf Gesundheit, Sicherheit und Schadstofflevel. Für H₂ und H₂S-Flammen ist die Anwendung der Sirene definitiv sinnvoll. Die thermoakustische Anregung sorgt für ein robusteres Flammenverhalten gegenüber Flashbacks, eine bessere Vermischung von Luft und Brennstoff und dadurch für ein gleichmäßigeres Temperaturprofil ohne Hotspots und geringeren NO-Emissionen.

4.3 MW-Brenner

Um einen ersten Eindruck der Flammenfront zu bekommen und um die strömungstechnische Analyse zu validieren wurde der MW-Brenner zunächst als Miniaturvariante im Maßstab 1:10 3D gedruckt und mit Butan getestet. Die Pilotstufe konnte erfolgreich je nach Leistung und zugeführter Luftmenge von einer Diffusionsflamme bis zur technisch vorgemischten Flamme variiert werden, zu sehen in Abbildung 17. Die erste Analyse und das erste Feuer mit dieser Geometrie sind vielversprechend und zeigen eine gute Stabilität. Tests mit dem MW-Brenner mit Wasserstoff konnten noch nicht durchgeführt werden wegen mangelnder oder niedriger Verfügbarkeit von essentiellen Apparaturen und Equipment für Wasserstoff.

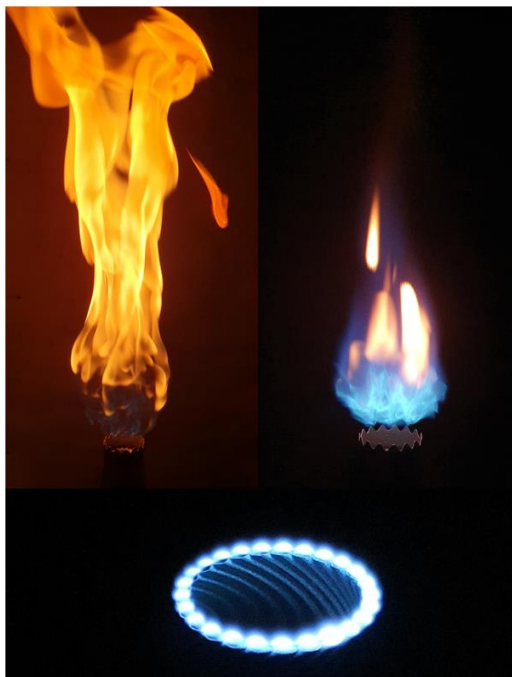


Abbildung 17: Erste Zündung des „Mini King“ (MW-Brenner „Burner King“ im Maßstab 1:10) mit Butan.

4.4 CFD-Analysen

Um aussagekräftige Ergebnisse aus den CFD-Simulationen auslesen zu können wurden zunächst nicht-reaktive Fälle berechnet. Es wurde vor allem die Pilotstufe untersucht, um die Flammenposition abschätzen zu können. Das Mesh umfasst den Drallgeber, den Injektor und den Glasliner, in dem sich die Flamme stabilisiert. Eine vereinfachte 2D-Geometrie sorgt für schnelle erste Ergebnisse während 3D-Geometrien den Drallgeber korrekt abbilden können. Weil reaktive Simulationen aufwändiger sind wurde zuerst mit nicht-reaktiven Strömungssimulationen das Strömungsverhalten untersucht. Ein Ergebnis davon ist in Abbildung 18 links zu sehen. Dabei wurden Strömungslinien über die gesamte Geometrie dargestellt. Gut erkennbar ist der Drallgeber unten und die Ausbildung einer tangentialen Strömungskomponente in der restlichen Geometrie. Der Injektor wurde simpel gehalten, weil zum Simulationszeitpunkt mehrere Modelle in der Auswahl waren. Die Darstellungen von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur in Abbildung 18 rechts bei einer reaktiven Simulation mit Wasserstoff untermauern die angenommene Flammenposition.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

