

# Thermische Überwachung und präzise Verbrennungskontrolle auf Basis optischer Diagnosetechniken in Brennkammern

**Vanessa Moosbrugger, Dr. Fabrice Giuliani, Lukas Andracher**

Combustion Bay One e.U., Schuetzenhofgasse 22, 8010 Graz, +43 (0)316 22 89 80,  
[vanessa.moosbrugger@cbone.at](mailto:vanessa.moosbrugger@cbone.at), [fabrice.giuliani@cbone.at](mailto:fabrice.giuliani@cbone.at), [www.cbone.at](http://www.cbone.at)

FH Joanneum GesmbH, Alte Poststraße 149, A-8020 Graz, +43 (0)316 5453-6416,  
[lukas.andracher@fh-joanneum.at](mailto:lukas.andracher@fh-joanneum.at), [www.fh-joanneum.at](http://www.fh-joanneum.at)

**Kurzfassung:** Bei dem Betrieb von Gasturbinen-Anlagen bestimmt die Qualität der Verbrennung nicht nur die Zusammensetzung der ausgestoßenen Emissionen sondern auch die Lebensdauer der gesamten Anlage. Eine fein gesteuerte und stabile Verbrennung kann die Komposition der Verbrennungsprodukte stark verändern und somit die Auswirkungen auf die Umwelt dementsprechend positiv beeinflussen. Dieses Projekt befasst sich mit der Entwicklung einer Sonde, die es ermöglicht einen Blick in die Brennkammer zu werfen und somit die Verbrennung aktiv zu überwachen und zu verbessern. Die entwickelte miniaturisierte optische und akustische Überwachung der Flamme zeichnet sich durch eine exakte Einspritzung und der Findung eines idealen Betriebspunktes aus, was zu einem geringeren Verbrauch, geringerer NO<sub>x</sub>-Emissionen und weniger Feststoffteilchen führt. Die Sonde informiert also in Echtzeit, ob eine Flamme vorhanden ist, ob die Verbrennungssequenz erfolgreich war und wie die aktuellen Betriebsbedingungen sind und detektiert gleichzeitig Verbrennungsinstabilitäten. Zum derzeitigen Entwicklungsstand ist die Sonde für den Einsatz in thermischen Anlagen bereit. In weiterer Folge soll ein Einsatz in Gasturbinen möglich sein.

**Keywords:** optisch-akustische Messtechnik, Brennraumüberwachung, stabile Verbrennung

## 1 Einleitung

Das Projekt „Thermische Überwachung und präzise Verbrennungskontrolle auf Basis optischer Diagnosetechniken in Brennkammern“, kurz „emotion“ und sein Nachfolgeprojekt „emootion“, ist ein Forschungsprojekt zwischen der Firma Combustion Bay One e.U. und der Fachhochschule JOANNEUM (Institut Luftfahrt). Durch dieses Projekt soll es ermöglicht werden, eine verbesserte Verbrennung durch aktive Steuerung der Verbrennungsparameter zu erzielen und dadurch die häufigen Wartungsintervalle der Triebwerke zu reduzieren. Durch die Überwachung der Verbrennungsinstabilitäten können Probleme innerhalb der Brennkammern fast zur Gänze vermieden werden.

Zum derzeitigen Stand der Technik erfolgt die Brennraumüberwachung während des Verbrennungsvorganges über diverse Sensoren. Die Parameter die aus dem Brennraum erfasst werden können sind auf diese Instrumentierung limitiert. Druck, Temperatur, und Treibstoffdurchfluss können so während des Verbrennungsvorganges überwacht werden. Die Kontrolle, ob eine instabile Verbrennung Schäden im Brennraum angerichtet hat, kann zum derzeitigen Stand der Technik sporadisch während der vorgegebenen Wartungsintervalle oder während einer Instandsetzung optisch über Endoskope vorgenommen werden. Durch die Verbesserungen im Triebwerksbau konnte der Treibstoffverbrauch über das letzte Jahrzehnt um 30% pro verfügbaren Sitzkilometer reduziert werden. NOx-, Ruß- und Geräusch-Emissionen wurden trotz steigender Effizienz der Triebwerke deutlich reduziert. Die aktuellen Regulationen für die Triebwerkszertifizierung sind strenger geworden (Feinpartikeln, [2, 3]), sodass es notwendig ist neue Sensor-Technologie zu entwickeln, um die Verbrennungsvorgänge in der Brennkammer besser beobachten zu können und in Echtzeit mit gewissen Parametern einer instabilen Verbrennung entgegenzusteuern. Eine Strategie das zu erreichen ist ein präziseres Management der Sicherheitsmargen was durch die Bereitstellung folgender Daten erreicht werden kann:

- Gibt es eine Flamme oder nicht?
- Hat eine Zündung stattgefunden oder nicht?
- Gibt es Verbrennungsinstabilitäten oder nicht?
- Wie sehen die aktuellen Betriebsbedingungen aus (Leistung, Ruß...)?

Durch den Einsatz eines lichtempfindlichen Sensors gemeinsam mit einem Schnelldrucksensor, der als Mikrofon agiert können all diese Daten bereitgestellt werden. Dabei gibt die Lichtintensität Auskunft darüber, in was für einem Betriebspunkt der Brenner arbeitet und wie viel Leistung generiert wird. Der Lärm der durch den Schnelldrucksensor aufgenommen wird gibt Auskunft darüber, wie turbulent die Flamme ist, ob die Verbrennung mager oder fett ist. Eine magere Flamme reagiert bei konstanter Leistung sehr empfindlich auf Turbulenz und erzeugt deswegen sehr viel Lärm. Die Korrelation der akustischen und optischen Signale hilft dabei die Geräusche der Verbrennung von den Geräuschen der Bauteile zu unterscheiden. Die optische Messtechnik ist gleichzeitig eine interessante Option zusätzliche Informationen über den Verbrennungsstatus zu erhalten. Im frühen Entwicklungsstadium im Brennerbau werden solche Sensoren im Labor und am Prüfstand eingesetzt, da eine große Anzahl an Parametern optisch gewonnen werden kann. Bildgebende Sensortechniken haben den Vorteil, dass sie während des Betriebes Inspektionen durchführen können und dass sie nicht intrusiv durchgeführt werden können (Messungen stören die Strömung nicht). Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Fotosensoren kann man heraus finden, ob eine Flamme vorhanden ist und simultan die Information über die Verbrennungsenergie die erzeugt wird die Position und Stabilität der Flamme sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit, extrahieren [4].

