

## **Zweidimensionale Konzentrations- und Temperaturmessungen in einem technisch relevanten Pulsationsreaktor mittels OH-LIF**

**S. Großgebauer<sup>1</sup>, M. Beckmann<sup>1</sup>, D. Müller<sup>2</sup>, V. Wagner<sup>2</sup>, A. Burkert<sup>2</sup>,  
W. Triebel<sup>2</sup>, H. Stafast<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Bauhaus Universität Weimar, Lehrstuhl Verfahren und Umwelt, Coudraystr. 11C, 99423 Weimar

<sup>2</sup>Institut für Photonische Technologien, Abt. Laserdiagnostik, Albert-Einstein-Str. 9, 07745 Jena

### **Kurzfassung**

In einem Pulsationsreaktor aus Quarzglas mit Helmholtz-Resonator-Form und vertikaler Strömungsrichtung wurden zweidimensionale Laserinduzierte Fluoreszenzmessungen (2D-LIF) von OH durchgeführt. Die druckabhängigen 2D-LIF Messungen erfolgten mit einem schmalbandigen, durchstimmbaren KrF-Laser, dessen Strahl durch eine Linsenkombination zu einem ca. 40 mm hohen vertikalen Lichtschnitt geformt und durch den Reaktor geführt wurde. Die in dieser Schnittebene angeregte Fluoreszenz wurde senkrecht dazu mit Hilfe einer intensivierten CCD-Kamera registriert. Zur Bestimmung druckabhängiger OH-Verteilungen diente der im Reaktor gemessene Druck als Parameter für die LIF-Messungen, wobei eine Aufnahmefrequenz von ca. 10-15 Hz realisiert wurde. Variiert wurden Gas- und Luftmenge sowie die Anordnung der Gassonde in der Brennkammer, was zur Beeinflussung des Brennstoff-Luft-Mischungsvorganges, der Pulsationsfrequenz und der Druckamplitude führt. Mit Hilfe der registrierten OH-Verteilungen können Aussagen über das Brennverhalten (Flammenfront, Zündung) sowie die Temperaturverteilung in der Brennkammer gewonnen werden.

### **1. Einleitung und Zielstellung**

Bei dem Verbrennungsprozess in einem Pulsationsreaktor (PR) handelt es sich um eine Gleichraumverbrennung bei der die Energiefreisetzung mit einer selbst erregten periodisch wiederholten Schwingung der Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit) überlagert ist (auch so genannte pulsierende Verbrennung).

Die Verbrennung in einem Pulsationsreaktor basiert auf dem Verbrennungsprinzip des Schmidt-Rohres. Unter bestimmten Randbedingungen wird durch den Verbrennungsprozess die akustische Eigenfrequenz des Brennraumes angeregt. Die so entstehenden Druckschwingungen erzeugen eine periodische Luft- bzw. Brennstoff/Luft-Zufuhr in den Brennraum, was zu einer periodischen sogenannten selbsttätigen pulsierenden Verbrennung führt. Unterschiede der pulsierenden Verbrennung im Vergleich zu stationären Gleichdruck-Verbrennungsprozessen sind im Wesentlichen eine höhere Brennraumbelastung, die Inten-

sivierung des konvektiven und diffusiven Stoff- und Wärmetransportes, der Ablauf eines selbstansaugenden Verbrennungsprozesses (teilweise Umwandlung der Brennstoffenergie in Arbeit), jedoch auch eine höhere Lärmbelastung und ein erhöhter Verschleiß durch stärkere Materialbeanspruchung. Die Erhöhung des konvektiven Wärme- und Stofftransportes wird hierbei durch eine gesteigerte Turbulenz sowie den diffusiven Wärme- und Stofftransporten durch eine verringerte Grenzschichtdicke bzw. einen periodischen Auf- und Abbau der Grenzschicht infolge einer mit der Druckschwingung einhergehenden Schwingung der Gasgeschwindigkeit hervorgerufen.

Komplexe Zusammenhänge zwischen Akustik, chemischer Reaktionskinetik des Verbrennungsprozesses und instationären Strömungsvorgängen haben Einfluss auf die Betriebsweise (Druckamplitude und Frequenz) sowie auf die Stabilität der pulsierenden Verbrennung. Die meisten Erkenntnisse wurden daher im „trail and error“ Verfahren gewonnen.

