

SIMULTANE 2D-LIF/PIV ZUR UNTERSUCHUNG TURBULENTER VERMISCHUNG IN EINER JET-IN-CROSSFLOW-KONFIGURATION

SIMULTANEOUS 2D-LIF/PIV FOR THE INVESTIGATION OF THE TURBULENT MIXING IN A JET-IN-CROSSFLOW CONFIGURATION

Camilo Cárdenas, Rainer Suntz, Henning Bockhorn

Institut für Technische Chemie und Polymerchemie, Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Simultane 2D-LIF/PIV, Strömungskanal, Querstrahleinmischung, Vermischung, Reynolds-Flüsse, Reynolds-Spannungen

Simultaneous 2D-LIF/PIV, flow channel, jet in crossflow, mixing, Reynolds-Fluxes, Reynolds-stresses

Zusammenfassung

Verschiedene Jet-in-Crossflow- Konfigurationen wurden mittels simultaner Anwendung von 2D-LIF/PIV experimentell untersucht. In diesem Kontext wurden neben Strömungs- und Konzentrations-Feldern korrespondierende Reynolds-Spannungen bzw. -Flüsse in den verschiedenen Messebenen erfasst. Die hierbei ermittelten Reynolds-Spannungen bzw. -Flüsse wurden mit dem Ziel ausgewertet, nicht nur Information im Hinblick auf die Erstellung und Validierung von Modellen zur Beschreibung turbulenter Strömungen zu gewinnen, sondern auch die Rolle der Korrelation zwischen Konzentrations- und Geschwindigkeitsschwankungen in der Einschätzung der Mischgüte zu bewerten.

Einleitung

In der Verfahrenstechnik versteht man unter Vermischung das gleichmäßige räumliche Verteilen von zwei oder mehreren Stoffen, Temperaturen oder Turbulenzniveaus. Die Vermischung ist eine der ältesten und am häufigsten angewandten verfahrenstechnische Operation, deren wissenschaftliche Bedeutung erst in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts fokussiert wurde (siehe z.B. Hixson 1944 und Rushton 1946). Sie ist bei jeder chemischen Reaktion der erste einleitende Schritt, der die Endduktströme zusammenführt und somit die Reaktion ermöglicht. Für diesen Zweck wird häufig die Jet-in-Crossflow-Strömungskonfiguration (JCF) (Margason 1999) in der Industrie eingesetzt. Beispiele hierfür sind: industrielle Brenner, RQL-Gasturbinen, T-Mischer und Rauch-Fahnen und Wasserdampffahnen von Schornsteinen bzw. Kühltürmen. Diese Konfiguration beruht auf der Eindüsung eines Strahles (Jet, Index j) senkrecht in eine gleichmäßige Querströmung (Crossflow, Index ∞). Diese Strömungsanordnung kann modifiziert werden, um die Mischgüte der mischenden Fluide beeinflussen zu können. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung eines drallbehafteten Jets oder durch Variation des Turbulenzniveaus im Mischgebiet über die Erhöhung der Reynoldszahl beider Strömungen erreicht werden.

Die Vermischung zweier mischbarer Fluide A und B erfolgt durch eine imaginäre Kontaktgrenzfläche, auf welche die Diffusionsstromdichte bezogen wird. Auf molekularer Ebene erfolgt das „Mikromischen“ durch Diffusion (Stofftransport) oder Wärmeleitung (Wärmetransport). Hierbei sind die Moleküle im Fluid gemäß der Brown'schen Molekularbewegung frei

beweglich und können sich mit anderen Molekülen mischen. Der Stofftransport durch molekulare Diffusion ist in erster Linie in ruhenden und laminar strömenden Gemischen von Bedeutung (Schlünder 1996) und seine Geschwindigkeit ist proportional dem lokalen Gradienten der stoffmengenbezogenen Partialdichte. Dieser wird durch das Fick'sche Gesetz beschrieben:

$$j_{M,i} = -D_M \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (1)$$

Dabei stellen $j_{M,i}$ die massenspezifische molekulare Teilchenstromdichte in i -Richtung [$\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$], D_M die Diffusionskonstante [m^2/s], c die Konzentration des transportierten Stoffes [mol/m^3] und x_i die Weglänge in i -Richtung [m], dar.

