

UNTERSUCHUNG DER TURBULENZSTRUKTUR EINER VERDRALLTEN BRENNKAMMERSTRÖMUNG

B. Boehm^{1*}, J. Findeisen², D. Hennecke², A. Dreizler¹

¹ FG Energie- und Kraftwerkstechnik

² FG Gasturbinen und Flugantriebe

TU Darmstadt, Petersenstrasse 30, D – 64287 Darmstadt

* bboehm@ekt.tu-darmstadt.de

Abstract

Ziel dieser Arbeit ist eine detaillierte Charakterisierung des Strömungsfeldes sowie der instationären Prozesse in einem Segment einer generischen Gasturbinenbrennkammer. Dieses Segment besteht aus drei Düsen, um realistische Randbedingungen der zentralen Düse sicherzustellen. Das Experiment wurde isotherm mit Luft unter Umgebungsbedingungen durchgeführt. Dabei wird hier insbesondere der Einfluss der benachbarten Düsen auf das Strömungsfeld der zentralen Düse diskutiert. Eingesetzt wurde hier die Laser Doppler Anemometrie (LDA) einerseits zur Bestimmung der statistischen Momente aller drei Geschwindigkeitskomponenten und andererseits zum lokalen Nachweis von kohärenten Strömungsstrukturen. Letzteres erfolgte durch die Aufnahme von Zeitreihen mit Hilfe von Ein-Komponenten LDA-Messungen, anhand derer zeitliche Autokorrelationsverläufe und Energiespektren bestimmt wurden. Das isotherme Strömungsfeld einer einzelnen Düse in einer Brennkammer (1DK) wurde mit dem dreier parallel geschalteter Düsen (3DK) verglichen. Es zeigte sich eine starke Veränderung der Größe bzw. Ausdehnung der inneren Rezirkulationszone in Abhängigkeit der Düsenanzahl. Zudem wurden kohärente Strukturen beobachtet, die dem Phänomen des präzedierenden Wirbelkerns zugeordnet werden konnten. Die Frequenzen waren für beide Fälle gleich, doch zeigte sich eine Abhängigkeit der Amplituden von der Düsenanzahl.

Einleitung

Zwei aktuell sehr wichtige Anforderungen an Gasturbinen-Brennkammern sind die Gewährleistung einer stabilen Verbrennung in allen Betriebsbereichen und eine geringe Umweltbelastung durch minimalen Schadstoffausstoß. Bei modernen Brennkammerkonzepten wird man dieser Forderung durch Verwendung sogenannter Drallbrenner gerecht. Diese sorgen zum einen durch die starke Turbulenzerzeugung für eine gute Gemischaufbereitung und zum anderen durch die sich ausbildende Rückströmzone für die Flammenstabilisierung. Senkrecht zur Hauptströmung wird Sekundärluft durch Löcher in der Flammrohrwand eingebracht, die je nach Verbrennungskonzept noch zusätzlichen Sekundärsauerstoff für die Verbrennung liefert oder dem Einstellen des geforderten globalen Brennstoff-Luft-Verhältnisses dient. Das Strömungsfeld solcher Ringbrennkammern zeichnet sich neben stark gekrümmten Stromlinien durch lokale und zeitliche Instabilitäten aus. Für die optimale Auslegung der speziellen Beluchtungsgeometrie, welche die einzige Möglichkeit zum Einstellen der geforderten Massentromaufteilung darstellt, ist eine detaillierte Kenntnis dieser Strömungsphänomene notwendig. Nach [1] führen bereits geringste Variationen der Geometrie zu vollkommen unter-

schiedlichen Strömungssituationen. Im Fall einer Fett-Mager-Verbrennung beispielsweise, die zur Reduktion von Stickoxiden eingesetzt wird, wird in der primären Flammenzone fett verbrannt und durch eine möglichst schnelle Zugabe von Sekundärluft stromab mager ausgebrannt. Eine Rückströmung von Sekundärluft in die Primärzone ist hier unbedingt zu vermeiden, da sonst bedingt durch verlängerte Verweilzeiten lokaler stöchiometrischer Zonen eine starke Stickoxidbildung erfolgen würde [1]. Aus diesem Grund muss die Größe und Struktur der Rezirkulationszone bekannt sein. Um Ergebnisse von Modellbrennkammern auf technische Anwendungen übertragen zu können, ist das Verständnis über vereinfachende Modellannahmen und deren Einfluss auf das Ergebnis notwendig.