Bisher wurden eine Vielzahl von Untersuchungen an selbsttätig pulsierenden Brennern durchgeführt, deren Hintergrund vorwiegend die Anwendung zur Wärmeübertragung war [1], [2], [3], [4]. In Zusammenhang mit Stoffübertragungsvorgängen innerhalb des Reaktors, mit denen die Notwendigkeit größerer geometrischer Apparateabmessungen verbunden ist, gibt es verhältnismäßig wenig Untersuchungen. Daher besteht noch Forschungsbedarf zur Klärung von Stoffumwandlungsprozessen in großen Pulsationsreaktoren.

Neben der messtechnischen Erfassung der Druckschwingung in der Brennkammer und der mittleren Temperatur an verschiedenen Stellen innerhalb des Brenners wurden Laserinduzierte Fluoreszenzmessungen (LIF) von bei der Verbrennung entstehenden OH-Radikalen durchgeführt [5], [6], [7]. Diese messtechnischen Untersuchungen dienen in Verbindung mit der Bestimmung relevanter Einflussfaktoren der Haupteinflussgrößen (vor allem Druckamplitude und Schwingungsfrequenz) dem weiteren Verständnis zu Zündmechanismus, Zündzeitpunkt in Relation zur Druckschwingung, Zündposition und Flammenausbreitung sowie zur Ermittlung der Temperaturverteilung in der Brennkammer.

## **2. Experimenteller Aufbau**

Für die laserdiagnostischen Untersuchungen wurde ein Pulsationsreaktor mit Helmholtz-Resonator-Form und vertikaler Strömungsrichtung aufgebaut. Die zylindrischen Wände des Brennkammer- und des Resonanzrohres bestehen aus Quarzglas. Für die LIF-Messungen in der Brennkammer wurden Fenster optischer Güte in den Glaszylinder eingeklebt. Der Pulsationsreaktor (schematisch in Bild 1) setzt sich aus einer Vorkammer, dem Ventilboden, der Brennkammer und dem Resonanzrohr zusammen. Die Vorkammer ist von der Brennkammer durch die Ventilplatte mit Aerodynamischen Ventilen getrennt. An die Brennkammer schließt

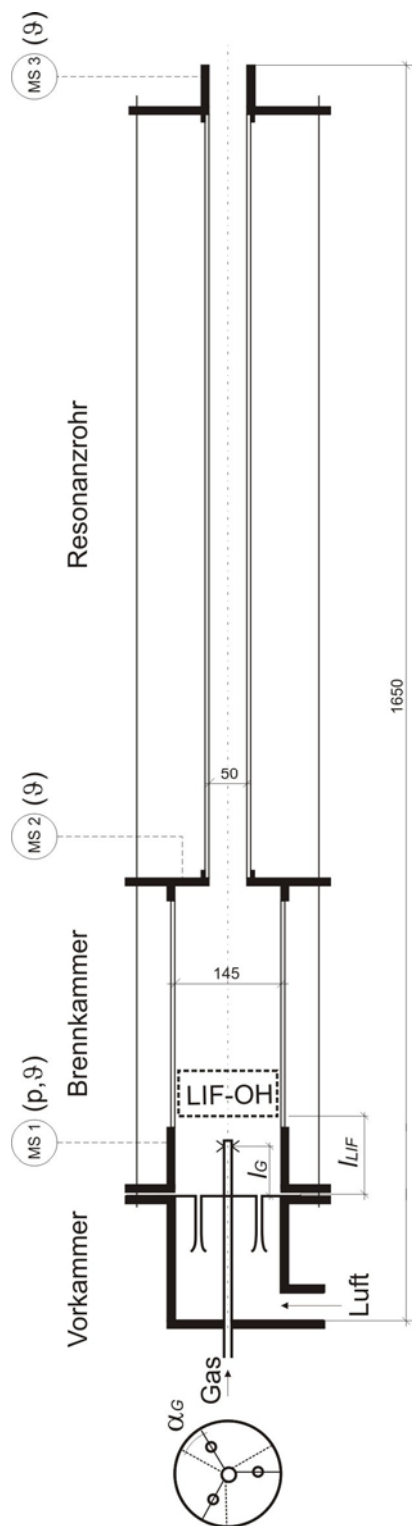


Bild 1: Schemazeichnung Modell Pulsationsreaktor.