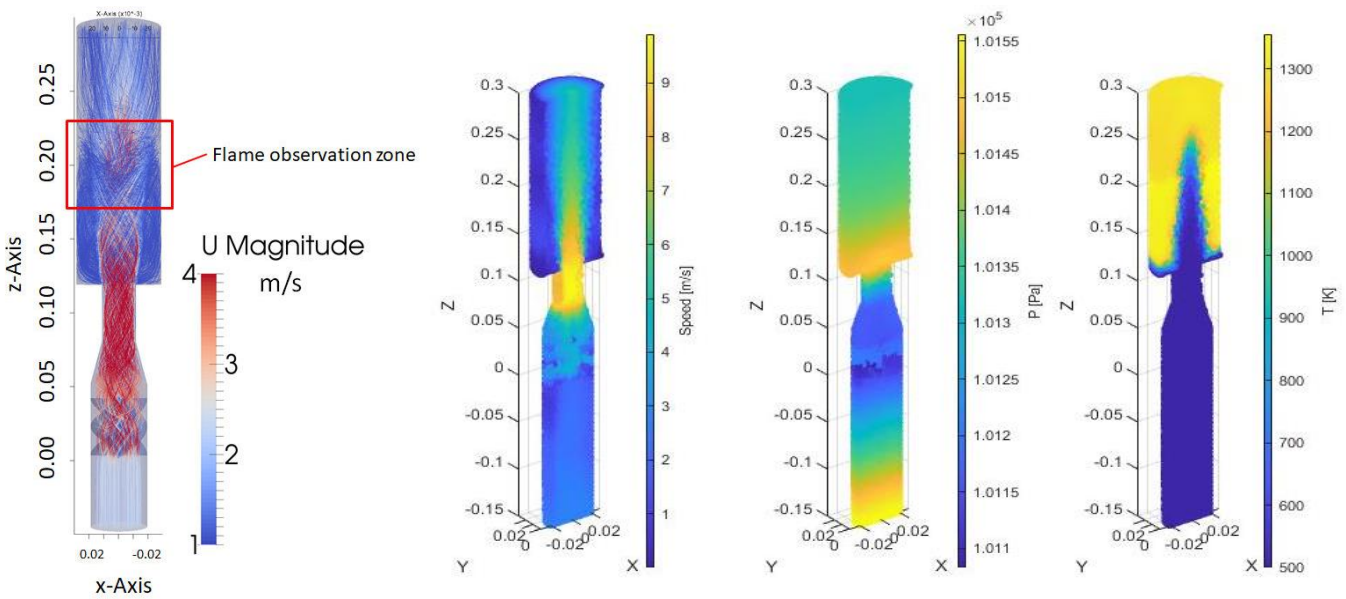


Abbildung 18: Aerodynamische Strömungssimulation der Pilotstufe für die erste Abschätzung der Flammenposition (links) und Geschwindigkeit-/Druck-/Temperaturdarstellung bei Wasserstoffverbrennung (rechts).

Um die Entscheidungsfindung bei der Auswahl der Injektionsdüse zu unterstützen wurden verschiedene Düsengeometrien simuliert und ihre Vormischungen untersucht. Abbildung 19 zeigt die numerische Untersuchung des Bluetifuel-kW-Injektors bezüglich der Wasserstoffverteilung und des Injektionsprofils entlang der Vormischstrecke. Dabei wurden die Massenströme für eine thermische Leistung von 5 kW und einem Äquivalenzverhältnis von 0.5 gewählt und mittels OpenFOAM-Code und dem Solver reactingFoam numerisch berechnet. Es wurde untersucht inwieweit die Vormischstrecke (Länge des Vormischrohrs) ausreichend ist, um eine technisch vorgemischte Flamme zu erhalten beziehungsweise inwieweit der Bluetifuel-kW-Injektor in der Lage ist eine schnelle, relativ homogene Mischung über den Austrittsquerschnitt auf kurzer Distanz zu ermöglichen.

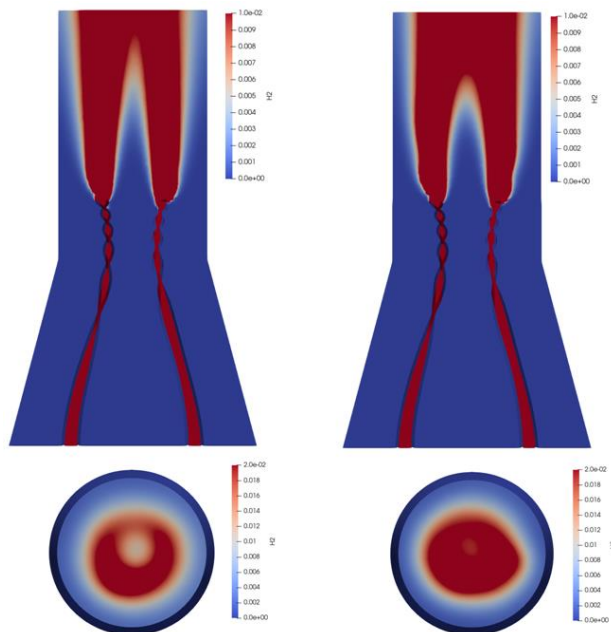


Abbildung 19: Wasserstoffinjektionsprofil des Bluetifuel-kW-Injektors. Links: Injektionsprofil ohne Drall im Luftkanal. Rechts: Injektionsprofil mit Drall im Luftkanal.

