

# Fortschrittliche Verbrennungsüberwachung durch simultane optisch, akustische Detektion der Flammenfront in einem Druckkessel

Nina Paulitsch\*, Fabrice Giuliani, Lukas Andracher

Combustion Bay One e.U., advanced combustion management, Schützenhofgasse  
22 A8010 Graz, Tel +43 (0)316 22 89 80, [Office@CBOOne.at](mailto:Office@CBOOne.at) , [www.CBOOne.at](http://www.CBOOne.at)

University of Applied Sciences FH JOANNEUM GmbH, Institute of Aviation 8020  
Graz, Austria, [www.fh-joanneum.at](http://www.fh-joanneum.at)

**Kurzfassung:** Die angestrebte europäische CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2050 stellt große Herausforderungen in fast allen Energiesektoren dar. Sei es in der Entwicklung und Weiterentwicklung von erneuerbaren Energien, die Umstrukturierung des Energienetzes oder in der Effizienzsteigerung von konventionellen Systemen, Handlungsbedarf wird jetzt verlangt. [1]

Die Transformation der Energiestruktur, weg von fossilen hin zu erneuerbaren, nachhaltigen Energieträgern ist in vollem Gange. Nichtsdestotrotz stellt die konventionelle Verbrennung von fossilen Brennstoffen noch immer einen großen Anteil der weltweiten Energieproduktion dar. Ein gewichtiger Grund sich auf eine „saubere“ und effizientere Verbrennung fossiler Brennstoffe zu konzentrieren. [1]

Die im Folgenden beschriebene Thematik befasst sich mit einer fortschrittlichen Flammenüberwachung durch optische sowie akustische Detektion der Flammenfront bei einer Verbrennung unter Druck. Die Grundidee liegt in einer integrierten, hochtemperatur- und hochdruckresistenten Sonde, welche in drei spezifischen Wellenlängenbereichen die Flammenfront detektiert und dadurch Aufschluss über die Zündung, den Betriebspunkt, die Flammenart (diffus oder vorgemischt) sowie über die Flammenturbulenz gibt. Da die Qualität der Verbrennung bestimmend für die emittierten Schadstoffe, sowie auch für die Lebensdauer der Anlage selbst ist, kann durch Kontrolle und aktives Einwirken ein Optimum im Bereich Energieeffizienz, Schadstoffausstoß sowie auch Ressourcenschonung erzielt werden.

Initiiert durch das Unternehmen Combustion Bay One e.U. in Zusammenarbeit mit der FH JOANNEUM / Institut für Luftfahrt und unterstützt durch die österreichische Forschungsförderungs-gesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) wurde 2015 bereits eine Konzeptstudie durchgeführt. Die ersten Ergebnisse wurden 2018 bei dem 15.Symposium Energieinnovation unter dem Titel „Thermische Überwachung und präzise Verbrennungskontrolle auf Basis optischer Diagnosetechniken in Brennkammern“ präsentiert. [2] Der nun hier veröffentlichte Artikel befasst sich mit der Validierung der fortgeschrittenen Sonde unter Druck, speziell mit dem Aufbau und der Funktion, mit der konzipierten Hochdruckanlage und neuen Aktuatorik und mit einer neuen Methode zur sanften Zündung unter Druck.

**Keywords:** optisch-akustische Verbrennungsüberwachung, Chromatik, Verbrennung unter Druck

## 1 Einleitung

Die Darstellung der inländischen Primärenergieerzeugung in Österreich von 2005 bis 2018 zeigt eine deutliche Reduktion der fossilen Energieträger und ein starkes Wachstum der erneuerbaren Energiequellen basierend auf dem Bericht „Energie in Österreich – Zahlen, Daten, Fakten“ des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus. Jedoch liegt weiterhin eine enorme Hürde vor uns, welche die Deckung des Energiebedarfs der heutigen Konsumgesellschaft durch rein erneuerbare Energie beinhaltet. Um diese Hürde zu meistern, führt kein Weg an einer effizienten und sparsamen Nutzung der noch vorhandenen fossilen Energieträger vorbei. [3]

Das Validierungsprojekt „Fortschrittliche Verbrennungsüberwachung durch simultane optisch, akustische Detektion der Flammenfront in einem Druckkessel“ befasst sich mit der Erprobung einer hochtemperatur- und hochdruckresistenten Sonde, welche in die Brennkammer einer Gasturbine eingebracht wird und in Echtzeit Informationen über den Zünderfolg, das Verhalten der Flamme, die Flammenart (diffusiv oder vorgemischt) und folgedessen den Betriebspunkt wiedergeben soll. Über die ermittelten Daten kann eine optimale Verbrennungssteuerung in Richtung weniger NO<sub>x</sub>, CO, unverbrannte Kohlenwasserstoffe, CO<sub>2</sub> und eine effizientere Verwertung der Ressourcen erfolgen.

Zusätzlich soll die Problematik von Verbrennungsinstabilitäten (auch Pulsationen im Brennkessel) beziehungsweise grundsätzlich das thermoakustische Verhalten der Verbrennung und der Brennkammer durch die Sonde detektiert werden. Da die Verbrennung einen exothermen Prozess darstellt, wird Wärme in die Umgebung freigesetzt. Dieser Vorgang erfolgt jedoch nicht homogen, was zu Druckschwankungen im Brennraum führt. Bei bestimmten Frequenzen (meist Eigenfrequenzen der Anlage) können sich diese Druckänderungen soweit aufschaukeln, dass die Flamme zu pulsieren beginnt, was zerstörerische Folgen für die Anlage haben kann und somit Sicherheitsrisiken birgt. Die Pulsation verursacht unkontrollierbare Deformierungen der Flamme, wodurch Brenner wie auch Brennkammerstruktur zu Schaden kommen können. Dieser Effekt der thermoakustischen Instabilität tritt vorallem bei mageren und schadstoffarmen Verbrennungssystemen auf, was die Weiterentwicklung dieser effizienteren Systeme erschwert. [4] [5]