sich das Resonanzrohr an. In der Ventilplatte sind drei Aerodynamische Ventile senkrecht angeordnet, die in die Vorkammer ragen, wodurch sich ein axialer Lufteintrag in die Brennkammer ergibt. Das Brenngas (komprimiertes Methan 2,5) wird über eine Gaslanze der Brennkammer zentral zugeführt. Am Ende der Lanze sind drei Austrittsdüsen auf dem Zylindermantel angeordnet. Die Versuchsanlage ist mit der für die Versuchsdurchführung erforderlichen Messtechnik (Volumenstrom, Druck, Temperatur) ausgerüstet.

Für die Druckmessung wurden piezoresistive Drucktransmitter (wassergekühlt) der Fa. Keller, Winterthur (Modell PR25 mit frontbündiger Membran und einer Abtastrate von 5 kHz, kalibriert für den Bereich  $\pm 200$  mbar) eingesetzt. Die Temperaturmessung erfolgte mit handelsüblichen NiCr-Ni Thermoelementen. Für die 2D-LIF Messungen wurde ein schmalbandiger, durchstimmbarer KrF-Laser (Compex 150T, Lambda Physik) verwendet, dessen Laserstrahl durch eine Linsenkombination zu einem ca. 40 mm hohen vertikalen Lichtschnitt geformt wurde. Dieser Lichtschnitt (siehe Rechteck mit punktierter Umrandung in Bild 1) wurde oberhalb der Gaslanze so durch die Mittelebene des Reaktors geführt, dass der Lichtschnitt über einem der Aerodynamischen Ventile liegt und die Fluoreszenzmesstechnik somit den Einfluss des pulsierenden Freistrahls der Luftzufuhr erfassen konnte (rechte Seite in der Schnittebene, die linke Seite der Schnittebene liegt demzufolge genau zwischen zwei Ventilen). Die in dieser Schnittebene angeregte Fluoreszenz der OH-Radikale wurde senkrecht dazu mit Hilfe einer intensivierten CCD-Kamera registriert. Bei der Bestimmung der OH-Verteilungen diente der im Reaktor gemessene Druck als Triggersignal für die Auslösung der LIF-Messung, so dass druckabhängige zweidimensionale Konzentrationsprofile der OH-Radikale ermittelt werden

konnten.

An dem Reaktor des Versuchsstandes können verschiedene betriebliche (Gas- und Luftmenge) und konstruktive Parameter (Gaszuführung) variiert werden, was zur Beeinflussung des Brennstoff-Luft-Mischungsvorganges und somit eine Veränderung der charakteristischen Größen (Pulsationsfrequenz, Druckamplitude) führt.

### 3. Parametervariationen und Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der in Abschnitt 1. aufgeführten Zielstellungen wurden folgende konstruktive, betriebliche und messtechnische Parameter variiert:

Winkel zwischen Gas- und Luftzufuhr $\alpha_G$	}	konstruktiv
Abstand Gaszufuhr vom Ventilboden $l_G$		
Stöchiometrieverhältnis $\lambda$	}	betrieblich
Gasvolumenstrom (Last) $\dot{V}_G$		
Messhöhe Laserschnitt $l_{LIF}$	—	messtechnisch

Die gesteigerte Turbulenz bei der pulsierenden Verbrennung führt zu starken Fluktuationen der OH-Verteilung und fordert daher eine Mittelung mehrerer Aufnahmen.

Zur Bestimmung der druckabhängigen OH-Verteilung mittels LIF-Messung wurden zehn verschiedene Messdrücke der Druckschwingung festgelegt (siehe Bild 2) und bei diesen Druckmesspunkten jeweils 100 Einzelbilder der angeregten OH-Radikale mittels CCD-Kamera aufgenommen, die anschließend gemittelt wurden. Die Einzelbilder wurden mit einer Aufnahme-frequenz von ca. 10-15 Hz aufgezeichnet (Bild 3). Die 2D-Temperaturverteilung wurde aus den gemittelten OH-Konzentrationsprofilen berechnet, die mit zwei Anregungswellenlängen (OH-Rotationszuständen:  $P_2(8)$ ,  $Q_1(11)$ ) erzeugt wurden.