Zu diesem Zweck wurden neben detaillierten Untersuchungen des Sekundärlufteinflusses der Einfluss der benachbarten Düsen auf die zentrale Düse untersucht, was im Rahmen dieser Arbeit diskutiert wird. Dafür wurde im ersten Fall (1DK) die zentrale Düse einzeln betrieben und im zweiten (3DK) zwei benachbarte Düsen dazugeschaltet um realistische Randbedingungen sicherzustellen. Diese Messungen sind jeweils ohne Sekundärlufteinblasung durchgeführt worden. Die Messreihe wurde unter folgender Fragestellung aufgenommen: Wie verändert sich die Rückströmzone hinsichtlich Form und Größe? Ändern sich die Turbulenz- bzw. die kohärenten Strömungsstrukturen?

Experimenteller Aufbau

Drei Düsen werden in einem Segment einer abgewickelten Ringbrennkammer betrieben. Die Düsen basieren auf einem Design von MTU (Abb. 1). Zwei Massenströme werden durch tangential angeordnete Kanäle gleichsinnig verdreht und treten durch einen Filmleger getrennt in die Brennkammer ein. Die Untersuchung wurde mit einem Massenstrom von $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ Luft pro Düse bei einer konstanten Lufttemperatur von $T = 313 \text{ K}$ und Umgebungsdruck durchgeführt. Die Reynoldszahl war $Re = 44000$ bezogen auf den Düsendurchmesser und die mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit. Der Aufbau der Brennkammer ist in Abb. 2 skizziert. Der Luftmassenstrom tritt von links durch die in der Höhe mittig angebrachten Düsen ein. Der Abstand von Düsenmittelpunkt zu -mittelpunkt beträgt jeweils 100 mm . Über zuschaltbare Bohrungen ($d = 12 \text{ mm}$; $s = 33,3 \text{ mm}$) kann von oben und unten Sekundärluft eingeblasen werden. Das verwendete Koordinatensystem hat seinen Ursprung genau in der Mitte der Brennkammer in der Ebene der Sekundärlufteinblasung, 72 mm stromab der Düsen. Die Hauptabmessungen betragen $b = 300 \text{ mm}$ und $h = 100 \text{ mm}$. Die Vorder- und Rückseite ermöglichen einen optischen Zugang über die ganze Höhe mit einer Länge von ca. 200 mm . Weitere Details zum Prüfstand sind in [1,2,3] publiziert.

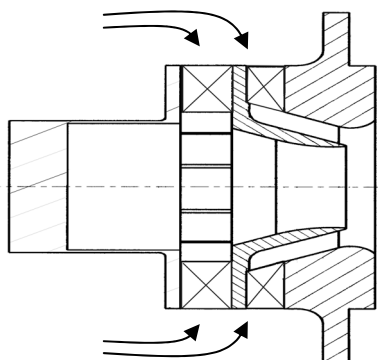


Abb. 1: Skizze der Düse, verzerrte Darstellung (Düsendurchmesser $d = 23 \text{ mm}$)

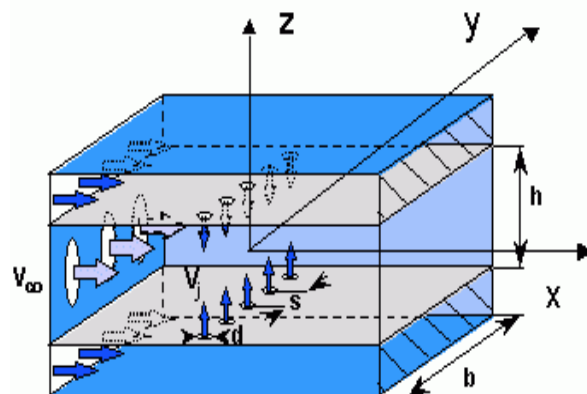


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Brennkammer mit Koordinatensystem