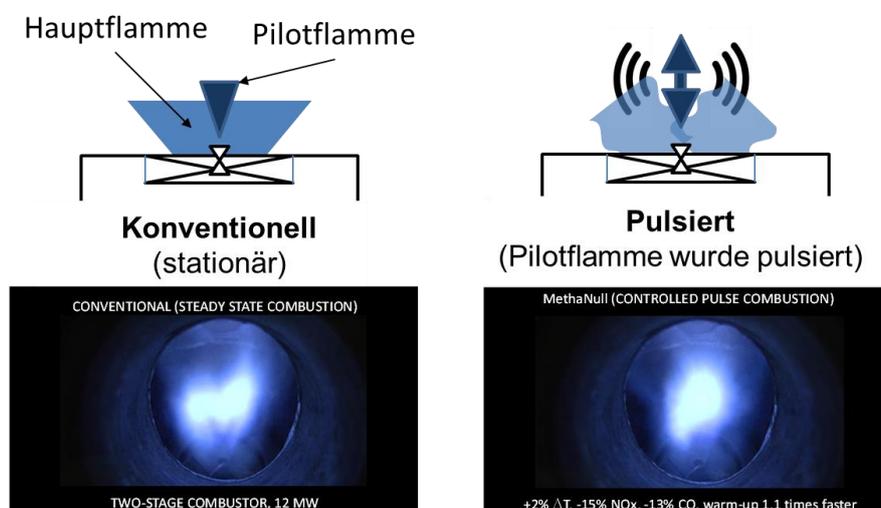


Abbildung 1: Vergleich konventionelle Verbrennung vs. kontrolliert pulsierter Verbrennung

Undefinierte und unkontrolliert auftretende Verbrennungsinstabilitäten bergen eine Gefahr für die Verbrennung selbst und den Brennraum, eine kontrollierte Pulsation der Flamme kann hingegen durchaus positive Effekte mit sich bringen. Wird durch die Pulsation (Anregung) mit einer bestimmten Frequenz eine Eigenfrequenz der Flamme/Verbrennung selbst getroffen, tritt eine Veränderung der Flammenform ein, siehe Abbildung 1 rechts. Die Flamme wird kompakter und schwingt in der Erregerfrequenz. Im Bereich um die Löschgrenze kann durch Pulsation eine stabile Flamme erhalten werden, welche ansonsten erlöschen würde. Dies lässt sich durch die Erhöhung der Energiedichte durch die Pulsation erklären.

Im Rahmen des Projektes zur Validierung der Sonde wurde zusätzlich notwendiges Equipment entwickelt und gefertigt. Eine Testzelle, ausgelegt auf maximal 10 bar Überdruck, mit speziell für die Sonde geeigneten Instrumentierungsports, speziell für die Sonde, wie auch optische Zugänge wurden konzipiert, konstruiert und gefertigt. Der sich in der Testzelle befindliche, zweistufige Brenner wurde mittels additiver Fertigung durch die selektive Laserschmelz-Methode (SLM) hergestellt. [6] [2] Um die Zündqualität bzw. den Zünderfolg überprüfen zu können und etwaige Komplikationen zu evaluieren, wurde ein Prototyp eines Zündsystems entwickelt. Im Großen und Ganzen wurden dadurch die Randbedingungen für die Erprobung der Sonde definiert.

## 2 Methodik

### 2.1 Hochdruck- und hochtemperaturresistente Sonde

Auf Basis der Entwicklung und der Ergebnisse der „Rayleigh Criterion Probe (RCP, Patentanmeldung von CBOne und FH JOANNEUM A 50160/2017)“ wurde eine Kombination aus akustischen und optischen Sensoren für den Gebrauch in einer aggressiven Hochtemperatur- und Hochdruckumgebung konzipiert und entwickelt. [7] [8] Das thermodynamische Rayleigh-Kriterium beschreibt die Bedingungen, welche vorherrschen müssen, damit Brennkammerpulsationen entstehen können. [9]

Die weiterentwickelte Sonde setzt sich aus einer hochtemperaturresistenten Schnelldrucksonde (Sensor Typ CP232 von Meggitt) und vier Fotodioden vom Typ Osram Opto SFH 229 zusammen, wie in Abbildung 2 veranschaulicht wird. Als Temperaturbarriere für die Fotodioden wird ein kegelförmiges SQ1 Quarzglas verwendet, welches selbsthemmend und zusätzlich geklebt die Sonde abdichtet. Die 4 Fotodioden sind im 90° Winkel zueinander auf einem Durchmesser von 19,5mm angeordnet. Die gesamte Sonde besitzt einen Sichtwinkel von 13°.

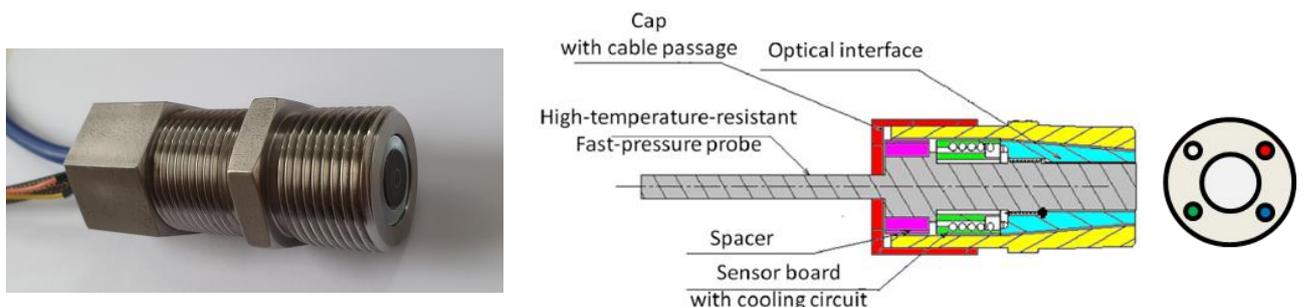


Abbildung 2: Aufbau und Struktur der fortgeschrittenen Sonde

Der Opto-Sensor Typ SFH 229 ist speziell für Anwendungen im Bereich von 380nm bis 1100nm geeignet. Um eine detailliertere Übersicht über den Spektralbereich der Verbrennung zu bekommen, wurden drei der vier Fotodioden mit optischen Filtern versehen. Diese Filter sind breitbandig ausgelegt und besitzen Wellenlängenbereiche von:

- Rot: 630 bis 700nm
- Blau: 450 bis 490nm
- Grün: 490 bis 560nm

Je nach Flammenart und Leistung emittiert die Flamme Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen und Intensitäten. Bei einer vorgemischten Flamme werden die Reaktanden Luft und Brennstoff vor Einbringung in den Brennraum vermischt, was eine vollständige Verbrennung gewährleistet. Durch den Überschuss an  $\text{CH}^*$ -Radikalen liegt bei Verbrennung dieser eine bläuliche Flamme mit geringer Intensität vor. Hingegen tritt bei Diffusionsflammen der Brennstoff erst im Brennraum mit Luft in Kontakt. Diffusionsflammen emittieren gelbrötliches Licht mit höherer Intensität, da feste Partikel des Abgases, wie beispielsweise Ruß, zu glühen beginnen. Die gemessene Lichtintensität ist von der thermischen Leistung abhängig, grundsätzlich liegt aber bei Diffusionsflammen eine um circa den Faktor 100 höhere Intensität vor. Mittels Überwachung spezifischer Spektralbereiche je Opto-Sensor soll die Flammenart bestimmt werden und es können etwaige Nachjustierungen am Betriebspunkt erfolgen. [10]