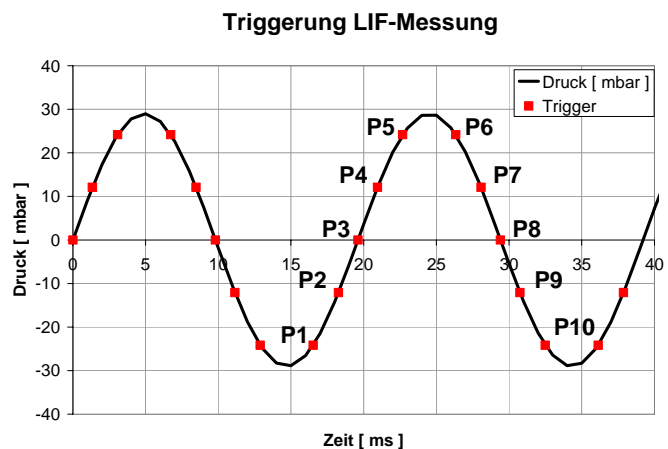


Bild 2: Schematische Darstellung der Druck-Messpunkte für die LIF-Messung.

#### 4. Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Messergebnisse und Diagramme beziehen sich alle auf eine Versuchseinstellung. Für die Auswertung dieser 2D-OH-Verteilungen wurde das Profil der OH-Konzentration der ersten Anregungswellenlänge (P-Übergang) in der horizontalen Mitte der Laserschnittaufnahme (weiße Linie in oberster Aufnahme von Bild 4) für alle Druck-Messpunkte P1 bis P10 ausgegeben (Bild 4).

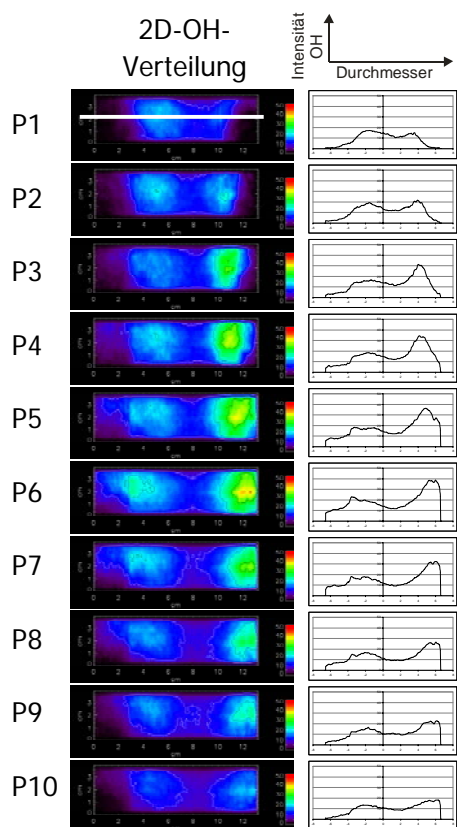


Bild 4: Gemessene druckabhängige 2D-OH-Verteilungen und Profile

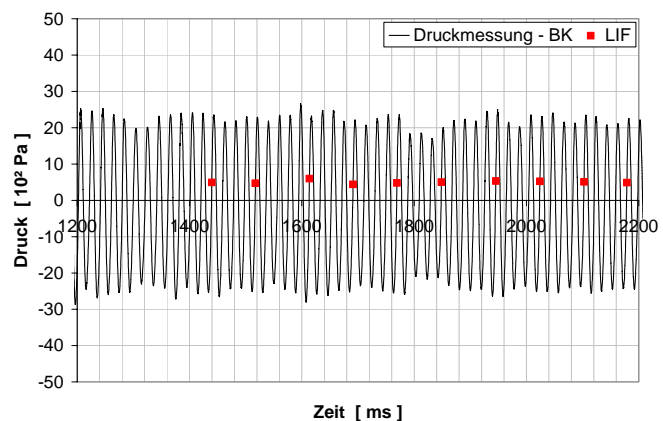


Bild 3: Beispielmessung Druckschwingung mit Einzelaufnahmen der LIF-Messung am Druck-Messpunkt P3.