Die Messung der Geschwindigkeiten und höheren Momente erfolgte mit einem Standard-LDA-System (DANTEC). Das Messsignal wurde von einem DANTEC MultiPDA Signalprozessor im Coincidence mode analysiert. Gemessen wurde in Vorwärtsstreuung, mit einem Winkelversatz von ca. 30° zwischen Empfangs- und Sendeoptik. Damit konnte die Ortsauflösung erhöht werden [4]. Gemessen wurden radiale Profile entlang der y- sowie der z-Achse. Dabei wurden jeweils die axialen und die tangentialen bzw. radialen Komponenten der Geschwindigkeit aufgenommen. Die Strömung wurde mit einem Nebelfluid der Firma SAFEX geseedet (mittlerer Partikeldurchmesser ca. 1µm). Zusätzlich zur Charakterisierung des Geschwindigkeitsfeldes wurden Einkomponenten Zeitreihen zur Bestimmung der zeitlichen Autokorrelationsfunktion $R_{ij}(x, t, \tau) = \overline{u_i(x, t) \cdot u_j(x, t + \tau)}$ mit gemessen. Die Bestimmung der zeitlichen Autokorrelation anhand der unregelmäßig abgetasteten LDA Daten erfolgte mit Hilfe einer erweiterten „fuzzy-slotting“ Technik und einer lokalen Normierung, die eine deutliche Verringerung der Varianz bei der Vorhersage der Korrelationskoeffizienten ermöglicht [5].

J	m _{pkt} [kg/s]	DK	x-Position [mm]											
			-70,0	-62,5	-50,0	-37,5	-25,0	-12,5	0	12,5	25,0	50,0	75,0	100
0	0,12	1			A,Z					A				
		3	A,Z	Z	A,Z					A,Z				
	0,15	1	A	A,Z	A,Z	A,Z	A	A	A,Z		A	A	A	A
		3	A,Z	A,Z	A,Z	A,Z	A	A	A,Z	A	A	A	A	A
	0,18	1			A,Z					A				
		3	A,Z	Z	A,Z	Z				A,Z				
100	0,15	1												
		3			Z	A		A	A,Z		A		A	
150	0,15	1												
		3			Z	A,Z		A,Z	A,Z		A,Z		A,Z	

Tabelle 1: Messprogramm

Tabelle 1 fasst das wesentliche Messprogramm dieser Untersuchung zusammen. In verschiedenen Abständen zum Drallerzeuger wurden entlang der y-Achse bei z=0 bzw. der z-Achse bei y=0 Radialprofile aufgenommen (Bezeichnung „A“). Diese Daten werden bei der Ergebnisdiskussion für die charakteristischen Axial-, Tangential- und Radialprofile verwendet. Ebenen, in denen Zeitreihen aufgenommen wurden, sind mit „Z“ gekennzeichnet. Der Parameter J gibt das Impulsverhältnis Sekundär- zu Primärluft an.

Ergebnisse

Mittlere Geschwindigkeiten

Das Strömungsfeld zeigt die typischen Merkmale einer Drallströmung auf. Man erkennt anhand der mittleren Geschwindigkeitsverläufe eine zentrale, toroidale Rückstromzone. Eine äußere Rezirkulationszone ist in den Ecken zwischen Düsenaustritt und Brennkammerwand angedeutet.

Abb. 3 zeigt die radialen Profile aller drei Geschwindigkeitskomponenten. Die Profile sind für verschiedene axiale Positionen in einem Diagramm dargestellt. Dabei zeigen die Abbildungen links den Fall 3DK und rechts ist jeweils 1DK gegenübergestellt. Ausgewählte axiale Positionen sind für beide Fälle x=-62,5; -50; -37,5; 0mm. Aufgrund der unterschiedlichen Rückströmzonen wurde jeweils eine zusätzliche axiale Position gewählt, die Auskunft über deren Länge gibt.

Strömungsfeld der 3 Düsenkonfiguration (3DK)

Die Ausdehnung der Rückstromzone ist anhand der mittleren Geschwindigkeitsprofile gut zu erkennen. Der Öffnungswinkel der Düsenerschicht gegen die Vertikale beträgt ca. 24° . Die Rückstromzone weitet sich stark auf. Die Drallströmung kommt damit ab $x=-37,5\text{mm}$ an der Ober- und Unterseite der Brennkammer zum Anliegen. Seitlich zwischen den benachbarten Düsen kommt es zur direkten Interaktion der Hauptmassenströme der einzelnen Düsen. Die axialen Geschwindigkeitskomponenten wachsen ineinander und vereinigen sich stromab von $x=0\text{mm}$. Die Maximalgeschwindigkeiten in der Düsenerschicht klingen schnell ab. Bei einer axialen Position von ca. einem Düsendurchmesser beträgt sie nur noch ein Drittel der