Die Kombination von Schnelldrucksonde und Opto-Sensor ermöglicht es, das Frequenzverhalten der Brennkammer und der Flamme zu detektieren. Mittels eines kalibrierten Schnelldruckventils (Sirene - Patent von CBOne, A 50772/2014) wird beispielsweise ein Frequenzbereich von 0 bis 2000 Hz durchlaufen. [11] Werden hierbei Resonanzfrequenzen der Flamme getroffen, verändert sich ihre Form und auch die Intensität, was durch die Sonde detektiert wird. Aufgrund der optischen und akustischen Daten können Resonanzfrequenzen bzw. kritische Frequenzen für die Verbrennung festgestellt werden. Tritt diese kritische Frequenz bei einem bestimmten Betriebspunkt auf, kann durch die Echtzeitdaten sofort reagiert werden und der Betriebspunkt angepasst werden.

## 2.2 Die Testzelle

Für die Erprobung der Sonde und aus sicherheitsrelevanten Gründen wurde die Testzelle auf 10 bar absolut Druck ausgelegt. Der Betriebsdruck soll sich auf 3 bar relativ belaufen.

Die Testzelle setzt sich aus einem modularen Brennersystem zusammen, bestehend aus Plenum, Brennergehäuse, Anschlüsse für die Instrumentierung, CBO4 –Brenner, optischen Zugängen zum Brennraum sowie einer Keramik-Düse, siehe Abbildung 3 links.

Das Plenum dient zur Vormischung der Reaktanden und Verteilung der Luft im Brennersystem. Die gesamte Luft wird in das Plenum eingebracht und kurz vor dem CBO4-Brenner durch zwei konzentrische Rohre in Kühl- und Brennluft aufgeteilt. Das Propan-Gas wird mittels Gaslanzen direkt in das innere Rohr eingebracht und mit der Brennluft vermischt. Der CBO4-Brenner, siehe Abbildung 3 rechts, wurde durch additive Fertigung mit der selektiven Laserschmelz-Methode aus Inconel 718 hergestellt. Der additiv gefertigte Brenner besitzt zwei Stufen: Pilotstufe (20% der maximalen thermischen Leistung) und Hauptstufe.

Basis für die speziell entwickelte Struktur des Brenners lag in der Optimierung der Aufbaustruktur durch die geometrische Freiheit des 3D-Druckens. Dadurch konnte ein Zündsystem, welches später näher beschrieben wird, integriert werden. Auch die Kopfplatte des Brenners wurde durch Integration der Stützstrukturen ins Design so konzipiert, dass sie als Wärmetauscher bzw. Wärmeübertrager fungiert. Eine konventionell nicht herstellbare Struktur wurde realisiert, welche ein Abheben der Flamme erzwingt und dadurch die thermische Belastung auf den Brenner verringert. [6] [2]

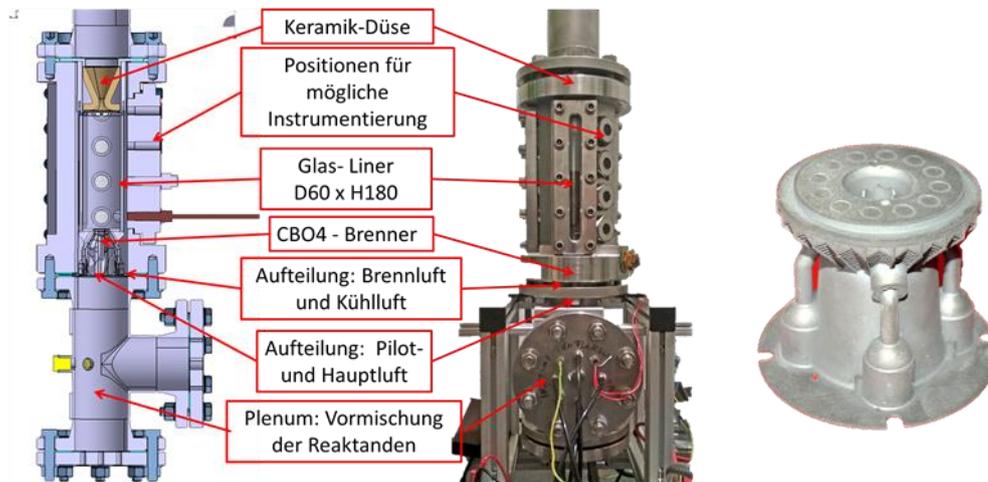


Abbildung 3: links: Aufbau der Testzelle. Rechts: CBO4-Brenner

Die Keramikdüse wird den Aufbau des Überdrucks in der Brennkammer verwendet. Je nach gewünschtem Druckniveau können Düsen mit Durchmesser 6mm (höchster Druck), 8mm, 10mm und 12mm (niedrigster Druck) eingebaut werden.

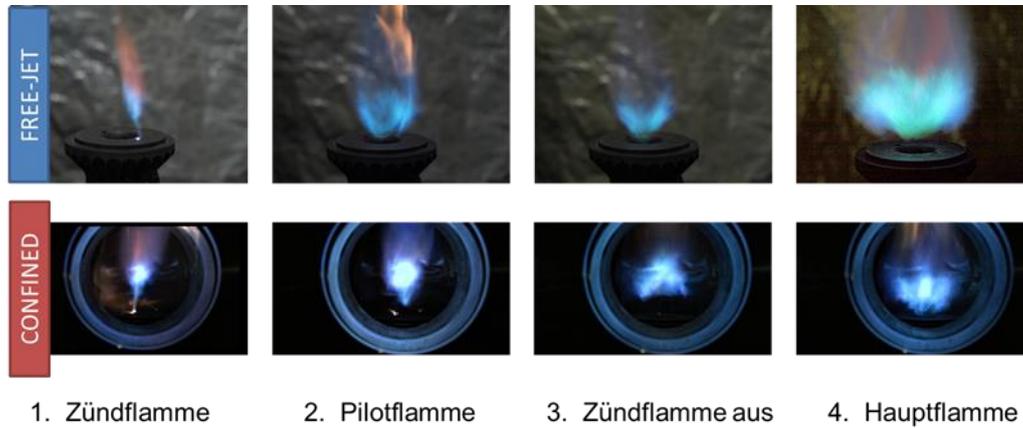
Ausgehend von diesen definierten und optimierten Parametern der Testzelle wurden die ersten Tests der Sonde unter Druck durchgeführt.

