

Phasenkodierte Laser-Doppler-Messungen in instationärer Brennkammerströmung

B. Lehmann, J. Helbig
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Antriebstechnik
Abt. Turbulenzforschung Berlin
Müller-Breslau-str. 8, 10623 Berlin
e-mail: bernhard.lehmann@dlr.de

Abstract

Es wird über druckphasenbezogene Geschwindigkeitsmessungen in einer Modellbrennkammer berichtet, deren Verbrennungsströmung durch einen Zweistrom-Drallbrenner mit einer Leistung von ca. 10 kW durch die Verbrennung von Methan erzeugt wird. Die als Phasenreferenz genutzten Druckschwankungen sind selbsterregt und besitzen eine Frequenz von ca. 290 Hz. Die Ergebnisse bestehen aus zweikomponentigen Darstellungen der Geschwindigkeiten und ihrer rms-Werte im Brennkammerquerschnitt $x=5$ mm stromab vom Brenneraustritt. Als Diskussionshilfe wurde jeweils eines der für 36 Phasenintervalle dargestellten Profile markiert.

Einleitung

Instationäre Verbrennung ist die Ursache für einen reduzierten Wirkungsgrad, für erhöhte Schadstoffentstehung und für starke akustische Emissionen des Verbrennungsvorgangs. Diese Eigenschaften charakterisieren die Umweltverträglichkeit einer Verbrennung und sind deshalb aktueller Gegenstand für eine intensive Erforschung mit dem Ziel einer positiven Einflussnahme.

Von den an einem Verbrennungsvorgang beteiligten und ineinander greifenden physikalischen Prozessen Strömung, Mischung, chemische Reaktion und akustische Emission bildet die Dynamik des Strömungsfelds des reagierenden Brennstoff-Luftgemischs eine zentrale Rolle. Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen des Strömungsfelds bestimmen die Effektivität der Gemischbildung und beeinflussen den Ablauf der Verbrennungsreaktionen. Es wird beobachtet, dass vor dem Einsatz der Verbrennung bestehende Strömungsinstabilität durch die Verbrennung erheblich verstärkt werden kann. Dabei entstehende Druckpulsationen können bis zur Zerstörung von Brennkammerstrukturen führen.

Die Parameterabhängigkeiten, welche die Verbrennungsinstabilität beeinflussen, sind noch weitgehend unerforscht. Es ist jedoch bekannt, dass die Neigung zur instationären Verbrennung bei magerer Verbrennung besonders groß ist. Die dominierenden Frequenzbereiche der Druckschwankungen ähneln sich trotz stark variierender Brennkammergrößen und Brennkammergeometrien, so dass akustische Resonanz nur bedingt als Ursache zu erkennen ist.

9.2

Es handelt sich dabei um Frequenzbänder um ca. 300 Hz und um ca. 700 Hz mit Schwankungsbreiten der Größenordnung ± 100 Hz. Abhängig vom Betriebszustand der Verbrennung können innerhalb dieser Frequenzbänder breite Verteilungen geringer spektraler Leistungsdichte oder auch sehr schmalbandige Schwankungsfrequenzen großer Leistungsdichte auftreten. Die Schmalbandigkeit macht sich akustisch als für das menschliche Gehör ausgeprägter tonaler Anteil im Verbrennungsgeräusch bemerkbar.

Die Schwierigkeiten einer numerischen Behandlung dieser Phänomene sowie die dafür notwendigen Datenbasen erfordern den intensiven Einsatz experimenteller Methoden für die Analyse derartiger Vorgänge. Diese sollten über Mittelwertmessungen hinaus auch eine zeitliche Auflösung der erfassten Vorgänge ermöglichen. Bei auftretender hoher Kohärenz (Schmalbandigkeit, Tonalität) der Schwankungen in einem Verbrennungsfeld ist mit der LDA zumindest die Erfassung von phasengemittelten Geschwindigkeitsinformationen möglich, ohne dass die Fluktuationen fremderregt werden.