Dieser Beitrag erörtert die Einsetzbarkeit von optischen Messtechniken im direkten Umfeld von Gasturbinenbrennern und thermischen Anlagen mit der Möglichkeit eine präzisere Verbrennungskontrolle in Echtzeit auszuführen. Eine miniaturisierte, tragbare und völlig autonom arbeitende Messkette ist ein Produkt aus den Projekten „emotion“ und „emootion“.

## 1.1 Aufgaben

Als Industrielle Partner und Spezialist im Verbrennungsbereich übernimmt die Firma Combustion Bay One die Projektleitung und hat das komplette Design der Sonde gemacht. Die Labortests werden unter der Leitung von CBOne geplant und durchgeführt. Die Fachhochschule JOANNEUM / Institut Luftfahrt (FHJ) hat die miniaturisierte Messkette hergestellt und die notwendige Infrastruktur für die erfolgreiche Durchführung der Tests bereitgestellt. Notwendige Strömungssimulationen, vor allem für eine optimale Kühlung der Sonde, werden von der FHJ durchgeführt. Die Inhalte des Projektes sollen in weiterer Folge für Lehrzwecke verwendet werden und werden dementsprechend noch aufbereitet.



Abb. 1: Darstellung des Projektkonsortiums

## 2 Methodik

Heutige Sensortechnologien in Brennkammern müssen hohen Drücken und Temperaturen standhalten und sollen gleichzeitig in sehr lauten und vibrierenden Umfeldern voll funktionsfähig sein. Das Problem, dass optische Messtechnik, die Nahe an der Flamme operiert zusätzlich Gefahr läuft durch Verrußung verunreinigt zu werden, muss bei der Entwicklung durch die Platzierung direkt in der Strömung berücksichtigt werden. Durch die Extreme Strahlungsenergie bleibt die Oberfläche des Sensors aber quasi selbstreinigend. Strategien zur Vermeidung von Verschmutzungen der optischen Schnittstellen werden gemeinsam entwickelt. Um das System ausfallsicher zu gestalten wird durch Einsatz mehrerer Sensoren auf Redundanz gesetzt. Der Einbau von drei Sensoren soll eine sichere Rückmeldung aus der Brennkammer gewährleisten. Um die richtige Bauweise der Sonde zu ermitteln wurden zwei Varianten erforscht. Zum einen wurde der optische Sensor so nahe wie möglich zur optischen Schnittstelle positioniert und mit einer geeigneten Kühlung versehen, damit die Messtechnik auf lange Sicht zuverlässig funktionieren kann. Zum

anderen wurde der Sensor abseits der Flamme, in einer „sicheren“ Umgebung, platziert. Hierbei enthält die optische Schnittstelle eine Linse gefolgt von einem Lichtsender. Auch der Positionierung der Sonde direkt in der Brennkammer kommt eine besondere Bedeutung zu. Zwei unterschiedliche Strategien wurden erprobt:

- Einbindung des Sensors in das Einspritzsystem mit direktem optischen Zugang zur Flamme. Die Kühlung wird von der Kerosineinspritzung übernommen.
- Platzierung des Sensors auf dem Druckgehäuse mit indirektem optischen Zugang über Perforationslöcher im Liner. Eine autonome Kühlung ist vorhanden.

Der Vorteil an der Positionierung des Sensors direkt im Einspritzsystem ist der Kühleffekt des vorbeifließenden Treibstoffes. Nachteilig daran ist, dass dieser Effekt nur bei laufendem System auftritt, bei Stillstand (Pumpe ist außer Betrieb und kann weder Treibstoff noch Kühlluft fördern) ist die Sonde der direkten Hitze des Brennraumes ausgesetzt die durch Wärmestrahlung der einzelnen Bauteile auftritt und durch die fehlende Kühlung des gesamten Brenners verstärkt wird. Bereits 2017 wurde ein Artikel bei der ASME Turbo Expo in Charlotte, North Carolina vorgestellt, wo die genauen Versuchsaufbauten erörtert sind und erste Ergebnisse veröffentlicht wurden [1].

Es ist eine experimentelle und numerische Studie im Rahmen des Projektes angedacht, um eine Funktionsanalyse der Sonde durchführen zu können. Dabei wird getestet, ob richtig gezündet wird, die Kühlung wird optimiert und die Sonde wird unter realistischen Betriebsbedingungen validiert. Aufgrund des aufgenommenen Lärm- und Lichtniveaus kann eine Charakterisierung der Betriebspunkte gemacht werden und durch Erzeugung von künstlichen Instabilitäten wird analysiert, ob diese durch die Sensorik sichtbar gemacht werden können oder nicht. Es wird gleichzeitig beobachtet, ob Rußbildung stattfindet. Dazu ist eine selektive Analyse der Wellenlänge im IR-Bereich angedacht und der UV Bereich wird dabei ausgespart. Es notwendig eine Testzelle zu entwerfen, die den realen Bedingungen schon relativ nahe kommt. Das Design wird nachfolgend beschrieben. Zwei unterschiedliche Sondentypen werden im Rahmen des Projektes entworfen: Ein Prototyp, der für die Labortests herangezogen wird (wesentlich mehr Funktionen werden hier enthalten sein um möglichst viele Informationen aus der Brennkammer zu erhalten) und eine kleine Serie, die schon speziell an die Kundenwünsche angepasst wird. Hier werden nur mehr die gewünschten Informationen aus dem Brennraum ausgelesen.