## 2.3 Das Zündsystem

Die Erprobung der Zündung mit einer Gasturbinen-Zündkerze in früheren Versuchen führte zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. [12] Die Zündqualität bzw. der Zünderfolg durch den entstehenden hochenergetischen Funken zwischen Anode und Kathode der Zündkerze fiel mäßig bis unzureichend aus. Zusätzlich bzw. ausgelöst durch den mäßigen Zünderfolg und somit oftmalige Betätigung der Zündung liegt eine erhöhte Gefahr einer Detonation durch eine hohe Menge an reaktivem Gas, erhöhtem Druck in der Brennkammer und der schockartigen Funkenzündung vor. Durch diese experimentell gewonnenen Erfahrungswerte wurde das im Folgenden beschriebene Zündverfahren entwickelt und angewendet.

Das Grundprinzip des Zündverfahrens basiert auf einer separaten Luft- und Brennstoffversorgung für die Zündeinheit, welche eine Zündflamme generiert, wodurch die Pilot- und die Hauptstufe des Brenners gezündet werden. Dieses System beschreibt eine sanfte Zündmethode, da die Zündflamme gerade die thermische Leistung zur Verfügung stellt (die Zündflamme kann bis zu einer thermischen Leistung von 1kW hochgefahren werden), welche für das Anfahren des Brenners notwendig ist und liefert keinen schockartigen hohen Energieeintrag in den Brennraum, was zu einer Detonation führen könnte. [13]

Durch die separate Versorgung der Zündeinheit mit Brennstoff und Luft wird im Bereich um den Zünder eine definierte Menge an Reaktanden eingebracht, welche gezündet werden, um die Zündflamme zu generieren. Im Zuge des Projektes wurden und werden zwei Arten an Zünder evaluiert und getestet.



**Abbildung 4: Beispiel für Zündung mit CBO4 Brenner. Oben: Zündung atmosphärisch im Freien. Unten: Zündung atmosphärisch in einer Brennkammer**

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, wurde die Zündsequenz am Brenner CBO4 auf einer Fotostrecke festgehalten. Die Zündung des freien Jets (Umgebungsdruck, ohne Brennkammergehäuse) (Abbildung 4 oben) bzw. die Zündung in der Brennkammer (Abbildung 4 unten) wurde aufgenommen. Die Zündflamme wird durch einen Funken, der zwischen Zündkabel und Masse entsteht, gezündet. Um einen sicheren Zünderfolg zu gewährleisten, liegt das separat eingeführte Brennstoff-Luft-Gemisch für die Zündung im fetten Bereich (mehr Brennstoff als Luft) vor, was durch die auftretende, leichte Diffusionsflamme ersichtlich ist. Im zweiten und dritten Schritt wird das Pilot-Gas-Luft-Gemisch zugeschaltet und nach Zündung die Brennstoff-Zufuhr der Zündflamme geschlossen. Die Pilotflamme liegt im leicht mageren Bereich vor, durch die bläuliche Färbung der Flamme ersichtlich. Zuletzt wird die Hauptflamme aktiviert und ein bestimmter Betriebspunkt angefahren. Die Verbrennung befindet sich hier in der Nähe des stöchiometrischen Punktes (Brennstoff: Luft=1), was durch die grüne Färbung der Flamme verdeutlicht wird.

### 2.3.1 Zündung durch Methode „Zündkerze“

Die Zündflamme für das Anfahren des Brenners wird durch einen hochenergetischen Funken generiert. Dieses System ist in der Testzelle verbaut, wurde getestet und war die Grundlage für die Versuchsreihe unter Druck.

Das Prinzip der Funkenzündung ist vergleichbar mit der Zündung eines Benzin-Ottomotors. Einziger Unterschied ist die Form der Zündkerze. Aus platztechnischen Gründen wird keine herkömmliche Zündkerze verwendet, sondern ein isoliertes Zündkabel, welches durch den gesamten Brenneraufbau bis zur Kopfplatte geführt wird und am Ende heraus ragt. Der blanke Draht stellt die Kathode dar, die Anode wird durch den Brenner realisiert. Zwischen den beiden Polen entsteht bei Betätigung des Zündtasters ein hochenergetischer Funken, welcher zur Zündung der Zündflamme führt, ersichtlich in Abbildung 5 rechts.

In Abbildung 5 wird das von CBOne entwickelte S3R Zündsystem dargestellt, welches im CBO4-Brenner integriert wurde. S3R steht für „Safe, Smooth, Smart and Reliable“ und vereint alle Vorteile einer Zündung mittels Zündflamme.

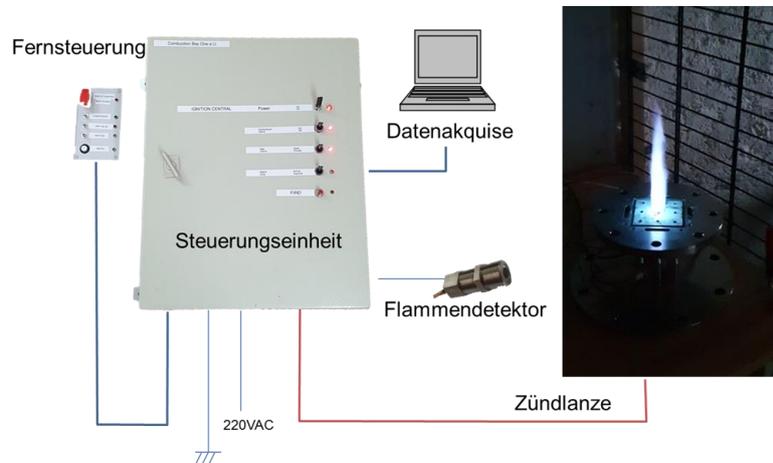


Abbildung 5: S3R - Zündsystem

Die funkenbasierte Zündmethode gewährleistet eine sichere und schnell eintretende Zündung der Zündflamme. Jedoch kommt es bei Betätigung des Zündtasters bzw. des hochenergetischen Zünders zu elektromagnetischen Störungen in der Umgebung. Dies kann Störungen und Probleme bei den seriellen Schnittstellen des Computers verursachen. Aufgrund dieser Problematik wurde eine weitere Methode zur Zündung herangezogen und getestet.