Die hier zu berichtenden Experimente beziehen sich auf eine in den Mittelwerten bereits vermessene Strömung in der Modellbrennkammer der DLR-intern so genannten „Gasfilmdüse II“. Im DLR-internen Forschungsprojekt „NACOS“ und seinem Vorgängerprojekt BKM (Brennkammermodellierung) erfolgten an ihr eingehende Analysen in hauptsächlich drei Betriebszuständen mit den thermischen Leistungen 35 kW, 10 kW und ca. 7 kW. Die stets auftretenden Druckfluktuationen erheben die Frage nach den damit verbundenen Geschwindigkeitsschwankungen.

Versuchsobjekt

Eine Beschreibung des Versuchsobjekts wurde bereits im GALA-Beitrag von Lehmann (2002) gegeben. Es handelt sich um eine Zweistrom-Dralldüse, deren zwei konzentrische Teilluftströme mit gleichsinnig orientiertem Drall aus dem Brenner austreten. In die Scherschicht zwischen beiden Luftströmen wird das Brenngas (Methan) durch 72 Kapillarkanäle (Querschnitt je $0,5 \times 0,5$ mm²) drallfrei eingebracht und mit der Luft innerhalb geringer Lauflänge vermischt.

Der eingestellte Betriebszustand besaß mit der Luftzahl $\lambda=1,38$ einen Wert im Bereich der sog. mageren Verbrennung, die einerseits für einen umweltfreundlichen Verbrennungsprozess angestrebt wird, aber andererseits die Neigung zur instationären Verbrennung fördert. Die thermische Leistung der so definierten Flamme lag bei etwa 10 kW. Diese Flamme wurde innerhalb des DLR als Objekt ausführlicher experimenteller und numerischer Untersuchungen verwendet. Neben den strömungsmechanischen Feldgrößen wurden das Temperaturfeld und reaktionskinetische Parameter ermittelt und zu einem Gesamtbild aller Ergebnisse zusammengeführt (s. Noll et. al., 2002 sowie Weigand et al., 2002).

In dem hier verwendeten Betriebszustand war die Verbrennung in einer selbst angelegten Form bei einer Frequenz von etwa 290 Hz instabil. Die Instationarität führte zwar zu einer im akustischen Geräusch hörbaren Tonalität, stellte aber bei weitem nicht das Maximum tonaler Schalleistung dar, wie sie in anderen Betriebszuständen erzeugt werden konnten. Der Anregungsmechanismus ist dabei noch weitgehend

unklar. Eine offensichtliche akustische Resonanz mit Hohlräumen des Brenner-Brennkammersystems war nicht erkennbar.

Zusätzlich zu diesen bereits von anderen Autoren vorgelegten Ergebnissen ging es im vorliegenden Fall darum, die Dynamik und Wechselwirkungen von Druck- und Geschwindigkeitspulsationen experimentell zu erfassen. Sie sind Gegenstand dieses Berichts. In einem weiteren vorgesehenen Schritt wird im Institut für Verbrennungstechnik des DLR die Dynamik der Geschwindigkeitsfluktuationen mit der Dynamik der Reaktionskinetik verglichen.

Messtechnik

Für die Erfassung druckphasenbezogener Geschwindigkeitswerte stand eine orthogonal orientierte Dreikomponenten-Laser-Doppler-Optik zur Verfügung. Es wurden jedoch stets nur zwei, gegebenenfalls wechselnde Geschwindigkeitskomponenten erfasst. Zumeist waren dies die axiale und die radiale Geschwindigkeitskomponente, die für die konvektive Bewegung des Verbrennungsfelds in der Hauptströmungsrichtung ausschlaggebend sind. Auf die jeweils dritte Komponente wurde in Folge des besonderen Einsatzes der drei verfügbaren DANTEC-BSA-Analysatoren verzichtet.