## 2.1 Beschreibung der Rayleigh Kriterium Sonde

Der Name der Sonde kommt von der gleichnamigen Kennzahl, mit der man die Entstehung von Verbrennungsinstabilitäten beurteilen kann und die ihren Ursprung in der Thermoakustik hat [5],[6]. Diese Sonde besteht aus einer Fotodiode, einem Schnelldrucksensor, einem Glasrohr und einer Leiterplatine. Das Glasrohr wird von einem Kühlmedium durchflossen. Das kann entweder Luft oder auch frischer Treibstoff sein. Zum jetzigen Entwicklungsstand ist eine luftgekühlte Variante verfügbar. An der Flüssigkeitsgekühlten Sonde wird gerade gearbeitet. Die Leiterplatine ist genau mittig vom Glasröhrchen platziert und teilt dieses in zwei Abschnitte. Die Kühlluft tritt auf einer Seite ein, wird an der Sondenspitze umgelenkt und fließt auf der anderen Seite wieder ab. Eine Temperatur von 125°C ist für die

empfindlichen Teile maximal zulässig. Das Bauteil, das den höchsten Temperaturen ausgesetzt ist, ist der Schnelldruckmessaufnehmer, der sich in der Sondenspitze befindet. Die maximal erlaubte Temperatur für Dauerversuche liegt bei 80°C. Die notwendige Kühlleistung für die Sonde liegt bei ca. 10 W.

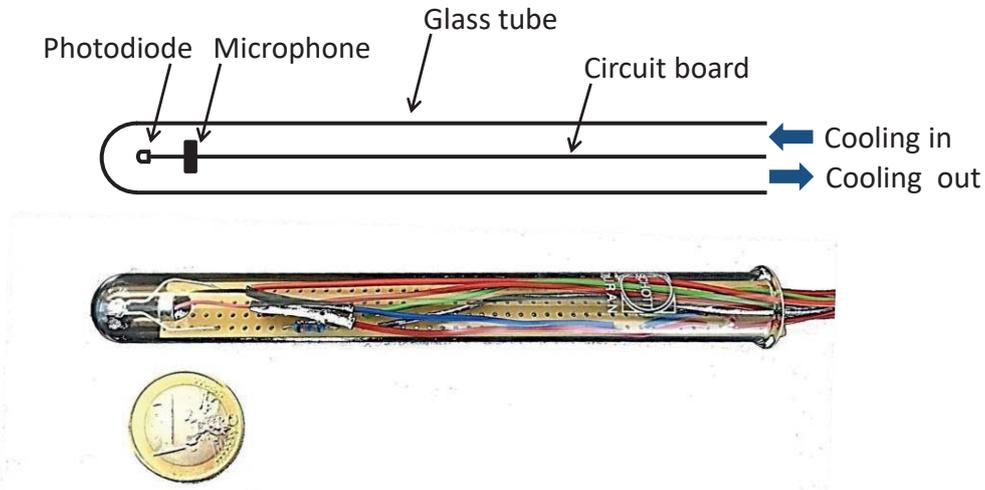
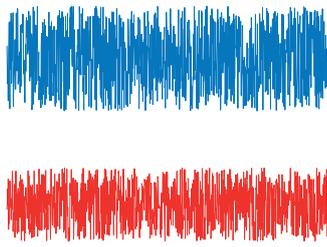
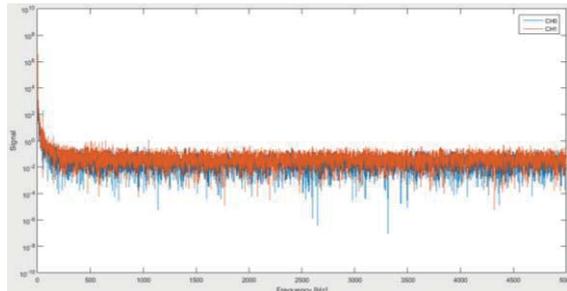


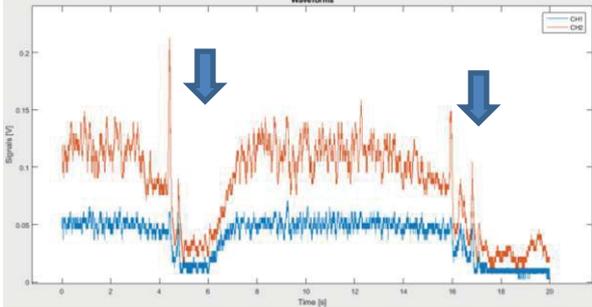
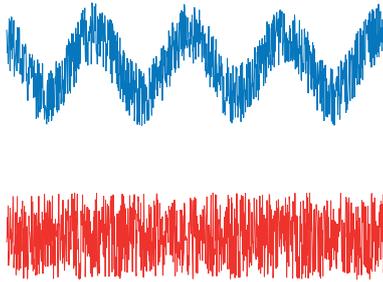
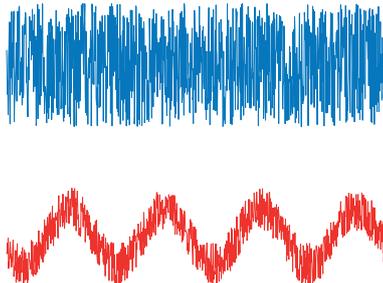
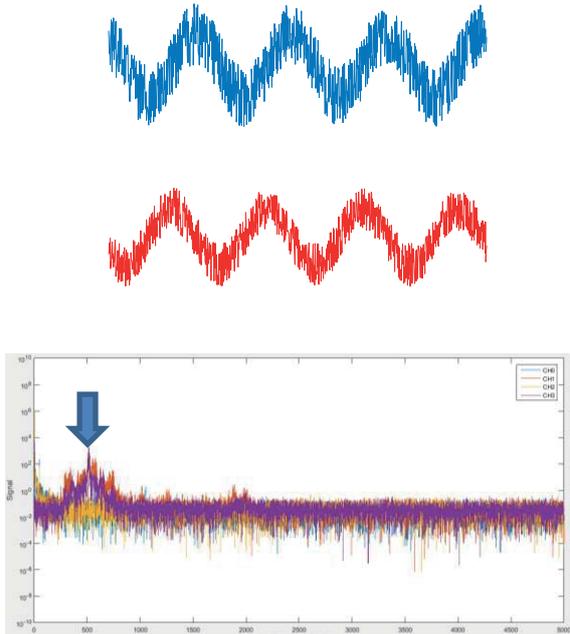
Abb. 2: Rayleigh-Kriterium Sondenkonzept