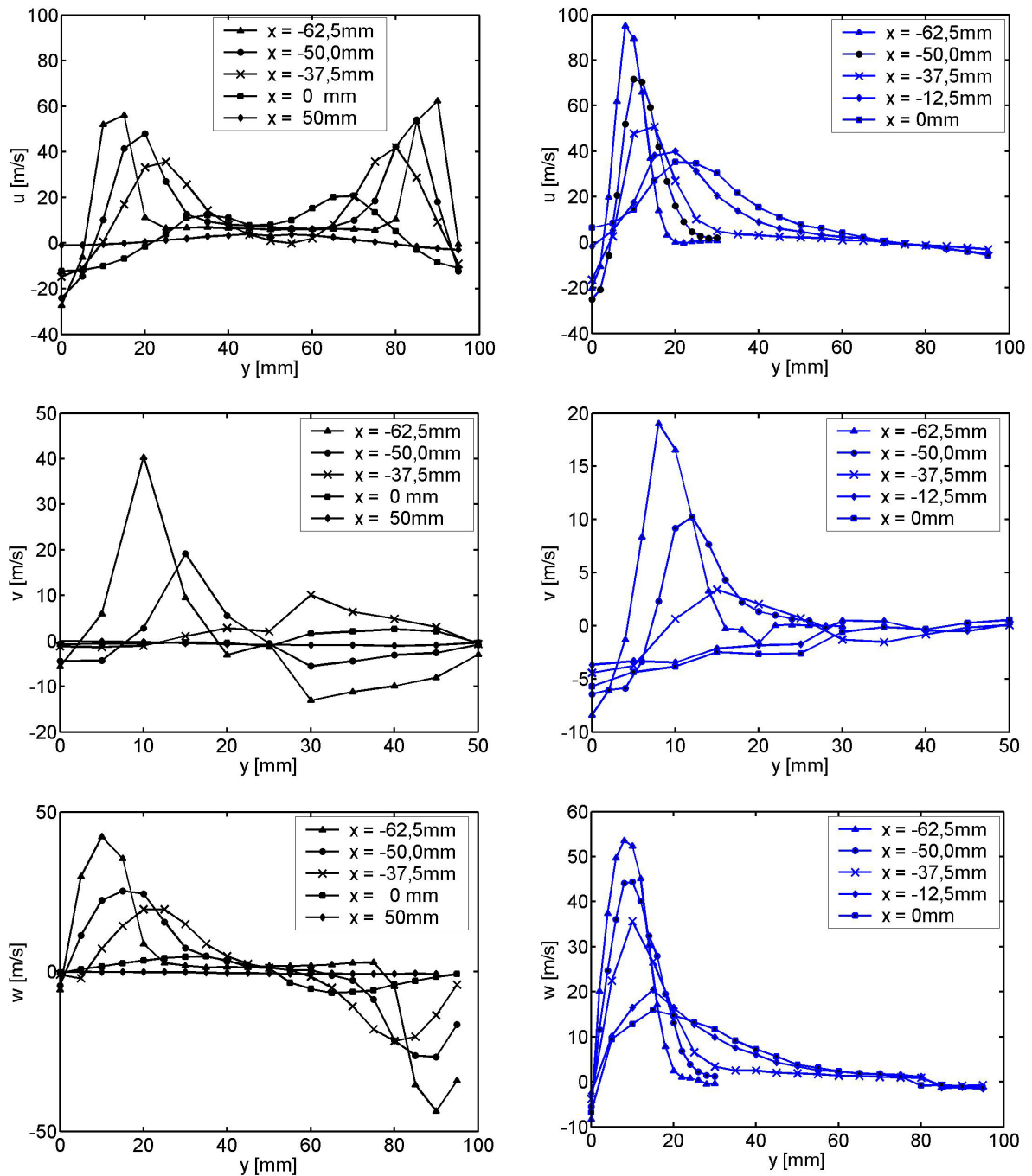


Abb. 3: Radiale Profile der Axialgeschwindigkeit u , Radialgeschwindigkeit v und Tangentialgeschwindigkeit w für 3DK (links) und 1DK (rechts)

Maximalgeschwindigkeit am Düsenaustritt. Die Rückstromzone reicht bis in den Drallerzeuger hinein und hat eine axiale Ausdehnung bis $x \sim 50\text{mm}$.