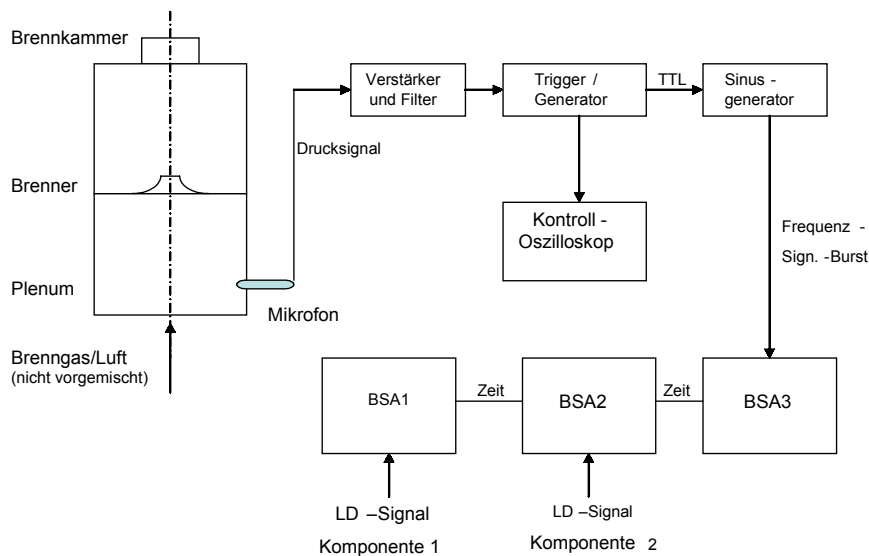


Bild 1: Schema für druckphasenkodierte Signalerfassung

Einer der drei BSAs diente zur Erzeugung eines druckphasenbezogenen Encodersignals (Bild 1). Dazu wurde das druckproportionale Signal eines am Brennerplenum angebrachten Mikrofons im Nulldurchgang der ansteigenden Druckflanke getriggert (s. Bild 3). Mit dem Triggersignal wurde ein TTL-ähnlicher Puls erzeugt während dessen Dauer eine konstante Signalfrequenz von ca. 40 MHz freigesetzt und be-

9.4

sagtem BSA zur Analyse zugeführt wurde. Die Zeitstamps der vom BSA3 erzeugten konstanten Frequenzergebnisse dienen als Zeitmarken beim Vergleich mit den zugeordneten Zeitreihen der Geschwindigkeitsergebnisse der beiden anderen BSAs.

Diese etwas umständlich erscheinende, dennoch wirksame Technik wurde auf Grund eines gewissen Misstrauens gegenüber der systemeigenen Encoderfunktion der BSAs benutzt. Auf Grund späterer Experimente muss jedoch gesagt werden, dass dieses Misstrauen nicht berechtigt war. Neuere Messungen werden deshalb unter Verwendung der systeminternen Encoderfunktion durchgeführt, was dann die Erfassung auch der dritten Geschwindigkeitskomponente zulässt.

Schwierigkeiten ergaben sich bei den oft sehr langen Messzeiten (bis 600 s) an einem Messort in Folge einer sich zunehmend reduzierenden Zeitauflösung der in das ASCII-Format exportierten Zeitreihen. Da aber die zeitliche Maximalauflösung der Clock-Frequenz von $1 \mu\text{s}$ vom systemeigenen Datencode erfasst war, konnte dieser Nachteil mit Hilfe einer eigenformulierten Transformation der Daten in das ASCII-Format behoben werden.

Bild 2 ist ein Foto der Standardflamme mit einer konusförmigen, von der Brennkammerwand abgehobenen Kontur ist. In Bild 3 ist das Oszillogramm des zwischen 200 und 400 Hz bandpass-gefilterten Mikrofonsignals gezeigt mit den auf seine Nulldurchgänge fixierten Triggerpulsen für die Zeitkodierung mit Hilfe des BSA3 .