Turbulente Strömungen zeichnen sich im Vergleich zu laminaren Strömungen wegen der Überlagerung mit molekularen Bewegungen und des zufälligen konvektiven Stofftransports durch erheblich verbesserte Vermischungseigenschaften aller transportierten Größen aus (Schlünder 1996, Pope 2000). Treten Diffusionsvorgänge in Überlagerung mit einer makroskopischen Strömung des Fluides auf, können die durch die beiden Mechanismen hervorgerufenen Stoffströme addiert werden. Strömt das Gemisch mit der Geschwindigkeit v_i , so ist der totale massenspezifische Stoffstrom auf Grund sowohl der Diffusion $j_{M,i}$ als auch der makroskopischen Strömung $j_{K,i} = v_i \cdot c$ durch Gleichung (2) gegeben:

$$j_{Total,i} = j_{M,i} + j_{K,i} \quad (2)$$

Mittelt man die Gleichung (2), nachdem v_i und c durch die entsprechenden Reynolds-Zerlegungen für die physikalischen Variablen gemäß $\phi = \langle \phi \rangle + \phi'$ ersetzt wurden, so erhält man für die i -Richtung:

$$j_{Total,i} = j_{M,i} + j_{K,i} = -D_M \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i} + \langle v_i \rangle \langle c \rangle + \langle v_i' c' \rangle \quad (3)$$

wobei $\langle v_i \rangle \langle c \rangle$ dem laminaren Stoffstrom und $\langle v_i' c' \rangle$ dem turbulenten Stoffstrom entspricht. Der turbulente Stofftransport-Term $\langle v_i' c' \rangle$ ist ein nicht normierter Korrelations-Term, der Information über den fluktuierenden „turbulenten“ Teil der Geschwindigkeit in i -Richtung und der Konzentration kombiniert, d.h. diese Korrelation spiegelt den gegenüber laminaren Strömungen erhöhten, turbulenzbedingten Stoffaustausch wider und ist in einer idealen laminaren Strömung (ohne Schwankungen) gleich Null. Aufgrund dessen besteht ein besonderes Interesse bei der Untersuchung von Mischungsprozessen in der Ermittlung der drei resultierenden Flüsse ($\langle v_i' c' \rangle$, $\langle v_j' c' \rangle$ und $\langle v_k' c' \rangle$). Diese Größen werden als Reynolds-Flüsse bezeichnet. Deren experimentelle Ermittlung ist mittels der simultanen Anwendung des 2D-LIF/PIV-Messverfahrens möglich.

Bei entsprechend hoher Turbulenz kann $\langle v_i' c' \rangle$ in Gleichung (3) größer werden als die entsprechenden molekularen Austauschgrößen, die lediglich bspw. durch Änderung im Druck und der Temperatur nur in vergleichsweise engen Grenzen variiert werden können. Somit kann ein Mischvorgang im Wesentlichen durch eine Vergrößerung der Reynoldsflüsse und Kontaktgrenzfläche beschleunigt werden. Dies ist im Allgemeinen durch Erhöhung der Turbulenz zu erreichen.

Özcan et al. 2001 und Mungal et al. 1999 sind einige der wenigen den Autoren bekannten Untersuchungen die in einer JFC-Anordnung Reynolds-Flüsse und -Spannungen experimentell durch simultane 2d-LIF-PIV ermittelt haben. Bei ersteren wurde Wasser als Fluid verwendet, bei letzter Luft in der Querströmung und Stickstoff in der Jetströmung. Ferner wurde bei der Jetströmung Aceton als fluoreszierender Tracer verwendet, was den Nachteil hat, dass man zu dessen Anregung einen zweiten Laser benötigt und damit den apparativen und experimentellen Aufwand erheblich vergrößert.

Experimenteller Aufbau

Eine Gesamtübersicht des experimentellen Aufbaus wird in Abb. 1 gezeigt. Dieser besteht hauptsächlich aus drei Systemen: (I) dem Zuleitungssystem für den Crossflow, (II) dem Zuleitungssystem für die Jet-Strömung, und (III) dem eigentlichen JCF- Strömungskanal.

Das Zuleitungssystem für die Hauptströmung wird mit Umgebungsluft mittels eines Gebläses versorgt. Ein Rotameter und drei parallel geschaltete Venturirohre werden verwendet, um einen weiten Reynolds-Zahl Bereich in der Hauptströmung ($700 < Re_\infty < 350.000$ bzw. $4 \text{ m}^3/\text{n/h} < Q_\infty < 1.900 \text{ m}^3/\text{n/h}$) einzustellen, so dass sowohl laminare Strömungen und solche im Übergangsbereich (mit dem Rotameter – $700 < Re_\infty < 11.000$) als auch hochturbulente entsprechend (mit den Venturirohren – $11.000 < Re_\infty < 350.000$) eingestellt werden können. Die Reynoldszahl für die Hauptströmung wird anhand der Bulk-Geschwindigkeit der Strömung U_∞ im untersuchten Messvolumen, des hydraulischen Durchmessers D_∞ der Messstrecke und der kinematischen Viskosität ν_{kin} des fließenden Mediums (Luft) definiert, d.h.: $Re_\infty = U_\infty \times D_\infty / \nu_{kin}$.