Die untenstehende Tabelle beschreibt die Funktionsweise der Sonde im Detail. Es wird unterschieden in Normalbetrieb des Brenners, Funktionsstörung, unkorrelierter Lärm, Lichtfluktuation und korrelierte Signale. Wenn Geräusche gemeinsam mit dem Lichtsignal am gleichen Ort aufgenommen werden, kann man sicherstellen, ob die Muster, die vom Signal zu sehen sind mit einer Verbrennungsinstabilität zu tun haben (Korrelation beider Signale) oder Scheinphänomene darstellen (keine Korrelation, z.B. Kühlluft bläst auf die Sonde)

Tabelle 1: Funktionsweise der Sonde im Normalbetrieb

<p><b>Normalbetrieb</b></p> <p>Die Sonden melden ein stochastisches Geräusch. Die Flamme ist natürlich turbulent.</p> <p>Die Wellenform zeigt keine erkennbare Periodizität, was gleichzeitig im Spektrum beobachtet werden kann.</p> <p><u>Der Grundpegel beider Signale zeigt, ob eine Flamme anwesend ist, oder nicht.</u></p> <p>Als Funktion des Grundpegels bekommt man eine Information über</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Die Präsenz einer Flamme</u></li> <li>• <u>Den Betriebszustand, von Teillast zu Volllast (die Beziehung ist linear für die Diode, und logarithmisch für den Schall)</u></li> </ul>	<p style="text-align: center;">GERÄUSCH SIGNAL und LICHT SIGNAL</p>  
--	---

**Tabelle 2: Funktionsweise der Sonde bei Störungen**

<p><b>Störungen</b></p> <p>Hier sieht man beispielsweise einen Flammenrückschlag (eigentlich zwei), wobei die Flamme selbst im Brenner gewandert ist. Dies signalisiert kein positives Phänomen, und kann mittels der Sonde detektiert werden.</p>	
<p><b>Unkorrelierter Lärm</b></p> <p>Der Lärm kommt aus einer anderen Quelle als die Flamme. Es könnte sich zum Beispiel um Geräusche aus unmittelbarer Nähe der Sonde handeln, die mit der Luftströmung zu tun haben.</p>	
<p><b>Lichtfluktuation, aber dafür kein Lärm bei der gleichen Frequenz</b></p> <p>Es besteht die Möglichkeit, dass die Flamme flackert (z.B. sich an der Löschgrenze befindet), oder dass ein Brenner nicht korrekt arbeitet.</p>	
<p><b>Korrelierte Signale:</b>  <b>Achtung Verbrennungsinstabilität!!!</b>  <b>Oder effektive pulsierte Verbrennung !!!</b></p> <p>Beide Signale melden eine Periodizität bei der gleichen Frequenz -&gt; die Quelle des Lärms und der Lichtintensitätsfluktuation soll die Flamme selbst sein.</p> <p>Wichtig zu messen sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die gemeinsame Frequenz</li> <li>• Die Amplituden von jedem Signal bei dieser Frequenz (mit Hilfe des Amplituden-Spektrums)</li> <li>• Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen</li> </ul>	

## 2.2 Beschreibung der Testzelle

Die Testzelle ist ein modular aufgebautes Brennermodul bestehend aus einem Plenum, in dem die Reaktanten Treibstoff und Luft zusammengeführt sind, dem Brennergehäuse inkl. Sichtzugang zur Brennkammer, zwei Sensorplatten, an den insgesamt 8 Sensoren befestigt werden können, und zwei Luftanschlüssen. Die Sensorplatten sind dabei so gestaltet, dass sie ohne Probleme gegen ein weiteres Sichtglas getauscht werden können. Die Positionierung der Sensoren erfolgt dabei so nahe wie möglich an der Strömung. Das Plenum ist ein simples, genormtes T-Rohr mit Losflanschen oben, unten und frontal. Innerhalb des Plenums gibt es ein Modul zur Vormischung von Treibstoff und Luft und der Luftführung zur Kühlung der gesamten Zelle. Innerhalb des Brennergehäuses befinden sich das Einspritzmodul und der Brenner sowie ein Glasrohr, das über die Flamme gestülpt ist und durch die vorbeifließende Luft gekühlt wird. Am Ende des Brennergehäuses befindet sich eine Düse aus Keramik um den Druck in der Zelle zu erhalten.

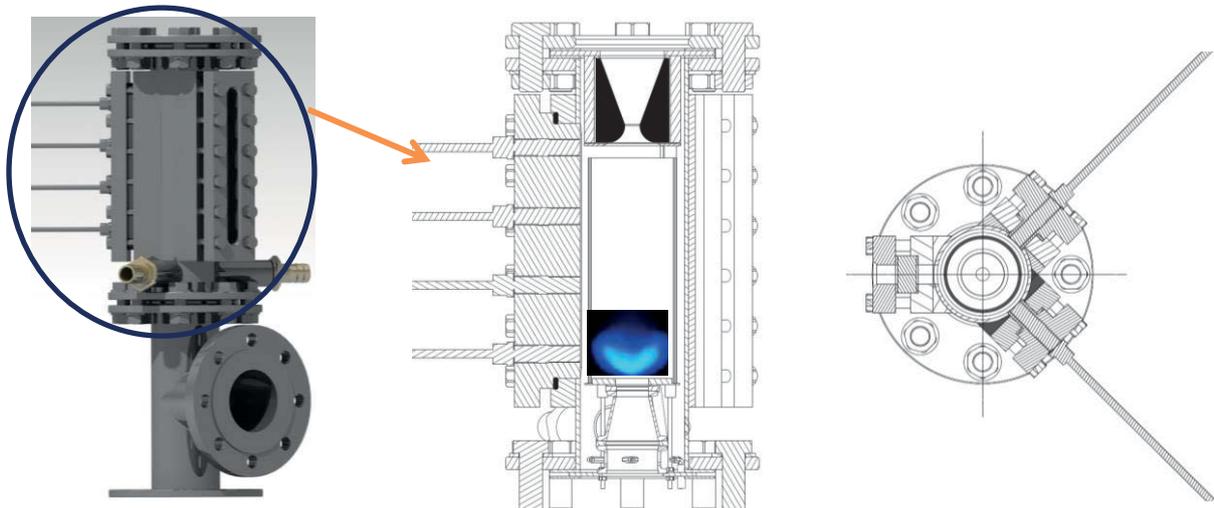


Abb. 3. Testzelle für Hochdrucktests mit gasförmigen Treibstoff.  
Links: Aufbau. Rechts: Detail des Brennraums