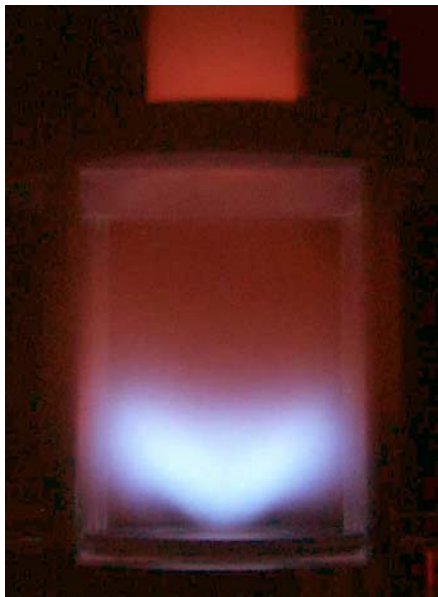


Bild 2: Ansicht der Standardflamme

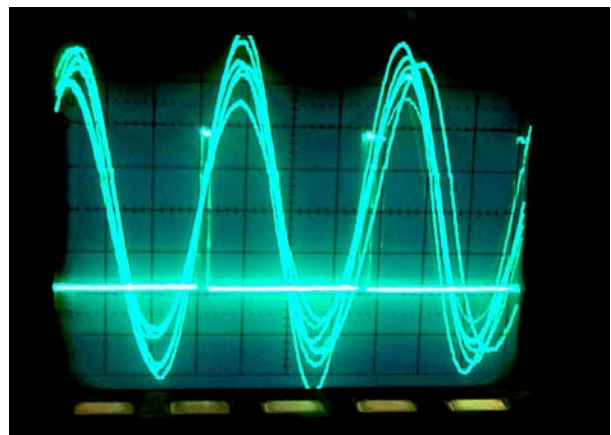


Bild 3: Drucksignale mit Triggerpuls

Messergebnisse

In Bild 4 sind die Profile der drei Geschwindigkeitskomponenten an den axialen Positionen $x=1 \text{ mm}$ und $x=5 \text{ mm}$ stromab vom Brenneraustritt dargestellt. U ist die axiale, v die radiale und w die Umfangskomponente.

Die Profile erfahren innerhalb von nur 4 mm Lauflänge eine deutliche Veränderung im Sinne einer Abschwächung von Geschwindigkeitsgradienten. Das Profil der v -Komponente unterliegt im Bereich des inneren Teilluftstroms mit dem Austrittsdurchmesser von 15 mm einer besonders drastischen Änderung.

Die nachfolgend diskutierten Ergebnisse beziehen sich auf den Brennkammerquerschnitt bei $x=5$ mm stromab vom Brenneraustritt.

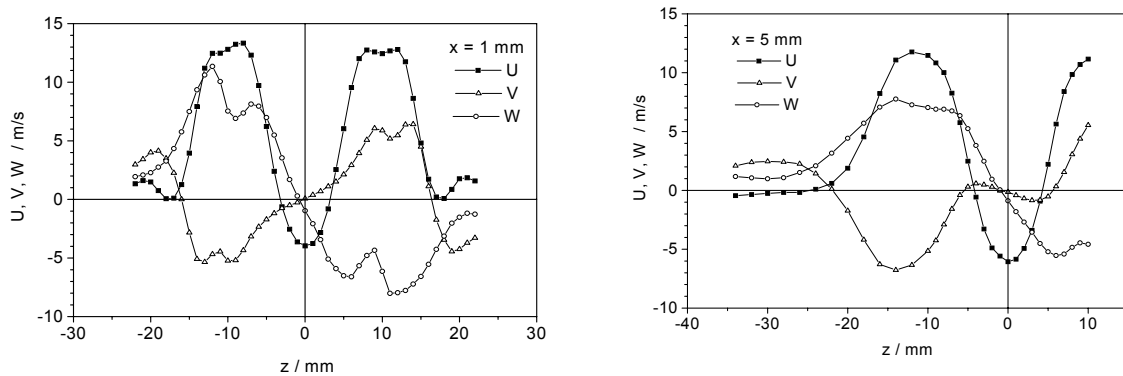


Bild 4: Profile der Geschwindigkeitskomponenten bei $x=1$ mm und $x=5$ mm

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der phasenbezogenen Mittelwertmessungen (Ensemble-Mittelwerte) der axialen und der radialen Komponenten. Die Druckperiode ist in 36 Phasenintervalle aufgeteilt. Bei der axialen Komponente treten maximale druckkorrelierte Schwankungen auf der Düsenachse sowie bei etwa $z=-12$ mm auf. Letzteres ist etwa der engste Durchmesser des sich danach wieder diffusorartig öffnenden äußeren Teilluftkanals. Auch in Wandnähe der Brennkammer bei etwa $z/D_{Bk}=1/3$ (D_{Bk} : Brennkammerdurchmesser) nehmen die phasenabhängigen Schwankungen noch einmal zu.