Die Verteilung der gemittelten Radialgeschwindigkeit zeigt die verschiedenen Bereiche des Strömungsfeldes auf, wie sie für Drallerzeuger typisch sind. Deutlich zu erkennen ist die Düsenschicht mit den höchsten Radialgeschwindigkeiten aufgrund der Zentrifugalbeschleunigung nahe dem Düsenaustritt. In der inneren Rezirkulationszone wird die radiale Geschwindigkeit negativ, aufgrund des radialen Druckgradienten, der das Fluid in Richtung Mittelachse umlenkt. Der Betrag der Geschwindigkeit liegt jedoch deutlich niedriger als in der Scherschicht. Genauso verhält sich die radiale Geschwindigkeit in den Außenbereichen in der Nähe des Düsenaustritts, was darauf hinweist, das Fluid aus der Umgebung in die Scherschicht gesaugt wird.

Die Strömung weist am Düsenaustritt im Bereich zwischen dem Maximum und Minimum der Tangentialgeschwindigkeit eine Festkörperrotation auf. Zum Außenbereich hin fällt sie aufgrund des Grenzschichteinflusses nahezu auf Null. Am Düsenaustritt liegt sie vom Betrag her in der gleichen Größe wie die Axialgeschwindigkeit, was die anhand der Austrittsprofile berechneten Drallzahl von ca. 1 bestätigt.

Vergleich: 3DK-1DK

Der Vergleich des Strömungsfeldes des Falls 1DK mit dem Basisfall 3DK zeigt eine ähnliche Strömungsfeldstruktur des zentralen Drallerzeugers. Die Außenbereiche unterscheiden sich aufgrund der fehlenden benachbarten Düsen sehr deutlich. Auffällig ist hier im Vergleich die starke Änderung der Größe der Rückstromzone, wie die mittleren Geschwindigkeitsprofile zeigen. Am Düsenaustritt sind die Tangentialgeschwindigkeiten nahezu identisch. Das Maximum der Axialgeschwindigkeit ist jedoch höher und die Radialgeschwindigkeiten entsprechend niedriger als im Fall 3DK. Der Öffnungswinkel zwischen Scherschicht und Mittelachse beträgt nur noch ca. 16° , d.h. dass die radiale Ausdehnung geringer, der axiale Druckgradient schwächer und dadurch auch die axiale Ausdehnung der Rückstromzone geringer wird (bis $x \sim -12,5\text{mm}$). Die negative Axialgeschwindigkeit in der Rückstromzone ist in Düsennähe gleich stark wie bei 3DK und reicht auch bis in die Düse hinein.

Die verstärkte Aufweitung der Rückströmzone deutet auf ein verändertes Druckfeld in der Brennkammer hin. Bei 1DK liegen die Brennkammerwände noch weit von der Drallströmung entfernt, sodass es hier zu keiner direkten Wechselwirkung kommt. Die Drallströmung nimmt lediglich aufgrund der Reibung Luft aus der Umgebung mit, was zur Bildung einer äußeren Rezirkulationszone führt. Im Fall von 3DK bewegen sich dagegen die Drallströmungen der benachbarten Düsen mit hoher Geschwindigkeit gegensinnig an der zentralen Drallströmung vorbei. Dadurch bildet sich dazwischen ein Unterdruck aus, der als treibende Kraft die Drallströmungen aufeinander zubewegt. Als Folge sinkt der Druck im Inneren der Drallströmung, was zu einem erhöhten rezirkulierten Massenstrom und damit einer Verlängerung der Rückströmzone führt.

Turbulenzstruktur

Der Vergleich der turbulenten kinetischen Energieverteilung (Abb. 4) zeigt deutlich den Einfluss benachbarter Düsen auf die zentrale Düse. Die turbulente kinetische Energie hat für beide Fälle nahe am Austritt den gleichen Maximalwert. Für 1DK aber ist die Verteilung schmaler mit einem zusätzlichen lokalen Maximum in der „Scherschicht“ zwischen beiden gleichsinnig verdrallten Strömungen stromab des Filmlegers. Für 3DK nimmt der Maximalwert in der Scherschicht bis zu $x = -50\text{mm}$ kaum ab. Die kinetische Energie im zentralen Bereich dagegen fällt innerhalb weniger mm auf die Hälfte des Anfangswertes ab. Aufgrund der Mischungsvorgänge wäre ein gleichmäßiges Abklingen der kinetischen Energie zu erwarten.