### 2.3.2 Zündung durch Methode „Glühstift“

Die Zündung der Zündflamme mittels Glühstift ist vergleichbar mit der Zündmethode in Dieselmotoren. In Abbildung 6 wird der schematische Aufbau der Methode wie auch deren Funktion dargestellt. Der Glühstift befindet sich in einem Quarzglasrohr und wird mit einem Gemisch aus Brennstoff und Luft umspült. Bei Betätigung der Zündung wird der Glühstift auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt, wodurch die Zündung ausgelöst wird. Bis die Zündtemperatur erreicht ist, benötigt der Glühstift eine gewisse Zeitspanne. Diese auftretende Latenzzeit muss ermittelt werden und in die Regelung der Brennstoffzufuhr integriert werden. Dies bedeutet, dass erst nach Ablauf der Latenzzeit, also bei Erreichen der Zündtemperatur, das Brennstoff-Luft-Gemisch zugeführt werden darf.

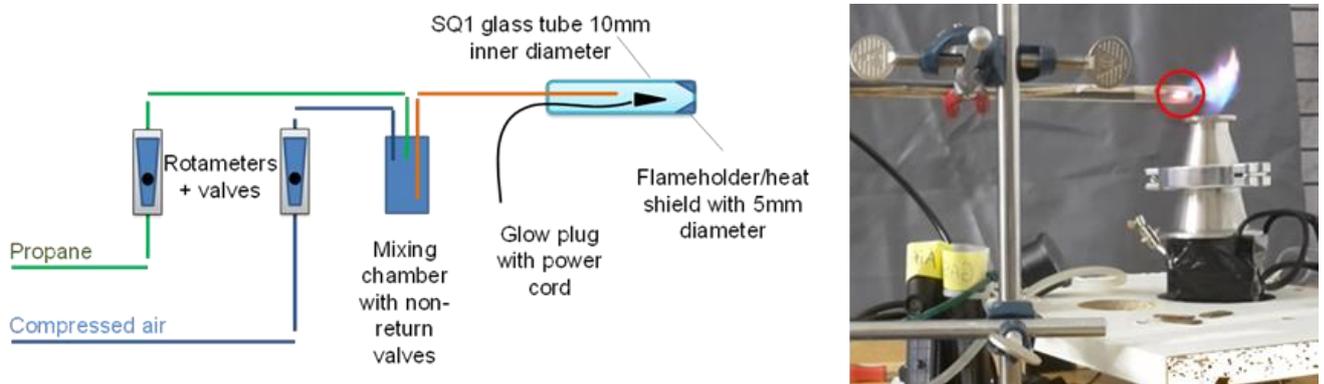


Abbildung 6: Schematischer Aufbau - Methode Glühstift

Dieses Zündsystem wurde im Labormaßstab getestet, jedoch noch nicht in die Testzelle integriert und evaluiert. Durch einen erhöhten Platzbedarf im Vergleich zur Methode „Zündkerze“ müssen einige konstruktive Änderungen getätigt werden. Des Weiteren wird eine Weiterentwicklung und Erprobung in Richtung Kombination zwischen Methode „Zündkerze“ und „Glühstift“ angedacht. Begründet ist dies durch das erhöhte Sicherheitsrisiko der Zündung mit Glühstift beim plötzlichen Erlöschen der Verbrennung. Es muss eine sofortige Zündung erfolgen, um die verbleibenden Restmengen an Gas zu verbrennen, was jedoch durch die zeitliche Verzögerung des Glühstifts bis zu Erreichen der Zündtemperatur nicht möglich ist. Diese Aspekte sind ausschlaggebend für eine Entwicklung Richtung Kombinationssystem.

## 2.4 Positionierung der Sonden

Die richtige Positionierung und Ausrichtung der Sonden in der Brennkammer ist essentiell für die Messung. Da vorgemischte Flammen eine eher geringe Lichtintensität besitzen, muss die Sonde durch die Ausrichtung und Positionierung eine optimale Ausnutzung der Lichtintensität erfahren. Die ersten unter Druck durchgeführten Experimente wurden mit drei identischen Sonden, positioniert wie in Abbildung 7 ersichtlich, durchgeführt.

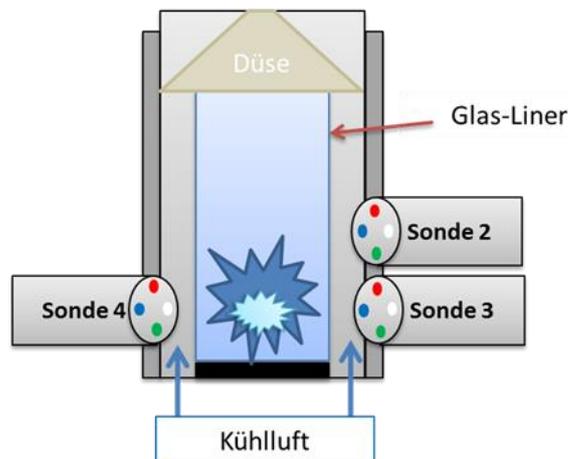


Abbildung 7: Versuchsaufbau – Verbrennung unter erhöhtem Druck

Die Kombination aus drei Sonden in dieser Anordnung ermöglicht die Beobachtung der Primär- und Sekundärzone der Verbrennung. Zusätzlich wird durch die Redundanz eine Fehlererkennung erleichtert. Diese Konfiguration aus allen drei Sonden ermöglicht die Abschätzung:

- der Ausdehnung der Flamme über die Detektion von Primär- und Sekundärzone
- der Flammenart durch die Färbung der Flamme in Primär- und Sekundärzone
- der thermischen Leistung durch die Intensität
- der Turbulenz der Flamme speziell durch die Beobachtung der Primärzone

Die Information über die Ausdehnung der Flamme steht in Relation mit der Menge an NO<sub>x</sub>-Emissionen. Je länger die Flamme ist, desto länger ist die Verweilzeit der Reaktanden in der heißen Zone, was zu vermehrter Bildung von NO<sub>x</sub> führt. Bei Erprobung einer Diffusionsflamme konnte durch die optischen Zugänge des Brennraums eine Blaufärbung der Primärzone und Rotfärbung der Sekundärzone festgestellt werden, was sich durch das

Glühen der Rußpartikel erklären lässt. Der Problematik der nicht durchgehend konstanten Färbung der Flamme wird mit dieser Konfiguration entgegen gewirkt. Die Beobachtung der Primärzone durch zwei Sonden ermöglicht Resonanzfrequenzen und dadurch ausgelöste Verbrennungsinstabilitäten zu erkennen, da der „Kern“ der Verbrennung zu schwingen beginnt.