Aus diesen Profilen wurden sieben Positionen ausgewählt und diese zusammen mit dem Druck über der Zeit aufgetragen. Für den Verlauf der OH-Konzentrationen dieser sieben Positionen über der Zeit wurde eine vereinfachte Regression mit einer Sinusfunktion durchgeführt, um die Phasenverschiebung zwischen OH-Konzentration und Druckverlauf zu bestimmen (Bild 5). Diese Phasenverschiebung lässt Rückschlüsse zur Zündposition innerhalb der Messebene zu.

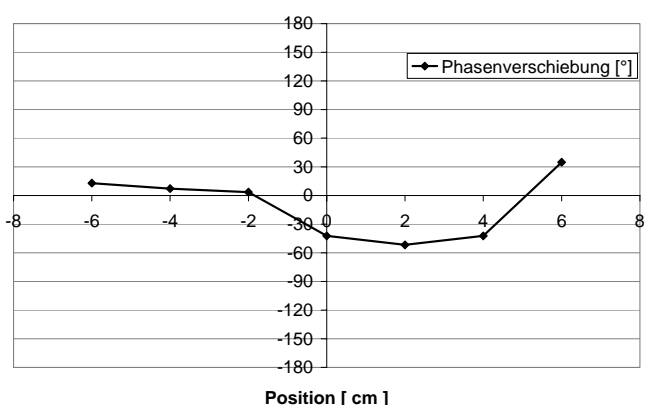


Bild 5: Ermittelte Phasenverschiebung zwischen Druckverlauf und OH-Konzentration..

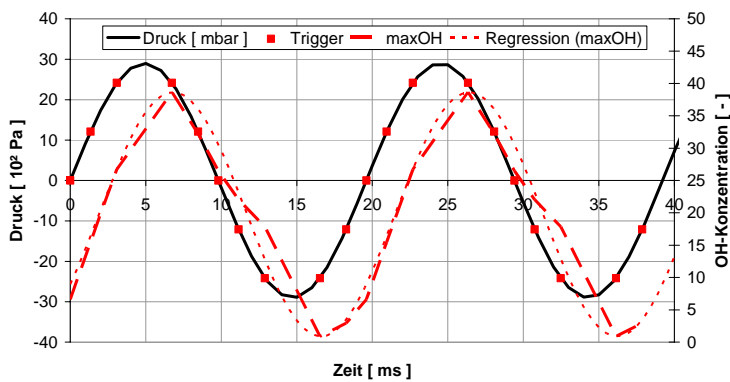


Bild 6: Phasenverschiebung zwischen Druckverlauf und maximaler OH-Konzentration.

Weiterhin wurde die Position der maximalen OH-Konzentration dieser Profile ermittelt und zusammen mit dem Druck über der Zeit aufgetragen. Für den so ermittelten Graphen der druckabhängigen OH-Konzentration wurde ebenfalls zur Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen OH-Konzentration und

Druckverlauf eine vereinfachte Regression mit einer Sinusfunktion durchgeführt (Bild 6). In diesem Fall liegt eine Phasenverschiebung von  $\varphi = 34,9^\circ$  vor, was die Theorie für den Betrieb einer stabilen pulsierenden Verbrennung bestätigt.

Prinzipiell gilt, dass für die Aufrechterhaltung der pulsierenden Verbrennung die Phasenverschiebung  $\varphi$  (s. Bild 7) zwischen Druckschwingung und Energiefreisetzung der Verbrennung im Bereich  $270^\circ < \varphi < 90^\circ$  liegen muss (Rayleigh-Kriterium) [8]. Die größten Druckamplituden werden erreicht, wenn die Schwingung von Druck und Energiefreisetzung in Phase verläuft.