Hier scheint jedoch die kinetische Energie aus dem zentralen Bereich in die Düsenerschicht zu wandern, da diese in der Scherschicht mit zunehmender Position stromab nicht abnimmt. Erst im weiteren Verlauf kann das Zentrum keine kinetische Energie an die Scherschicht mehr liefern, wodurch diese gleichmäßig über die gesamte Breite abnimmt [6].

Im Fall 1DK dagegen fällt die kinetische Energie stärker ab und auch die Umverteilung ist nicht im gleichen Maße zu beobachten. Doch könnten diese Effekte aufgrund der veränderten Strömung geringer sein oder auch weiter stromauf erfolgen, wofür auch die stärkere Dämpfung der kohärenten Strukturen (siehe Abb. 5) im Vergleich zu 3DK spricht. Stromab von $x=-12,5\text{mm}$ sinkt die kinetische Energie für 1DK sehr viel langsamer ab. Die Rezirkulationszone ist hier schon zu Ende, während für 3DK die Rezirkulationszone weiter stromab reicht und die kinetische Energie weiterhin stark abnimmt und auf einem wesentlich niedrigeren Niveau liegt.

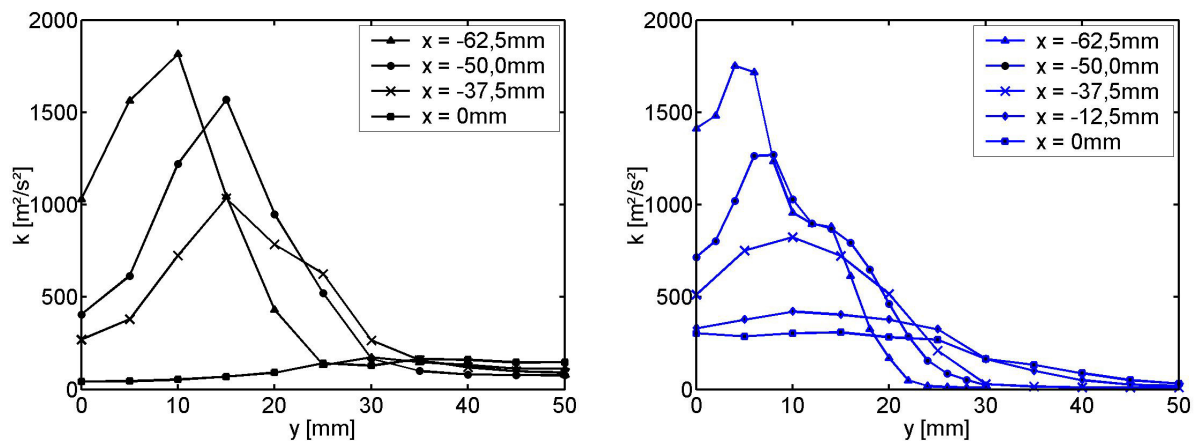


Abb. 4: Radiale Profile der turbulenten kinetischen Energie für 3DK (links) und 1DK (rechts)

Bei der vorliegenden Strömung mit einer Drallzahl von $S = 1$ und $Re = 44000$ ist davon auszugehen, dass sich der präzedierende Wirbelkern bereits in der Nähe der Düsenöffnung ausgebildet hat. Daher wurden Zeitreihen an verschiedenen axialen Positionen aufgenommen. Die radiale Position wurde so gewählt, dass immer ein Maximum der gemittelten Axialgeschwindigkeit oder derer Fluktuation vorhanden war. Die Autokorrelationsfunktionen weisen eine starke kohärente periodische Struktur auf (Abb. 5). Anhand von PIV Messungen konnten diese Strukturen an eingeschlossenen [7] sowie offenen Drallströmungen [8] als präzedierender Wirbelkern identifiziert werden. LES Rechnungen unterstützt von LDA-Messungen konnten zudem die Entstehung des sogenannten „Precessing Vortex Cores“ (PVC) bis in die Drallerzeuger hinein zurückverfolgen [9]. Der Einfluss war dort am stärksten, was sich in starken Amplituden in der düseninneren Scherschicht zwischen der vorwärtsgerichteten Drallströmung und der Rückstromzone in der Düse auswirkte. Es wird vermutet [10], dass die periodischen Fluktuationen von einer zeitlichen lokalen Blockage des Düsenaustritts durch den PVC herrühren.