### 3 Ergebnisse

Ziel der Validierungsstudie der Sonde ist die Differenzierung unterschiedlicher Leistungsstufen mit Identifizierung der Flammenart durch chromatische Analyse des Spektralbereiches der Flamme unter Druck. Zusätzlich sollen anhand einer Frequenzanalyse die Interaktionen zwischen Testzelle und Verbrennung unter Druck mittels Sonde beobachtet werden und eine erste Digitalisierung des Zündvorganges vorgenommen werden.

Für alle Experimente unter Druck wurde das in 2.3.1 vorgestellte S3R Zündsystem verwendet. Durch die Verwendung der 10mm Düse konnte ein leicht erhöhter Druck von 0,5 bar relativ erreicht werden, was die Brennumbedingungen für alle hier erwähnten Tests widerspiegelt. Die Anordnung der Sonden für jeglichen Test lag wie in Abbildung 7 vor.

#### 3.1 Die Zündsequenz

Über die optische sowie akustische Information der Sonde wurde eine Aufzeichnung von fünf Zündsequenzen zu jeweils 30 Sekunden durchgeführt, dargestellt in Abbildung 8. Der obere Plot veranschaulicht die Rohmessdaten, aufgezeichnet von vier Fotodioden mit verschiedenen optischen Filtern und einer Schnelldrucksonde. Im unteren Plot wurde das Signal der Fotodioden um den Mittelwert des Grundpegels reduziert (Offsetreduzierung) und durch die Standardabweichung des Grundpegels dividiert (Normierung).

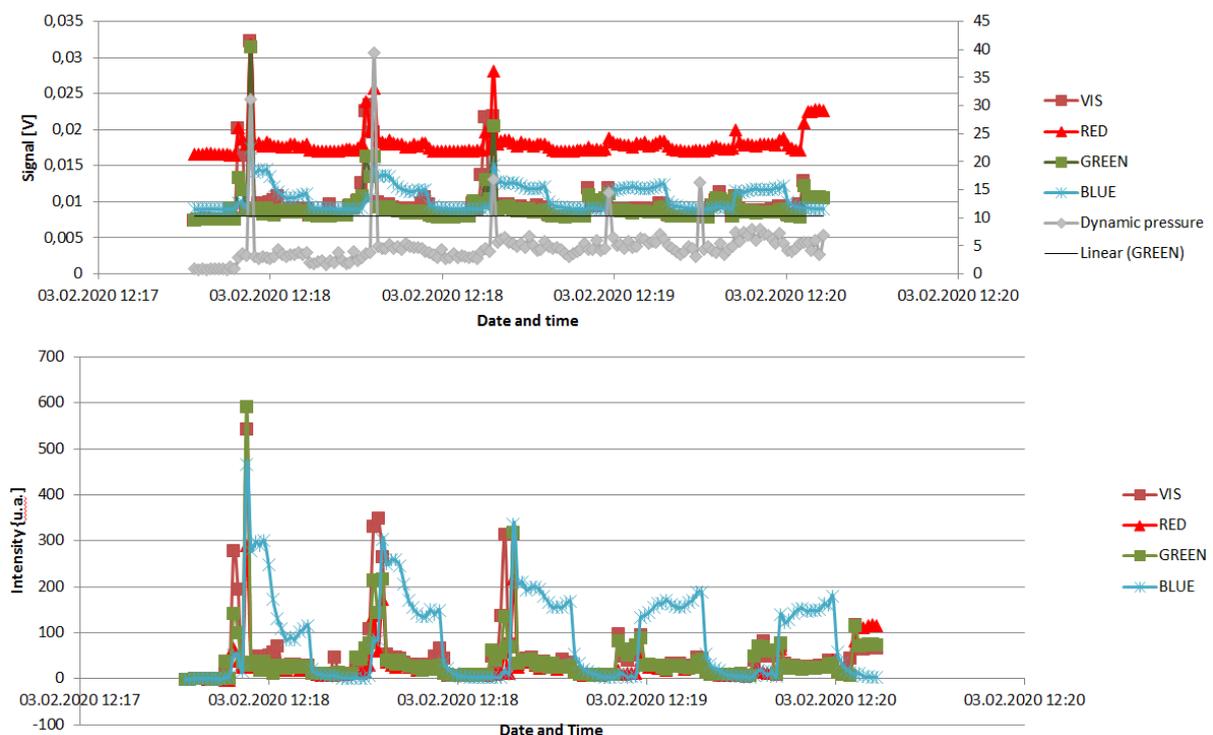


Abbildung 8: Zündsequenz unter leicht erhöhtem Druck

Ausgelöst wurde die Zündung durch die manuelle Betätigung des Zündtasters, ersichtlich durch die markante, anfängliche Spitze in den ersten drei Zündsequenzen (Abbildung 8 unten). Durch den hochenergetischen Funken wurde die Zündflamme entzündet. Nach fünf Sekunden erfolgte die Aktivierung der Pilotstufe des Brenners. Nach weiteren fünf Sekunden wurde die Brennstoffzufuhr der Zündflamme geschlossen. Die Pilotstufe wurde 20 Sekunden lang betrieben, danach kam es zum erzwungenen Erlöschen der Flamme. Diese Sequenz wurde nach 15 Sekunden fünf Mal wiederholt.

Der Ablauf der Zündung und die einzelnen Betriebspunkte werden durch die Messdaten gut wiedergespiegelt. Durch die zusätzliche chromatische Differenzierung kann auf Basis des Niveaus des Sensors mit blauem Spektralfilter, auf eine vorgemischte, blaugefärbte Flamme geschlossen werden. Dies wurde durch visuelle Kontrolle während der Versuche bestätigt. Die Unterscheidung Flamme / keine Flamme ist durch die Daten sehr gut ersichtlich. Die elektromagnetischen Störungen durch den Zündtaster sind für alle fünf Zündsequenzen im Messsignal der Schnelldrucksonde zu beobachten (Abbildung 8 oben). Zusätzlich weist die Schnelldrucksonde eine Erhöhung des Grundpegels über die Zeit auf. Dies hängt mit der Temperaturerhöhung des Brennraums durch die wiederholten Zündversuche über den Testzeitraum zusammen.

### 3.2 Differenzierung der Leistungsstufen

In diesem Versuch wurde die thermische Leistung um 40% von 4,25kW über 5,1kW auf 5,95kW erhöht. In Abbildung 9 links, werden die Messdaten der Schnelldrucksonden S2, S3 und S4 über die Zeit dargestellt. In Abbildung 9 rechts, liegen die Daten der Fotodioden vor, welche wiederum eine Offsetreduzierung und Normierung erfahren haben.