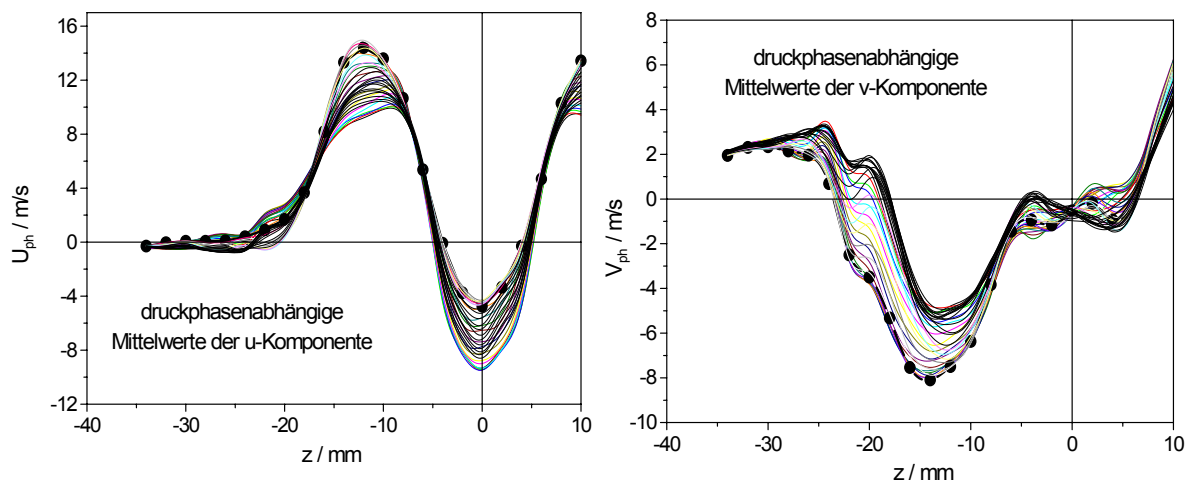


Bild 4: druckphasenabhängige Profile der axialen und der radialen Geschwindigkeitskomponente bei $x=5$ mm, Druckschwankungsperiode in 36 Phasenintervalle geteilt, markierte Profile entsprechen gleicher Phasenlage

9.6

Die radialen Fluktuationen besitzen ausserhalb des inneren Teilluftstroms eine weitgehend einheitliche Orientierung. Innerhalb der Profilgruppen beider Komponenten ist jeweils ein Profil gleicher Phasenlage durch Markierung der Messpunkte hervorgehoben. Dies lässt den momentanen Phasenbezug der Fluktuationen beider Komponenten erkennen. Bei maximaler Geschwindigkeit der u-Komponente wird auch die radiale Geschwindigkeit maximal, solange sie von der Brennkammerachse weggerichtet ist.

Deutlicher als in Bild 4 ist in Bild 5 die Systematik der druckphasenbezogenen Geschwindigkeitsschwankungen zu erkennen. Die Profile entstanden durch Subtraktion des axialen bzw. des radialen Profils der Geschwindigkeitsmittelwerte von den phasengemittelten Profilen in Bild 4. Man erkennt Knoten bei den Schwankungen der axialen Geschwindigkeit, die ungefähr im Bereich der Scherschichten zwischen den beiden Teilluftströmen und zwischen dem äusseren Teilluftstrom und der Brennkammerumgebung liegen. Die relativen radialen Schwankungen zeigen eine derartige Knotenbildung nicht. An Hand der markierten Profile mit gleicher Phasenlage ist zu sehen, dass positive Fluktuationen der axialen Komponente mit negativen Fluktuationen der radialen Komponente gekoppelt sind.