Abbildung 5 zeigt die Autokorrelationsfunktion für $x=-62,5;-50\text{mm}$ aufgenommen in der Scherschicht zwischen Rückstromzone und Austrittsströmung, da hier dieses Phänomen am stärksten ist. Das Energiespektrum resultiert aus einer FFT der Autokorrelation für $x=-70\text{mm}$ und weist für 3DK (links) und 1DK (rechts) jeweils ein Maximum bei der Frequenz $f_1 = 3300\text{Hz}$ und ein schwächeres bei der doppelten Frequenz $f_2 = 6600\text{Hz}$. Nach [9] kann f_1 der Bewegung des Wirbelkerns zugeordnet werden und f_2 einer helikalen Wirbelstruktur, die mit gleicher Geschwindigkeit rotiert. Die doppelte Frequenz ergibt sich nach dieser Vorstellung daraus, dass sich zwei solcher Strukturen gegenüberliegen und damit bei einer Umdrehung zwei solcher Strukturen den Messort passieren. Die gleichen Frequenzen für 3DK

und 1DK bestätigen, dass die Drallzahl für beide Fälle konstant bleibt. Der wesentliche Unterschied besteht im Abklingverhalten der Schwingung. Während für 3DK bei $x=-50\text{mm}$ noch eine schwache Schwingung zu beobachten ist, weist 1DK dagegen eine wesentlich stärkere Dämpfung auf und ist bei $x=-50\text{mm}$ schon fast vollständig abgeklungen.