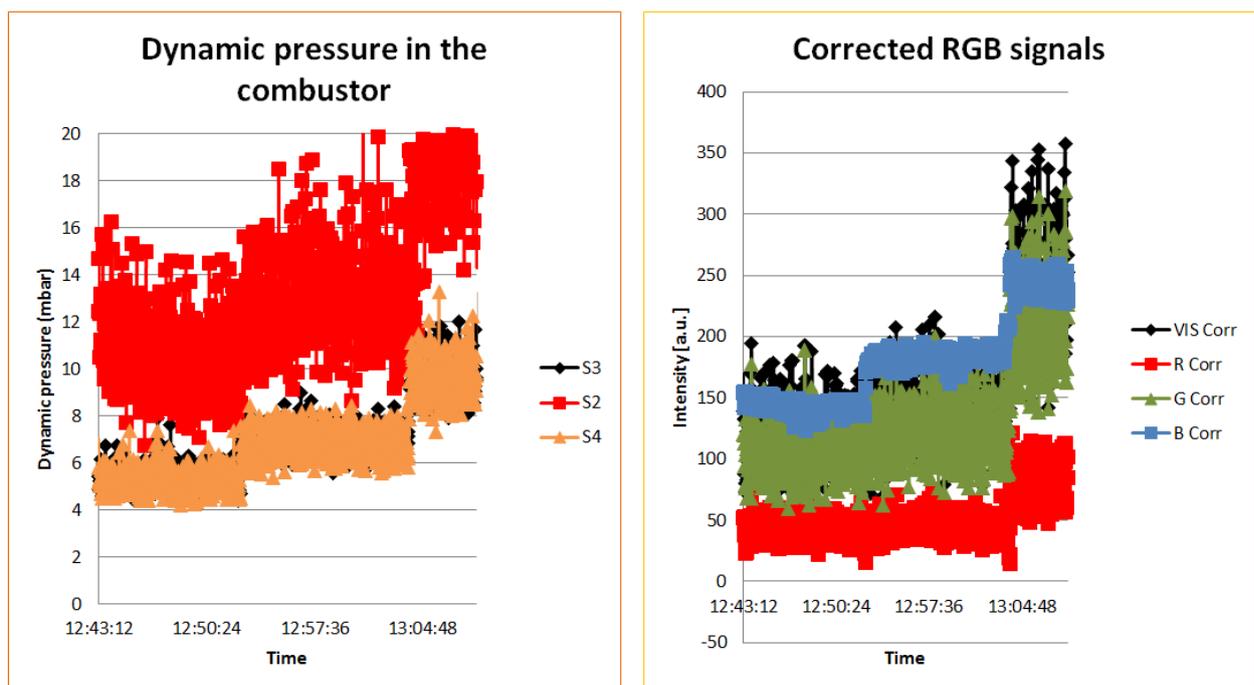


Abbildung 9: Korrelation Messdaten Schnelldrucksonden (links) und Messdaten Fotodioden (rechts).

Der gemessene, dynamische Druck der Schnelldrucksonden spiegelt die Positionierung der Sonden und so die Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärzone der Verbrennung wieder. Die beiden Sonden in der Primärzone, Sonde S3 und Sonde S4, korrespondieren sehr gut. Die Sonde S2 weist im Vergleich dazu eine höhere Fluktuation und ein höheres Druckniveau auf, was durch das starke Flackern der Flamme in der Sekundärzone erklärt werden kann. Die akustischen Messdaten liefern Informationen über die Turbulenz der Flamme und offensichtlich über die thermische Leistung.

Die Messdaten der Fotodioden wie auch der Schnelldrucksonden korrelieren gut miteinander. Die chromatische Analyse der Flamme durch die Sensoren zeigt die gleichen Trends wie die Messergebnisse aus Versuchen zur Bestimmung der Spektralbereiche der Flamme durch Fotografie. Im mageren Bereich, der ersten und zweiten Leistungsstufe, dominiert der blaue Anteil der Flamme. Je näher wir dem stöchiometrischen Betriebspunkt kommen, desto mehr übernehmen die ungefilterten Sensoren und mit grünem Filter die Oberhand. Zusätzlich nimmt das Verhältnis zwischen rotem und blauem Bereich in Richtung Stöchiometrie zu. Die Sensoren ohne Filter und mit grünem Filter repräsentieren gut die Turbulenzen der Flamme, besitzen folge dessen Informationen über das Flammenverhalten.

### **3.3 Frequenzverhalten der Flamme**

Für die Erprobung der Sonde in der Thematik Verbrennungsinstabilitäten wurde ein Schnelldruckventil in der Bauart einer Sirene [10] verwendet. Die Sirene wird hier zur kontrollierten und definierten, akustischen Erregung verwendet. Sie durchläuft einen definierten Frequenzbereich mit maximaler Erregeramplitude, um Resonanzspitzen zu detektieren. Alle zuvor aufgenommenen, relevanten Frequenzen werden dann stufenweise von der Sirene mit voller Erregeramplitude angefahren und konstant gehalten. Bei konstantem Frequenzlevel wird die Erregungsamplitude vom Maximum zum Minimum variiert. Diese Methodik folgt der einer Empfindlichkeitsanalyse, da die minimale Erregeramplitude, die zur Auslösung der Resonanz benötigt wird, detektiert werden kann.

Die in Abbildung 10 veranschaulichten Messergebnisse stellen den Vergleich zwischen Schnelldrucksonden und optischen Sensoren dar. Die dynamischen Anteile werden betrachtet. Die Frequenzbereiche 600Hz, 1200Hz, 1400Hz und 1900Hz weisen eine hohe Korrelation auf. Diese Beobachtung wurde unter mageren Verbrennungsbedingungen mit einer thermischen Leistung von 4,4kW unter 1,4 bar absolut gemacht. Die Ergebnisse wirken realistisch, ein Cross Talk Phänomen wird ausgeschlossen, da sich die Flamme bei diesen Frequenzen offensichtlich verformt, visuell beobachtet durch die optischen Zugänge der Brennkammer. Eine Observation der Verformung der Flamme weit über 1000kHz ist zum ersten Mal seit Bestehen dieses Forschungsteams identifiziert worden.