In Abbildung 4 ist das 2-stufige monolithische Brennermodul dargestellt. Die erste Stufe besteht aus einem Pilotbrenner, der mit vorgemischtem Gas betrieben wird und die zweite Stufe aus einem Brennermodul. 20% der maximalen Leistung wird dabei vom Pilotbrenner benötigt und der Rest vom Hauptbrenner. Der Einspritzring wird aus Inconel 718 3D-gedrukt. Über die Leitung am Einspritzring wird der Treibstoff über kleinste Bohrungen im Innenraum des Brenners verteilt, versprüht. Die Zündung erfolgt an der Fläche ganz oben.

Hochdruck- und Hochtemperaturtests werden mit dieser Testzelle durchgeführt. In Tabelle 3 sind die Betriebspunkte der Testzelle dargestellt, die getestet werden.

Tabelle 3: Betriebspunkte der Testzelle

		atmo	1 bar	3 bar
Leistung	[kW]	2,68	5,35	10,70
Luft	[NI/min]	382	765	1530
Erdgas	[NI/min]	1,94	3,87	7,74

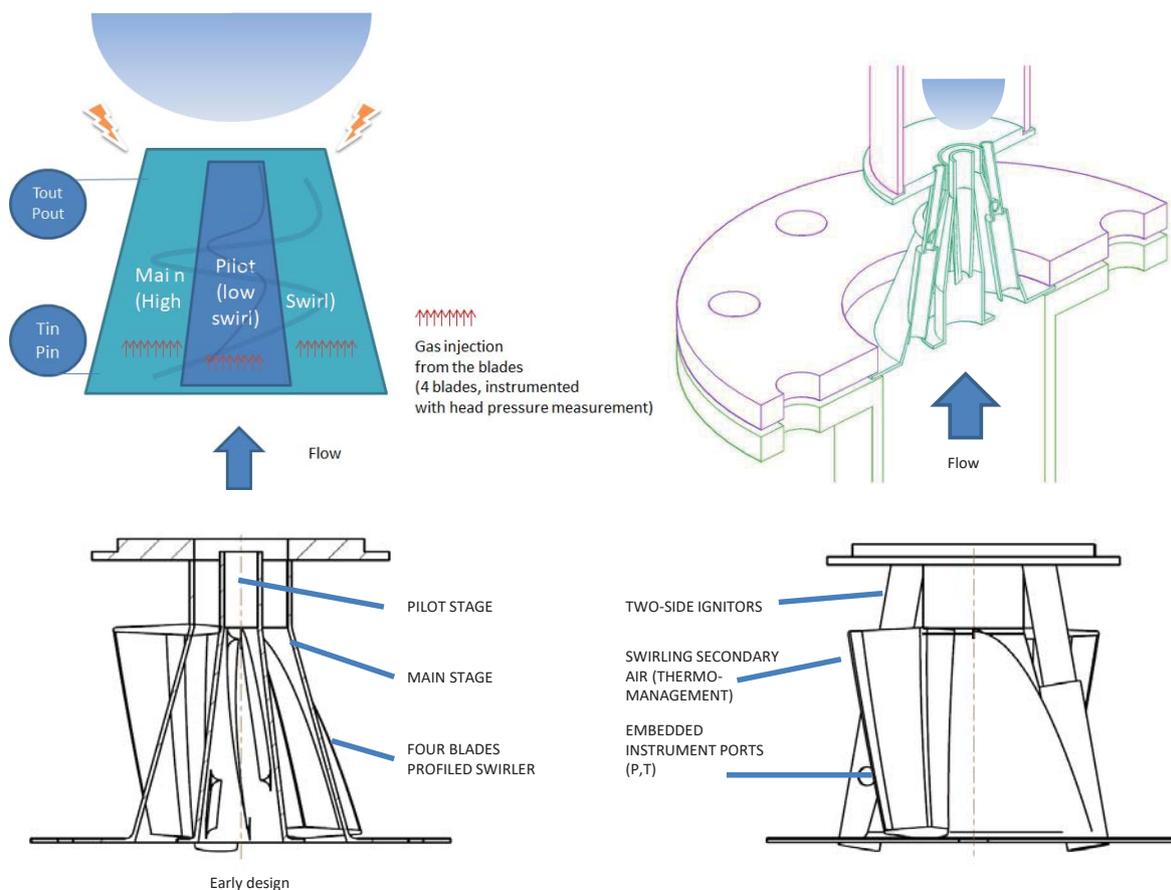


Abb. 4: Monolithisches Brennermodul, oben: Prinzipskizze und Positionierung in der Brennkammer. Unten: Details der Brennerfunktionen

### 2.2.1 Zündsystem

Aus voran gegangenen Projekten ist bekannt, dass ein geeignetes Zündsystem sehr wichtig ist und ein funkgesteuertes System zu sehr häufigen Fehlzündungen führen kann. Um bei der Zündung keine elektromagnetische Störung durch Funksignale zu erhalten, wird hier die Zündung über Glühkerzen vorgenommen. Dabei wird eine Vormischung des Gas-Luft-Gemisches vorgenommen und dieses in ein Glasrohr gemeinsam mit einer Glühkerze eingebracht und dort entzündet. Dies wird als „sanfte“ Zündung bezeichnet und vermeidet Fehlzündungen durch unkontrollierten Funkenflug und Detonationen während des Zündungsvorganges.