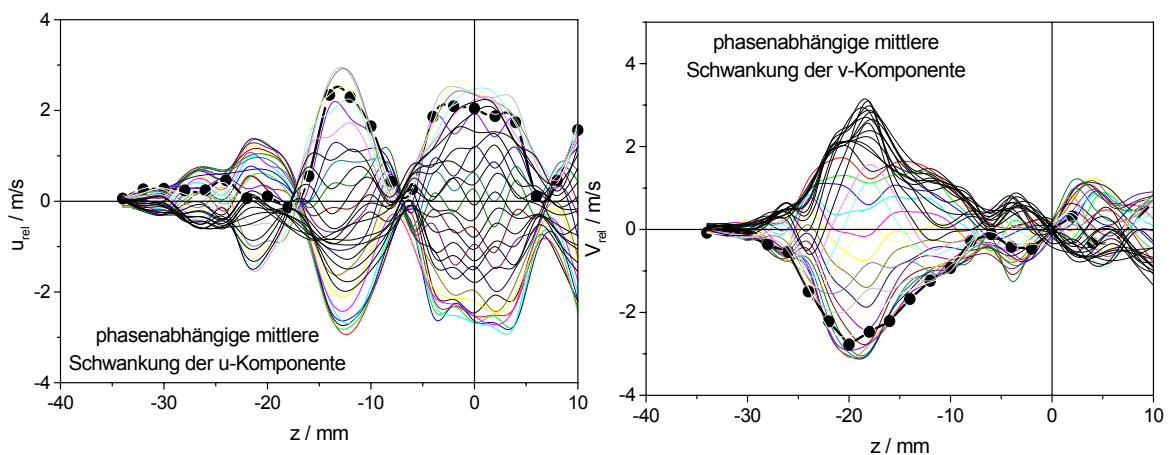


Bild 5: : druckphasenabhängige Profile der relativen axialen und der radialen Geschwindigkeitsschwankungen bei $x=5\text{mm}$

Weiterhin ist den Diagrammen Bild 5 zu entnehmen, dass die maximalen Schwankungen beider Geschwindigkeitskomponenten ca. $\pm 3\text{ m/s}$ betragen. Diese Schwankungen traten mit der bereits erwähnten Frequenz von etwa 290 Hz auf was zu einer Schallemission mit deutlich erkennbarem tonalen Anteil führte.

Bild 6 zeigt die druckphasenbezogenen rms-Wert-Profile der Geschwindigkeitsschwankungen. Wie bei den Geschwindigkeiten besteht eine eindeutige Korrelation dieses Turbulenzparameters mit dem Druck. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Turbulenz des Strömungsfelds durch die druckschwankungskorrelierten deterministischen Geschwindigkeitsfluktuationen dominiert wird und der stochastische Anteil der Turbulenz im Verhältnis dazu gering ist. Wäre es nicht so, so würden sich die druckphasenkorrelierten rms-Wert-Profile weniger deutlich voneinander separieren.

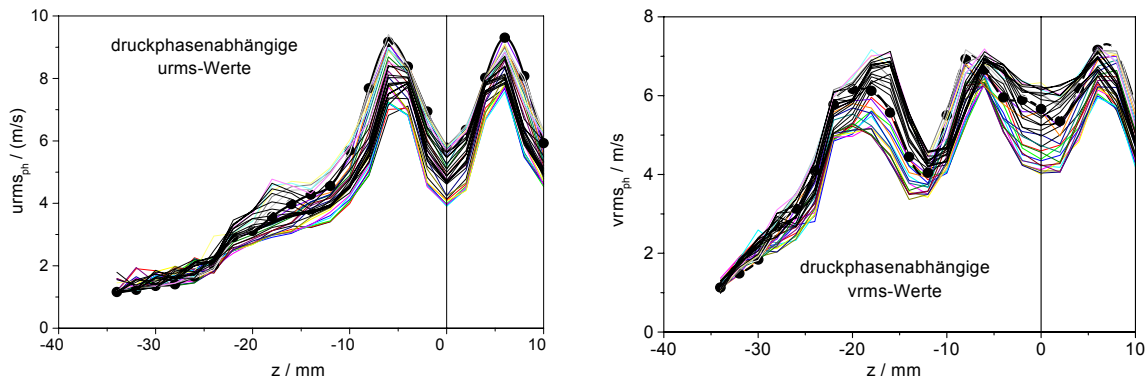


Bild 6: druckphasenabhängige rms-Wert-Profile der axialen und der radialen Geschwindigkeitskomponente bei $x=5\text{mm}$