Das Zuleitungssystem für die Jet-Strömung, das aus dem Druckluftnetz des Gebäudes mit Luft versorgt wird, ermöglicht es das Geschwindigkeitsverhältnis r zwischen 3 und 10 einzustellen. Daraus ergibt sich für die Reynoldszahl des Jets $150 < Re_j < 26.500$ ($0,05 \text{ m}^3/\text{n/h} < Q_j < 8 \text{ m}^3/\text{n/h}$). Die Reynoldszahl des Jets wird analog anhand der Bulk-Geschwindigkeit, des Durchmessers und der kinematischen Viskosität der Jetströmung definiert, d.h.: $Re_j = U_j \times D_j / \nu_{kin}$. Da die Jet-Strömung einen erheblich geringeren Durchsatz im Vergleich zur Hauptströmung besitzt und zudem der für LIF-Messungen erforderliche molekulare Tracer (NO_2 , 5.000 ppm) beigemischt werden muss, wurde eine Anordnung bestehend aus 5 Mass Flow Controllern (MFC) zur Einstellung des Drucksatzes verwendet.

Um Dichteunterschiede beider Strömungen zu quantifizieren, werden bei den Messungen die jeweiligen Temperaturen aufgezeichnet. Die Wirkung der Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit und diejenige der Tracer-Beimischung wurden vernachlässigt, weil dies die Dichte der Strömungen weniger als 0,5% beeinflusst.

Die Beimischung der für PIV-Messungen erforderlichen Tracerpartikel wird über die den Zuleitungen parallel geschaltete Aerosolgeneratoren (PALAS® AGF 10.0 für die Hauptströmung und AGK 2000 für den Jet) realisiert.

Wie in der Abb. 1 zu erkennen ist, besteht der Strömungskanal aus sechs Einzelteilen: Der Diffusor (1), der Beruhigungsstrecke (2), der Düse zur Kontraktion (3), der eigentlichen Messstrecke (4), dem Jet (5) und der Ablaufstrecke (6).

Die eigentliche Messstrecke, in der die Mischung zwischen der Hauptströmung und der Jet-Strömung durchgeführt wird, besitzt eine gute optische Zugänglichkeit. Sie ist 500 mm lang mit einem Querschnitt von 108 x 108 mm. Mittig im Boden und etwa 300 mm nach dem Düsenaustritt wird der Jet positioniert, der eine Länge von ca. 800 mm besitzt. Der Durchmesser des Jets ist 8 mm. Um ein kolbenförmiges Geschwindigkeitsprofil im Crossflow in der Messstrecke zu erzielen, muss die Querströmung zunächst aufgeweitet und anschließend in der Düse komprimiert werden. Die Aufweitung erfolgt im Diffusor, der als ablösearmer Übergang zwischen der Zuleitung der Strömung und der Beruhigungsstrecke fungiert. Direkt danach befindet sich die Beruhigungsstrecke, die die lokalen und zeitlichen Geschwindigkeitsunterschiede des Hauptstroms eliminiert. Hierzu befinden sich innerhalb der Beruhigungsstrecke drei Siebe und ein Gleichrichter oder Wabenelement. Die Düse zur Kontraktion besitzt eine optimierte abgerundete Kontur mit einem Kontraktionsverhältnis von 5. Sie beschleunigt die Strömung auf die gewünschte „Messgeschwindigkeit“.

Hinter der eigentlichen Messstrecke befindet sich die Auslaufstrecke, die die Verbindung zwischen Messstrecke und Abzug darstellt. Um Störungen der Strömung im Messbereich

durch Rückkopplungen aus dem Abluftbereich zu vermeiden, wurde eine 2,5 m lange (20 × Kanaldurchmesser) Auslaufstrecke gewählt.