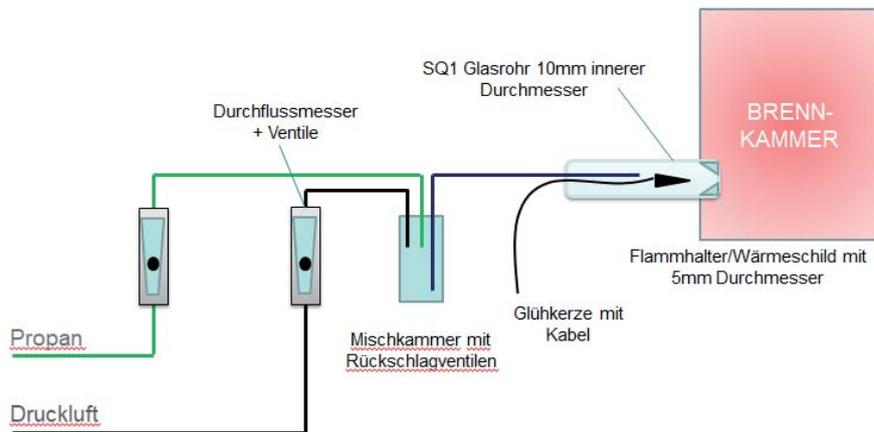


Abb. 5: Prinzipdarstellung des Zündverfahrens

Das in Abbildung 6 dargestellte Modul wird in der Hochdruck-Testanlage eingebaut. Damit eine erfolgreiche Zündung gewährleistet werden kann, ist dieses System redundant mit zwei Glühkerzen gestaltet.

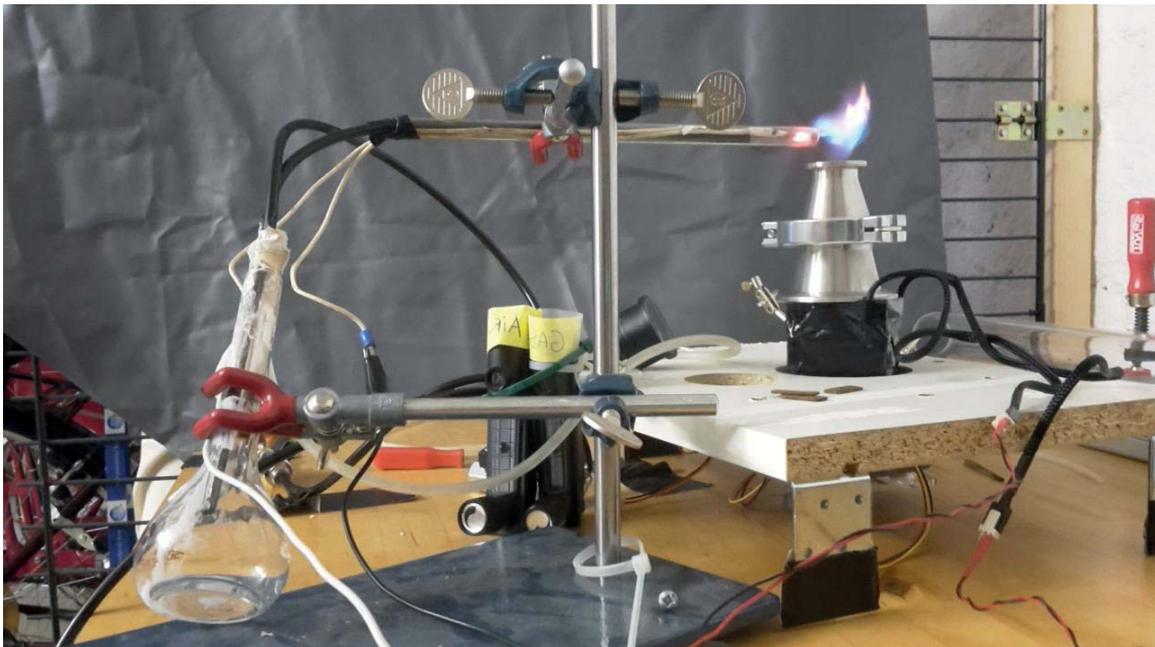


Abb. 6: Versuchsaufbau für die Erprobung des Zündverfahrens

### 3 Erste Ergebnisse

Hauptziel des Projektes war es analysieren zu können, ob eine Zündung stattgefunden hat und wie die Verbrennung im Detail aussieht. Durch den Einsatz von zumindest drei Sonden entlang der Brennkammer können alle in der Einleitung erwähnten Fragen beantwortet werden und über die miniaturisierte Messstrecke Verbrennungsparameter optimiert werden, sodass ein optimales Verbrennungsergebnis gewährleistet werden kann. Abbildung 7 zeigt

die Messung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei dem links gezeigten Versuchsaufbau. Die Flamme startet bei dem Zünder und breitet sich entlang der Brennkammer aus. Vier Aufnahmen über 20s sind gezeigt. Die dritte Sonde ist noch zusätzlich mit einer Schnelldrucksonde ausgestattet (die typische Rayleigh-Kriterium Sonde). Die Zeitsprünge zwischen den auftretenden Spitzen der Sensoren werden herangezogen um die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu berechnen. In diesem Fall beträgt diese Geschwindigkeit 1,3 m/s bei einem Luft-zu-Propangas Verhältnis von 0,8. Die Darstellung rechts ganz unten in Abbildung 7 zeigt die Rückmeldung des Mikrofons beim Auftreten einer Flamme.