Bild 6 zeigt die druckphasenbezogenen rms-Wert-Profile der Geschwindigkeitsschwankungen. Wie bei den Geschwindigkeiten besteht eine eindeutige Korrelation dieses Turbulenzparameters mit dem Druck. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Turbulenz des Strömungsfelds durch die druckschwankungskorrelierten deterministischen Geschwindigkeitsfluktuationen dominiert wird und der stochastische Anteil der Turbulenz im Verhältnis dazu gering ist. Wäre es nicht so, so würden sich die druckphasenkorrelierten rms-Wert-Profile weniger deutlich voneinander separieren.

Zusammenfassung

In einer Modellbrennkammer wurden druckphasenaufgelöste Geschwindigkeits- und rms-Wert-Profile gemessen und für den Brennkammerquerschnitt $x=5\text{mm}$ nach dem Brenneraustritt dargestellt und diskutiert. Als Referenzsignal dient das Drucksignal eines an dem Brennerplenum angebrachten Mikrofons. Die Messung erfolgte jeweils zweikomponentig, weil ein dritter verfügbarer LD-Signalanalysator für die Erzeugung eines die Messreihen begleitenden Kodiersignals diente.

Im vorliegenden Fall einer hinsichtlich ihrer eigenerregten Instationarität nicht maximierten Verbrennungsströmung ergeben sich Geschwindigkeitsfluktuationen der Größenordnung $\pm 3\text{ m/s}$ bei einer Frequenz von etwa 290 Hz . Dabei besteht eine eindeutige Kopplung sowohl der Geschwindigkeiten als auch ihrer rms-Werte mit der Druckschwankungsphase. Die entsprechend ensemble-gemittelten Profile beider Strömungsgrößen bilden dadurch ein entsprechend aufgefächertes System.

Durch Markierung jeweils eines Profils mit einer für alle Auftragungen gleichen Phasenlage lassen sich durch Vergleich weitere Schlüsse über Zusammenhänge der Fluktuationen der betrachteten Geschwindigkeitskomponenten ziehen.

Schrifttum

Noll, B., Kessler, R., Lehmann, B., Rachner, M., Frank, P., Schmitz, G., Geigle, K.-P., Meier, W., Schütz, H., Forkert, T., Aigner, M.: Ergebnisse des Projekts "Brennkam-

9.8

mermodellierung" (BKM II). DLR-Forschungsbericht 2002-16, August 2002, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln.

Lehmann, B. : Anwendung digitaler Zeilenkameras für die Erfassung und Analyse von Strömungs- und Verbrennungsinstabilitäten. 10.GALA-Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik , 10. Bis 12. Sept. 2002, Universität Rostock

Weigand, P., Keck, O., Duan, X., Meier W., Lehmann B., Giezendanner. R., Meier, U., Stricker, W., Aigner, M.: Experimental Investigations and Laser Based Validation Measurements in a Gas Turbine Model Combustor. Poster-Vortrag zum 1. SFB568 Workshop, 14./15. 11.2002, Darmstadt.

Weigand, P. Duan, X., Keck, O., Meier, W., Lehmann, B. Stricker, W., Aigner, M.: Detaillierte Analyse eingeschlossener Drallflammen nahe der mageren Löschgrenze mittels PLIF, LDA- und Raman-Messtechnik. Vortrag zum 16. TECFLAM-Seminar, Combustion Control and Simulation, 5. Nov. 2002, Forschungszentrum Karlsruhe