Die Einstellung der Phasenverschiebung ist abhängig von drei charakteristischen Zeiten [9]:

1. Mischungszeit Brennstoff-Luft
2. Mischungszeit frischer Reaktanten mit heißen Restgasen
3. Reaktionszeit der frischen Reaktanten

Diese drei charakteristischen Zeiten müssen für eine stabile pulsierende Betriebsweise auf die akustische Resonanzfrequenz des Reaktors abgestimmt werden, welche vorrangig durch die Geometrie des

Reaktors und der zugehörigen Temperaturverteilung bestimmt wird.

Analog zur Auswertungsroutine der gemittelten OH-LIF-Aufnahmen wurden die daraus berechneten Temperaturbilder ausgewertet (Bild 8). Bei dem Vergleich der Temperaturprofile ist eine Ähnlichkeit der Form der Graphen erkennbar. Die Graphen der Temperaturprofile sind jedoch stärker verrauscht, was auch in der stärkeren Strukturierung der 2D-Temperaturverteilung sichtbar ist. Weiterhin weisen die berechneten Temperaturen an vielen

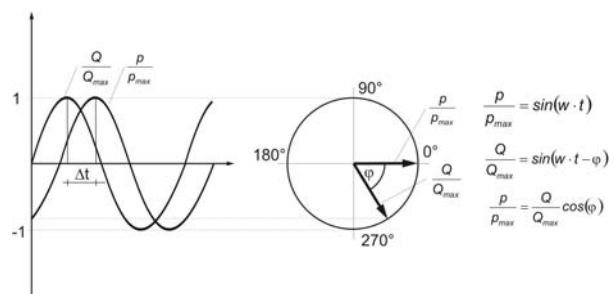


Bild 7: Phasenverschiebung Druck- und Energiefreisetzung.

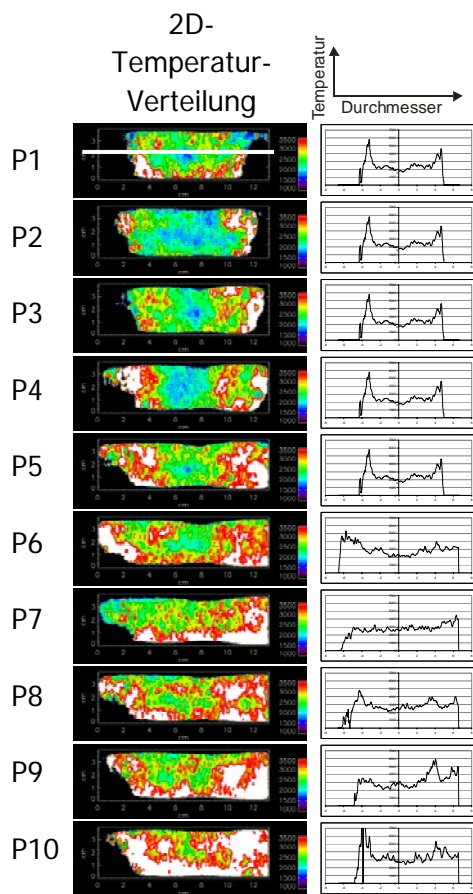


Bild 8: Berechnete druckabhängige 2D-Temperaturverteilung und Profile

trages bestimmt wird.

Ein wichtiger Parameter für die Beurteilung des Verbrennungsprozesses ist die Phasenverschiebung zwischen Schwingung der OH-Konzentration und Druckschwingung, die zur Bestimmung des Zündzeitpunktes herangezogen werden kann. Aufgrund der periodischen Luftzufuhr über die Aerodynamischen Ventile im Brennkammerboden beeinflusst der Zündzeitpunkt die Flammenausbreitung und somit die Reaktionszeit von Brennstoff und Luft. Beim Vergleich der ermittelten Phasenverschiebung zwischen OH-Konzentration und Druckschwingung mit der Abweichung der gemessenen Frequenz von der berechneten Eigenfrequenz ist ersichtlich, dass eine steigende Abweichung der gemessenen Frequenz mit einer größeren Phasenverschiebung, d.h. mit einer früheren Zündung einhergeht. Die Auswertung der gemessenen Druckkurven der einzelnen Versuche ergibt, dass mit steigender Abweichung der gemessenen Frequenz von der berechneten Eigenfrequenz des Brenners in Rich-