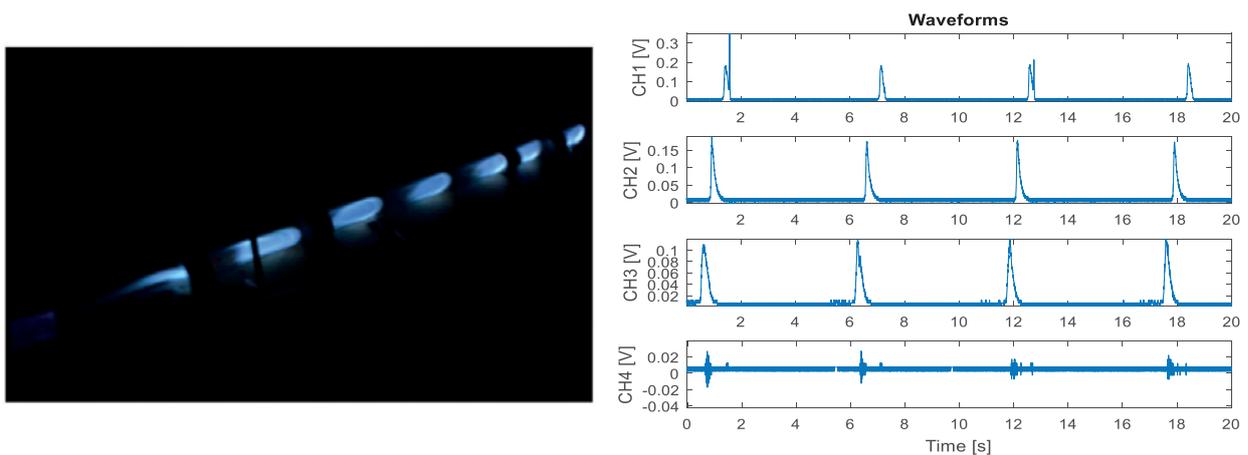


Abb. 7: Detektion der bewegten Flammenfront und Messung der Flammengeschwindigkeit

Die schematische Darstellung des Sondenkonzepts in Abbildung 8 zeigt die optimale Anordnung, um eine präzise Rückmeldung über Zündung und Verbrennung aus der Brennkammer zu geben. Durch den Einsatz von drei Sensoren kann eine Redundanz gewährleistet werden, falls aus irgendeinem Grund eine Sonde ausfallen sollte, zum anderen kann die Bewegung der Flamme beurteilt werden. Idealerweise spricht zuerst die Sonde Nr. 1 und - dann Nr. 2 und am Ende Nr. 3 an. Wenn beispielsweise Sonde Nr. 1 und dann Nr.3 ansprechen kann man davon ausgehen, dass entweder ein Defekt der Sonden vorliegt oder die Verbrennung nicht optimal war und die Flamme in der Brennkammer gewandert ist. Wenn von Sonde Nr. 1 zu Sonde Nr. 2 ein Flackern auftritt, weiß man genauso, dass die Verbrennung instabil ist und Handlungsbedarf besteht.

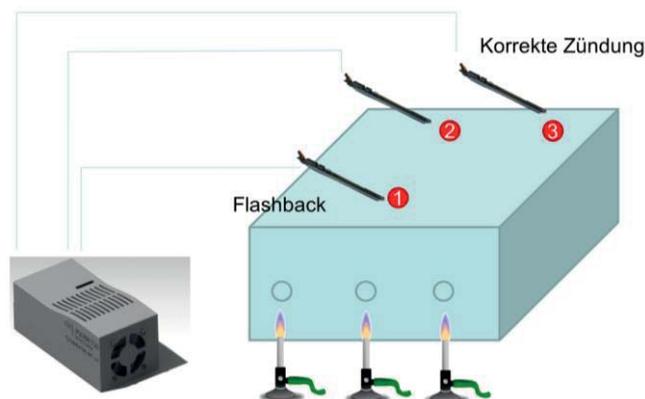


Abb. 8: Schematische Darstellung des Sondenkonzepts für einen industriellen Brennraum

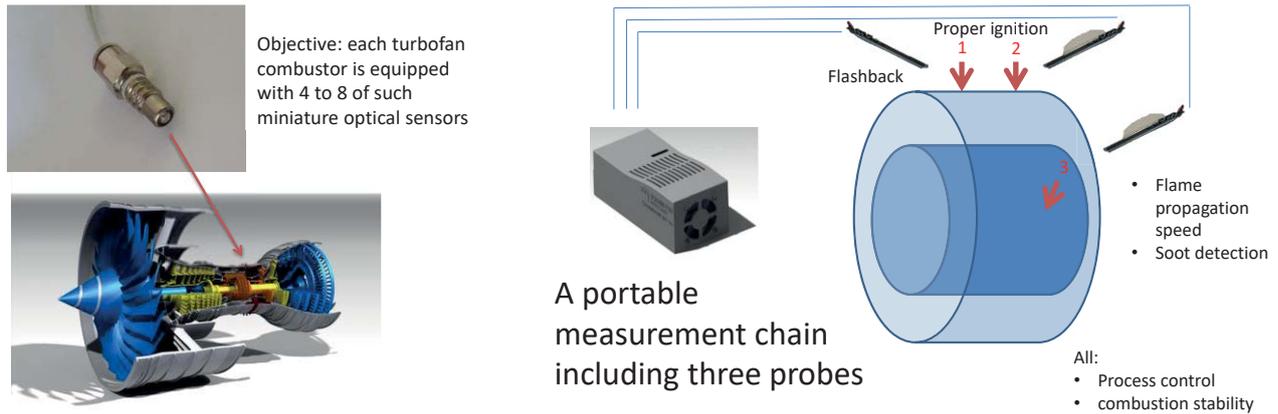


Abb. 9: Von der Idee bis zur tragbaren Messkette für eine präzise Verbrennungsüberwachung durch Kombination einer optischen und akustisch sensitiven Messtechnik