Die Gegenüberstellung der Injektionsprofile mit und ohne Drall zeigt, dass der Drall im Luftkanal den Mischprozess verbessert. Auf gleicher Vormischstrecke kann eine schnellere und homogenere Mischung erzeugt werden, wenn die Luft verdreht eingebracht wird. Obwohl durch die Drallgebung im Luftkanal die Austrittsgeschwindigkeit in Z Richtung etwas reduziert wird und dadurch die Tendenz für einen Rückbrand der Flamme (Flashback) steigt, wird durch den besseren Mischprozess gleichzeitig die Flammengeschwindigkeit durch die Vermeidung von lokal hohen Konzentrationen an Wasserstoff reduziert, wodurch wiederum insgesamt die Flammenstabilität verbessert wird. In Abbildung 20 wird das Injektionsprofil des Bluetifuel-kW-Injektors dreidimensional je nach Massenbruch an Wasserstoff dargestellt. Das mit hoher Geschwindigkeit eingedüste Multi-Punkt-Injektionsprofil mit zusätzlicher Drallgebung ist gut erkennbar.

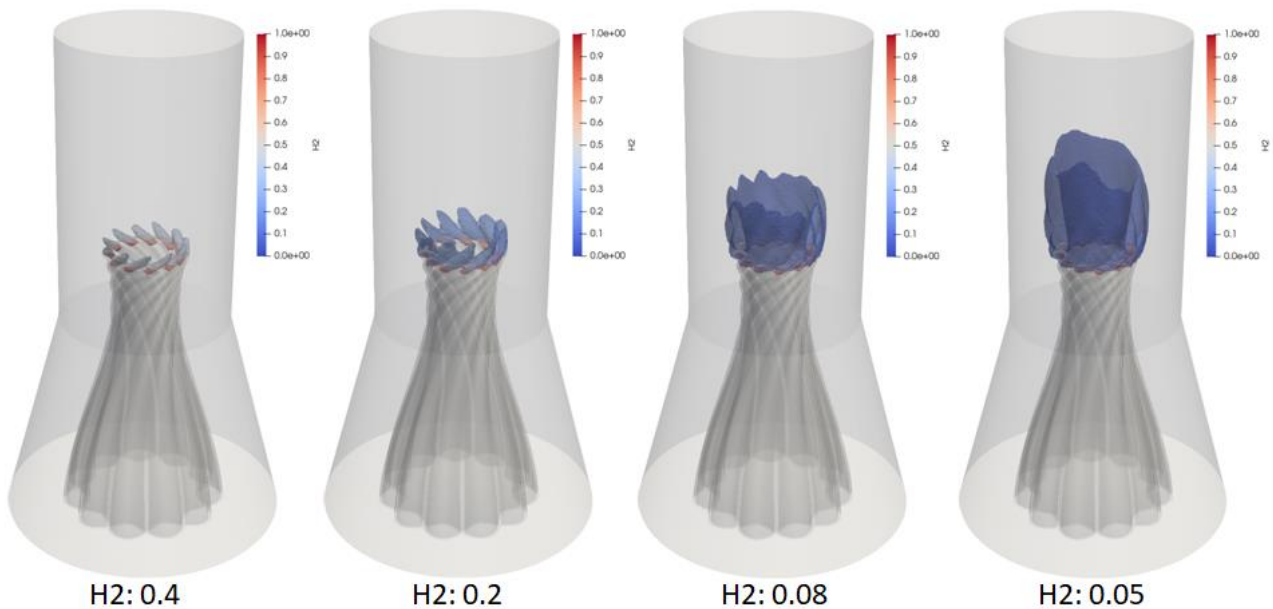


Abbildung 20: Brennstoffverteilung und Vormischung im Vormischrohr des Bluetifuel-kW-Injektors.