Stellen überhöhte Werte auf, Temperaturen über 3500 K werden als weiße Pixel dargestellt. Daher ist eine genauere Kalibrierung und eine stärkere Glättung der Fluktuationen infolge starker Turbulenz erforderlich.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei Einstellung verschiedener konstruktiver und betrieblicher Parameter wurde in verschiedenen Höhen über dem Brennkammerboden die OH-Konzentration in Abhängigkeit des vorherrschenden Druckniveaus innerhalb einer Schwingungsperiode gemessen. Bei allen Versuchen konnte eine Korrelation zwischen der periodischen Änderung der OH-Konzentration in dem betrachteten Lichtschnitt und der Änderung des Druckes beobachtet werden.

Die zweidimensionale druckabhängige Aufzeichnung der OH-Konzentration liefert hierbei Aussagen über die Zündposition, den Zündzeitpunkt sowie die Flammenausbreitung und kann zur Berechnung der Temperaturverteilung in der Messebene herangezogen werden. Aus den Versuchen ist ersichtlich, dass die Zündposition von der Position des Gasein-

tung größerer Frequenzen die Höhe der Druckamplitude abnimmt. Eine frühere Zündung, d.h. das Maximum der OH-Konzentration liegt zeitlich vor dem Maximum der Druckschwingung und führt daher zu einer Verringerung der Druckamplitude.

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente bestätigen somit die Theorie, dass die sich einstellende Druckamplitude und Schwingungsfrequenz maßgeblich durch die Phasenverschiebung zwischen Druck- und Energiefreisetzung bestimmt wird.

Bei den mittels Laserdiagnostik bislang ermittelten, unkalibrierten 2D-Temperaturfelder wurden die zugrunde liegenden OH-LIF-Verteilungen für P- und Q-Übergänge separat gemessen. Für präzisere Temperaturbestimmungen müssen die OH-LIF-Messungen zu beiden Rotationszuständen synchron oder mit hinreichend kleiner Verzögerung erfolgen. Qualitativ ergeben sich hinsichtlich Flammenansatz und -ausbreitung vergleichbare Aussagen wie aus den Konzentrationsprofilen. Die grundsätzliche Tauglichkeit der angepassten Versuchsanordnung und der ausgewählten Laserdiagnostikmethode wurden demonstriert.

## 6. Referenzen

- [1] Zinn, B.T.: Pulsating Combustion. Academic Press Inc. Limited. 1986.
- [2] Dec, J. E.; Keller, J. O.: Pulse Combustor Tail-Pipe Heat-Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean Flow Rate. *Combustion and Flame* 77, S. 359-374, 1989.
- [3] Lundgren, E.; Marksten, U.; Möller, S.-I.: The Enhancement of Heat Transfer in the Tail Pipe of a Pulse Combustor. 27. International Symposium on Combustion, S. 3215-3220, 1998.
- [4] Hanby, V. I.: Convective Heat Transfer in a Gas-Fired Pulsating Combustor. *Transactions of the ASME*, 91, S. 48-52, January 1969.
- [5] Burkert, A.; König, J.; Triebel, W.: First measurement of gas temperatures based on LIF of formaldehyde. *European Low Gravity Research Association, ELGRA News* 22, S. 46-47, 2001.
- [6] Paa, W.; Müller, D.; Stafast, H.; Triebel, W.: Flame turbulences recorded at 1 kHz using planar laser induced fluorescence upon hot band excitation of OH radicals. *Appl. Phys. B*, 2006. DOI:10.1007/s00340-006-2500-y
- [7] Grebner, D.; Müller, D.; Triebel: Fast wavelength switching of narrow-band excimer lasers. *Rev. Sci. Instrum.* 68, S. 2965-2968, 1997.
- [8] Rayleigh, L.: *The Theory of Sound*. Dover, S. 224-235, 1945.
- [9] Barr, P. K.; Keller, J. O.; Bramlette, T. T.; Westbrook, C. K.; Dec, J. E.: Pulse Combustor Modelling, Demonstration of the Importance of the Characteristic Times. *Combustion and Flame*, Heft 3/4, 82, S. 252-269, 1990.