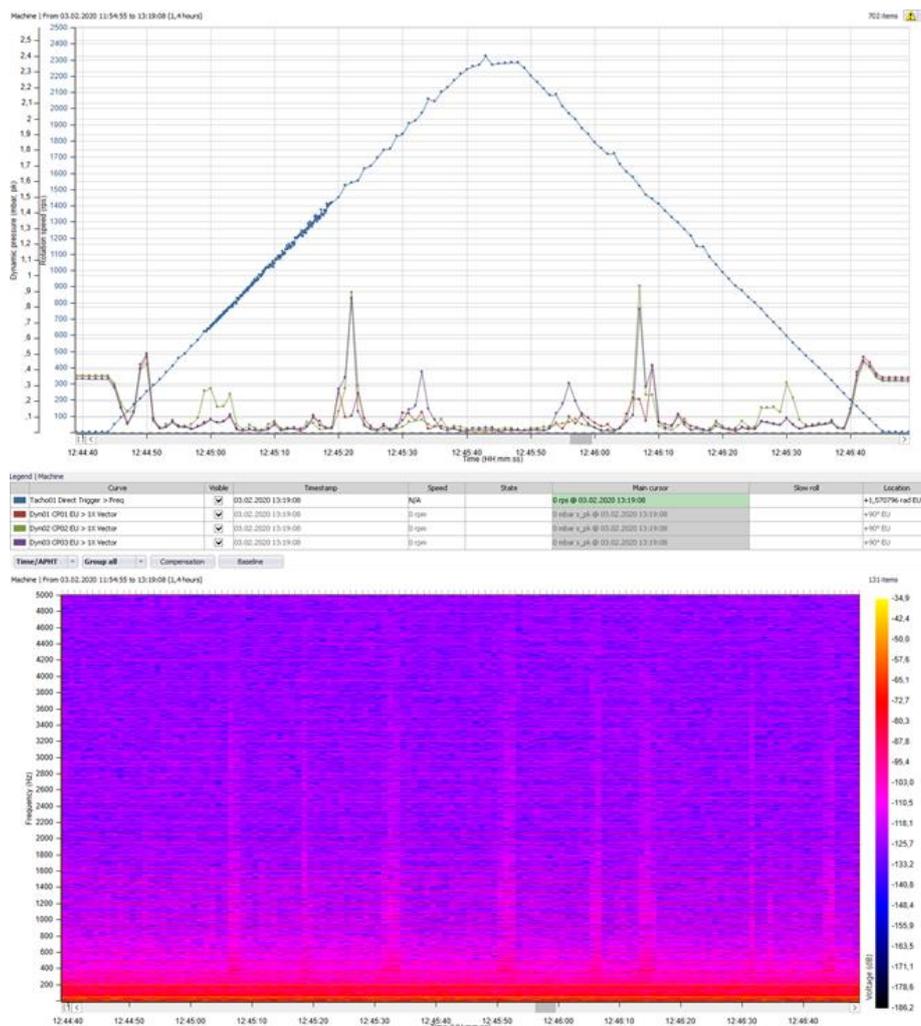


Abbildung 10: Akustische Erregung der Flamme. Oben: Frequenzerregung (Rampe) und Messdaten der Schnelldrucksonden. Unten: Spektrum der optischen Sonde mit blauem Filter

## 4 Conclusio

Grundsätzlich ist die Kombination aus optischer und akustischer Überwachung der Verbrennung sinnvoll. Wie in Abbildung 8 oben ersichtlich, wurde die akustische Messung der Schnelldrucksonde durch die Temperaturänderung beeinflusst, was zu einer falschen Interpretation der Messdaten führen kann, wenn nur die akustischen Daten berücksichtigt werden.

Durch die Sonde kann ein digitaler Blick in die Brennkammer gewährt werden und dadurch wird Aufschluss über die Vorgänge in der Brennkammer gegeben. Über die detaillierte chromatische Differenzierung kann die thermische Leistung wie auch die Flammenart bestimmt werden. Eine erste Abschätzung der Schadstoffe im Abgas kann so getätigt werden.

Die vorgeschlagene Kombination von drei Sonden in der gezeigten Anordnung gibt detaillierten Aufschluss über die Verbrennungssituation. Die Überwachung durch die Sonde erhöht zusätzlich die Sicherheit in Bezug auf Anfahren des Brenners, die Wartung und Pulsationen im Brennraum. Des Weiteren kann eine höhere Lebensdauer und angepasste Wartungsintervalle durch Informationen der Sonde erreicht werden.

## 5 Danksagung

Dieses Projekt wurde von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) finanziell unterstützt. Das Projekt ist unter den Namen „emootion“ mit der Vertragsnummer 850470 zu finden.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>, 2018. [Online].
- [2] V. G. F. a. A. L. Moosbrugger, „Thermische Überwachung und präzise Verbrennungskontrolle auf Basis optischer Diagnosetechniken in Brennkammern“.,“ 15. *Symposium Energieinnovation*, 14-16. 02 2018.
- [3] B. f. N. u. T. Österreich, „Energie in Österreich 2019 - Zahlen, Daten, Fakten“,“ 2019.
- [4] J. Rayleigh, „The Theory of Sound“,“ 1875.
- [5] A. a. D. W. Putnam, „A study of burner oscillations of the organ-pipe type“.,“ *Trans ASME*, 75(1), pp. 15-28., 1953.
- [6] V. G. F. P. N. a. A. L. Moosbrugger, „Progress in burner design using additive manufacturing with a monolithic approach and added features“.,“ *Turbo Expo 2019*, 2019.
- [7] F. M. V. P. N. H. A. a. A. L. Giuliani, „Combined Optic-Acoustic Monitoring of Combustion in a Gas Turbine“,“ *Proceeding of the 9th EVI-GTI International Gas Turbine Instrumentation Conference*, 20-21. 11 2019.
- [8] G. E. G. F. P. L. P. N. a. A. L. Kraft, „Heat Resistant Probe Combining Optic and Acoustic Sensors for Advanced Combustion Monitoring Including Detection of Flame Instabilities“.,“ *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017*, 2017.
- [9] E. H. M. Fernandes, „Unsteady Flames and the Rayleigh Criterion“,“ *NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences)*, Nr. vol 306, 1996.
- [10] A. Gaydon, „The Spectroscopy of Flames“,“ 1974.
- [11] F. L. A. G. K. J. S. P. a. F. J. Giuliani, „Air flow modulation for refined control of the combustion dynamics using a novel actuator“.,“ *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2012.
- [12] A. L. R. a. G. F. Lang, „Statistical evaluation of ignition phenomena in turbojet engines“.,“ *ASME Turbe Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*, June 2010.
- [13] P. Stefan Köberl, „Analysis of flame - flame interaction in gas turbine burners“,“ *FWF Contract P19955. Supervision Jakob Woisetschläger und Fabrice Giuliani*, 2008-2011.