## 4 Zusammenfassung

Einen Blick in die Brennkammer zu werfen zu wollen ist zum jetzigen Stand der Technik nichts Neues und wird vonseiten der Betreiber und Hersteller gefordert. Durch das bessere Verstehen der Vorgänge innerhalb von großen Brennkesseln oder Triebwerken können bessere Aussagen zum Verschleiß von stark beanspruchten Bauteilen innerhalb dieser Strukturen getroffen werden. Gerade in der Luftfahrt kann so eine Anpassung der Wartungsintervalle erreicht werden, die ansonsten aufgrund der Sicherheitsbestimmungen sehr engmaschig gesetzt werden. Durch die bessere Steuerbarkeit der Verbrennung durch die Rückmeldung in Echtzeit aus der Brennkammer, können die Verbrennungsparameter wie Treibstoff- und Luftmenge so gesteuert werden, sodass zum Einen ein geringerer Treibstoffverbrauch eingestellt werden kann und zum Anderen die Emissionen reduziert werden können. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es bereits vielversprechende Forschungsergebnisse: Eine luftgekühlte Sonde inklusive einer portablen Messkette für bodennahe Anwendungen steht bereits zur Verfügung. Es wird noch an einer wassergekühlten und Wellenlänge-angepassten Sonde für industrielle Gasturbinen und Triebwerke gearbeitet. Diese Sonde soll unter anderem durch eine Datenerfassung im Infrarotbereich auch Rußbildung analysieren können durch die Analyse im Infraroten Bereich. In Abbildung 10 ist eine Sondenform mit Faser für den Lichttransport von der Brennkammer zum Sensor dargestellt. Die in Abbildung 11 dargestellte Sonde wurde bereits fertig gestellt und getestet, und steht zur Verfügung für Industrieanwendungen. Das Design der flüssiggekühlten Sonde wird in Abbildung 12 dargestellt. Eine Konstruktionsvariante erlaubt es, mehrere Wellenlängen gleichzeitig zu überwachen, und verschiedene qualitative Analysen gleichzeitig durchführen zu können (z.B. Rußbildungsüberwachung). Im Idealfall wird diese Sonde zu einer Standardmesstechnik, die in 15 Jahren auf operativen Triebwerken fliegen wird.

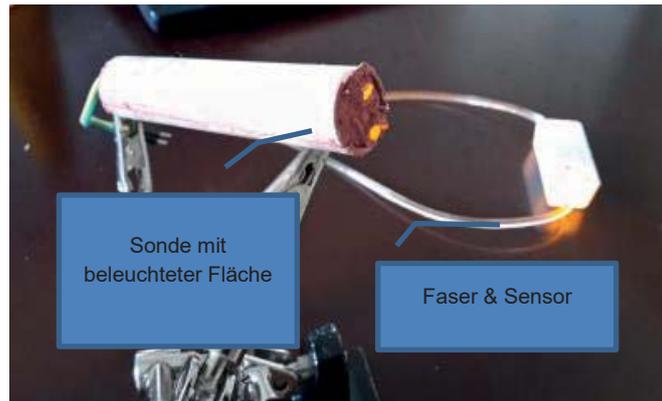


Abb. 10: Konzept mit Faser für den Transport des Lichtes bis zum Sensor

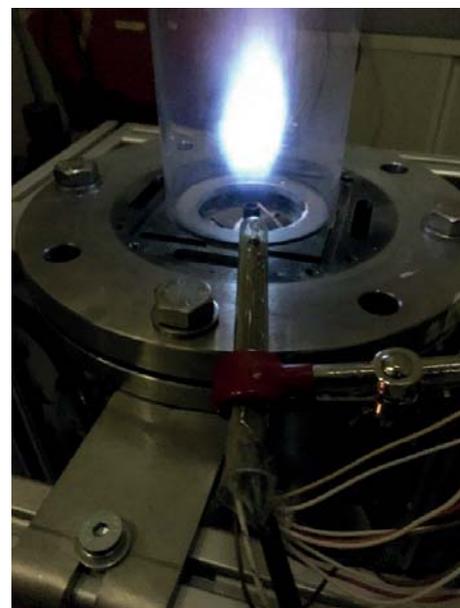


Abb. 11: Sondensystem und Liner im atmosphärischen Zustand (Luft-gekühlte Variante)

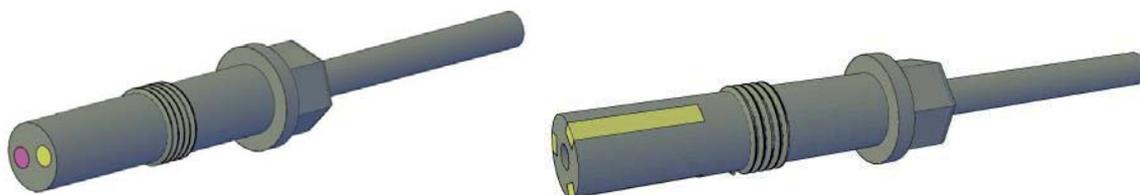


Abb. 12: (Links) Rayleigh Criterion Sonde mit hochtemperaturresistenten Schnelldrucksonde und Fotodiode, (Rechts) Rayleigh Criterion Sonde mit IR Sensor (Ruß), UV Sensor (Flamme), Sensor für gesamten Sichtbereich und Schnelldrucksonde

## 5 Danksagung

Die Firma Combustion Bay One e.U hat dieses Projekt gemeinsam mit der FH-Joanneum (Institut Luftfahrt) initiiert und realisiert und wurde finanziell durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und das Bundesministerium für Transport, Innovation und Technologie (BMVIT) unterstützt. Der Akronym „emootion“ bedeutet „Engine health MONitOring and refined combusTION control based on optical diagnostic techniques embedded in the combustor,“ (VertragsNr. 850470). An dieser Stelle möchten wir uns bei den oben genannten Stellen für ihre finanzielle Unterstützung bedanken.

## 6 Referenzen

- [1] Kraft, G. E., Giuliani, F., Pfefferkorn, L., Paulitsch, N., Andracher, L., „*Heat Resistant Probe Combining Optic and Acoustic Sensors for Advanced Combustion Monitoring Including Detection of Flame Instabilities*“. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017, Charlotte, North Carolina. GT 2017-63626
- [2] ICAO Annex 16 "International standards and recommended practices, Environmental protection", Volume II "Aircraft engine emissions", 3rd ed. (2008) plus amendments
- [3] ICAO Engine Exhaust Emissions Databank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646- AN/943
- [4] Leitgeb, T., Schuller, T., Durox, D., Giuliani, F., Köberl, S., Woisetschläger, J., „*Interferometric determination of heat release rate in a pulsated flame*“. Combustion and Flame, Vol. 160 (3) , pp. 589-600.
- [5] Rayleigh, J., 1875. The Theory of Sound, Vol. 2, Dover, N.Y.C. (2d edition 1945)
- [6] Putnam, A. and Dennis, W., 1953. "A study of burner oscillations of the organ-pipe type". Trans ASME, 75(1), pp. 15-28.