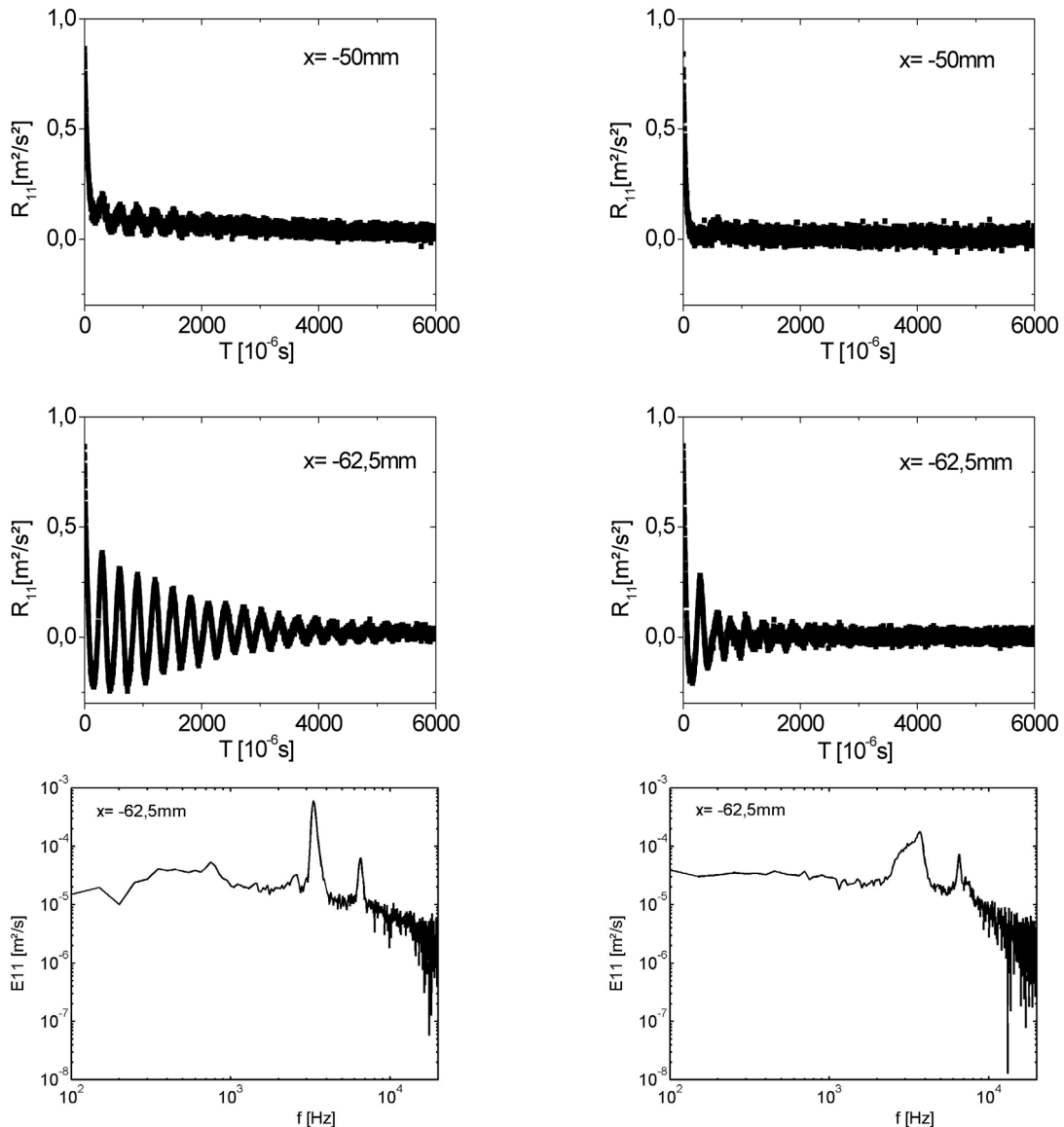


Abb. 5: Zeitliche Autokorrelation für $x=-62,5$; -50mm und Energiedichtespektren für $x=-62,5\text{mm}$ für 3DK (links) und 1DK (rechts)

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von benachbarten Düsen auf das Strömungsfeld einer zentralen Düse untersucht. Hierfür kam eine Brennkammer mit einer bzw. drei parallel angeordneten Düsen zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen einen wesentlichen Einfluss der benachbarten Düsen auf das mittlere Strömungsfeld und die Turbulenzstruktur. Die Form und Größe der Rückströmzone änderte sich stark, was vermutlich auf eine Änderung des Druckfeldes in der Brennkammer zurückzuführen ist. Weiterhin konnten kohärente Wirbelstrukturen beobachtet werden, die als PVC identifiziert wurden. Die benachbarten Düsen führten zu einer Anfachung dieses Wirbelsystems.

Danksagung

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung durch den Sonderforschungsbereich 568 (Teilprojekt A4 und C2).

Literatur

- [1] Krautkremer, B., Haag, O., Hennecke, D.K.: „Experimental investigation of secondary air injection in a swirling flow“, Proc. 15th Int. Symposium Air Breathing Engines, Bangalore, India, 2-7 Sept. 2001, ISABE 2001-1205.
- [2] Bornkessel, T.: „Untersuchung des Dralleinflusses auf die Sekundärlufteinblasung in einer Gasturbinenbrennkammer“, DGLR Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2001, 17.-20.09.01, Hamburg (Tagungsband), DGLR-2001-120.
- [3] Krautkremer, B.: „Untersuchung der Sekundärlufteinblasung in eine drallbehaftete Gasturbinen-Brennkammerströmung“, Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
- [4] H.E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke and C. Tropea: „Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques“, Springer Verlag, 2003.
- [5] van Maanen, H.R.E., Nobach, H., Benedict, L. H.: „Improved estimator for the slotted autocorrelation function of randomly sampled LDA data“, Meas. Sci. Tech., 10:L4-L7, 1999.
- [6] Wiedemann, A.: „Mehrkomponenten-Laser-Doppler-Anemometer-Messungen in einer drallbehafteten Rohr- und Brennkammerströmung“, Dissertation, Universität Göttingen, 2001.
- [7] Spencer A., Midgley K., McGuirk J.J., 2002: Technical Report D3.6 (WP3-LOUGH-15M) of EU founded project MOELCULES (Contract No. – G4RD-CT-2000-00402).
- [8] Froud, D., O’Doherty, T., Syred, N., 1995: “Phase Averaging of the Precessing Vortex Core in a Swirl Burner under Piloted and Premixed Combustion Conditions”, Combustion and Flame, 100, pp.407-412.
- [9] B. Wegner, A. Maltsev, C. Schneider, A. Sadiki, A. Dreizler and J. Janicka: “Evaluation of URANS performance in predicting an unconfined swirling flow with precessing vortex core based on LES and experiments”, Proc. TSFP3, 1, pp. 51-57, 2003.
- [10] Janus, B., Dreizler, A., Janicka, J.: „ Flow Field and structure of swirl stabilized non-premixed natural gas flames at elevated pressure“, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004.
- [11] Gupta, A.K., Lilley, D.G., Syred, N., 1984: “Swirl Flows”, Abacus Press, Tunbridge Wells.
- [12] Schneider, C.: “Über die Charakterisierung von Turbulenzstrukturen in verdrallten Strömungen“, Dissertation, TU Darmstadt, 2003.