4.5 Ergebnisse Digital Twin

Die Arbeiten am Digital Twin konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die zentrale Steuerung der digitalen Datenaquise erfolgt über Labview, das die angeschlossenen Massenstromregler steuert und alle verbundenen Sensoren auswertet. Dabei können die an den Brenner angeschlossenen Gasstränge (Hauptluft, Pilotluft, Wasserstoff, Propan) jeweils einzeln angesteuert werden und per Knopfdruck auf gewünschte Werte gesetzt werden. Zur Sicherheit wurde ein Not-Ausschaltknopf implementiert, der alle Gaszuflüsse stoppt. Die gesammelten Daten werden zusammengefasst und in ein Protokoll geschrieben. Dabei kann ausgewählt werden mit welcher Frequenz Daten ausgelesen und geschrieben werden. Zusätzlich zur Datenaquise wurde ein optional aktivierbares Python-Modul erstellt, welches mit Hilfe von Cantera thermodynamische Berechnungen durchführt. Das Aufrufen einer Python-Instanz von Labview ist relativ zeitaufwändig im Vergleich zur Datenauslesung und Protokollierung, durch Optimierungen konnte jedoch die benötigte Zeit reduziert werden. Ausgehend von den gemessenen Mengen an Luft und Treibstoff werden dabei die adiabate Flammentemperatur, das Äquivalenzverhältnis Phi und die

momentane Leistung berechnet und ebenfalls in das Protokoll geschrieben. Jeder Datensatz besitzt einen Zeitstempel, was die Darstellung erleichtert.

5 Ausblick und Empfehlungen

Der nächste logische Schritt ist die Validierung des MW-Technologiedemonstrators im Sommer 2024. Dieser Termin musste leider außerhalb des Projektrahmens verschoben werden, da die Verfügbarkeit diverser essentieller Armaturen für Wasserstoff niedriger ist als erwartet. Darum mussten auch Design und Auslegung an real lieferbares Equipment angepasst werden. Es muss jedoch erwähnt werden, dass sich die Projektpartner für eine unbedingte Validierung des MW-Technologiedemonstrators auch außerhalb des Projektrahmens ausgesprochen haben. Diese Entscheidung konnte auf Basis der Unterstützung der FFG und die dadurch ermöglichten technologischen Fortschritte und Errungenschaften im Bluetifuel Projekt getroffen werden. Förderlich für diese Entscheidung wirkt auch das bereits ausgesprochene Interesse von potentiellen, zukünftigen Nutzern der Bluetifuel-Technologie in Form eines LOI und der eingereichte Patentantrag. Abgesehen von der bereits genannten MW-Brenner-Validierung wurden sämtliche Projektziele erreicht, das Projekt kann daher als sehr erfolgreich bezeichnet werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Paulitsch, N., Giuliani, F., Hofer, A. (2023) Validation of a combined optic-acoustic probe on hydrogen flames using an atmospheric lean premix pilot burner. In proceedings of the Symposium on Thermoacoustics in Combustion: Industry meets Academia (SoTiC 2023). Sept. 11 – Sept. 14, 2023. Zürich, Switzerland.
- [2] Paulitsch, N., Giuliani, F., Hofer, A., Hofer, J. and Andracher L. (2023) Progress on the complete and low-NOx combustion of eco-fuels using a thermo-acoustically-driven, hydrogen-powered pilot stage. Proceedings of Turbomachinery Technical Conference and Exposition, ASME Turbo Expo 2023, June 26-30, Boston, USA. GT2023-102987.
- [3] Paulitsch, N., Giuliani, F., Hofer, A., Hofer, J. & Andracher, L. (2022) An innovative concept for the complete and low-NOx combustion of non-carbon eco-fuels using a thermoacoustically-driven, hydrogen-powered pilot stage. Proceedings of Turbomachinery Technical Conference & Exposition ASME Turbo Expo 2022. GT2022-80886.
- [4] Paulitsch, N., Giuliani, F., Hofer, A. & Hofer, J. (2022) An innovative Concept for the complete and low-NOx Combustion of non-carbon Eco-fuels using a thermo-acoustically-driven, hydrogen-powered Pilot Stage. 17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz/Austria.

7 Anhang

8 Kontaktdaten

Nina Paulitsch (Projektleiterin)
Combustion Bay One e. U.
Schützenhofgasse 22/7, 8010 Graz
Tel. 0316 22 89 80
www.cbone.at

Johannes Hofer
P&P Industries AG (Konsortialpartner)
Dietrich-Keller-Straße 24/7, 8074 Grambach
Tel. 0316 269797
<https://www.pp-industries.at>

Lukas Andracher
FH JOANNEUM GmbH (Konsortialpartner)
Alte Poststraße 149, 8020 Graz
Tel. 0316 54530
<https://www.fh-joanneum.at>