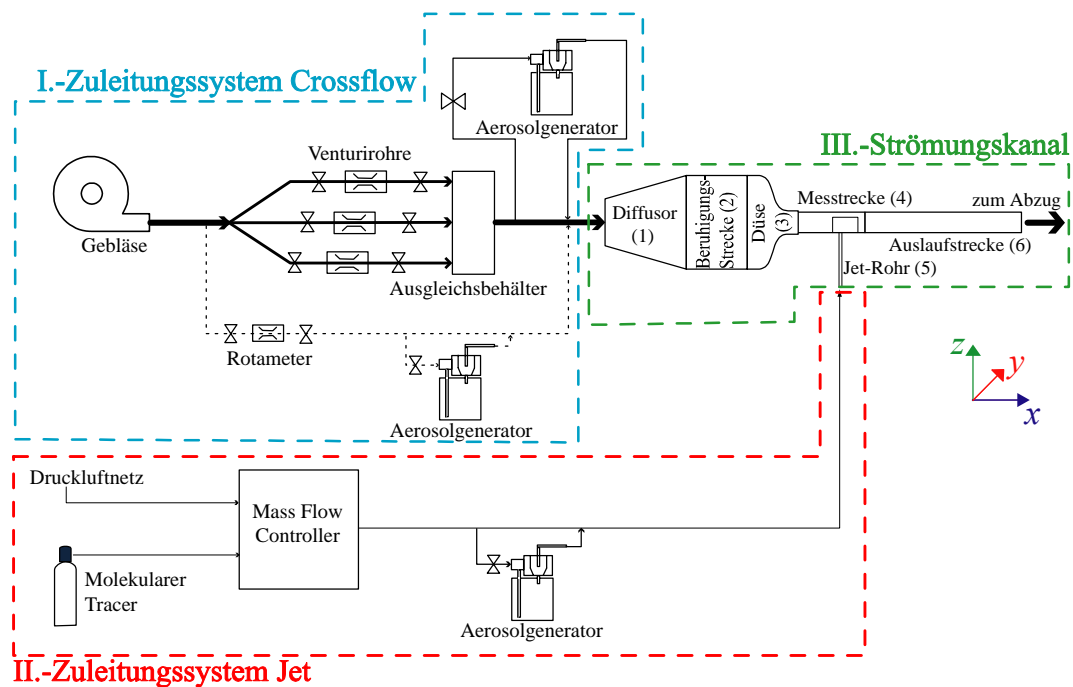


Abb. 1: Fließbild des experimentellen Aufbaus

Die in den Experimenten verwendete Koordinatenkonvention ist sowohl in Abb. 1 als auch in der schematischen Darstellung des 2d-PIV-LIF-Messsystems (siehe Abb. 2) zu erkennen. Der optische Aufbau unterteilt sich in 3 Bereiche: (1) Lichtquelle und Strahlführung, (2) Detektionsoptik und (3) Auswerte- und Synchronisiereinheit. Die x-Richtung ist die axiale Richtung des Crossflow, die y-Richtung die laterale Richtung des Crossflow und die z-Richtung parallel zur Jet-Orientierung. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich an der Austrittsebene mittig im Jet.

2d-LIF/PIV- Messsystem

Eine schematische Darstellung des angewendeten Messsystems wird in Abb. 2 gezeigt. Hauptkomponente hierbei ist ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser (Quantel Brilliant). Dessen Laserpuls (6 mm Durchmesser) wird mit Hilfe eines Galilei- Teleskops zu dem für die Versuche verwendeten Laserlichtschnitt (Breite: 48 mm, Dicke: ca. 300 μm) aufgeweitet. Um eine gleichmäßige Verteilung der Laserintensität über den gesamten Querschnitt zu gewährleisten, wird der Laserlichtschnitt durch eine Blende auf die gewünschten Dimensionen (Breite ca. 28 mm) gebracht und anschließend über den optischen Zugang (Quarzglasfenster) in die Messstrecke geleitet.

Die in dieser Schnittebene entstehenden Signale, einerseits das durch die beigemischten Öltröpfchen hervorgerufene Streulicht bei 532 nm, und andererseits die breitbandige Fluoreszenz (ca. 540 nm – 700 nm) des molekularen Tracers (NO_2), werden senkrecht zur Orientierung des Laserlichtschnitts auf den entsprechenden Sensor der jeweiligen CCD- Kamera abgebildet. Da NO_2 bei 532 nm absorbiert, wird zur Anregung von NO_2 einer der beiden Doppelpulse des PIV-Lasers verwendet, der auch zur Messung der Geschwindigkeit verwendet wird.

Wesentlicher Bestandteil der Detektionsoptik ist ein dichroitischer Spiegel (LOT 110582, R_{max} @ 532 nm, T_{max} 545 nm – 750 nm), der die spektrale Trennung der bei unterschiedlichen

Wellenlängen emittierten Lichtsignale bewirkt. Das von den Tracertröpfchen verursachte Streulicht wird durch den dichroitischen Spiegel in eine CCD-Kamera (Dantec 80C60 HiSense PIV/PLIF Kamera, 1280 x 1024 Pixels) reflektiert. Eine intensivisierte CCD-Kamera (Roper Scientific, PIMAX 512 x 512 Pixels) dient zur Aufnahme der vom molekularen Tracer erzeugten und vom dichroitischen Spiegel transmittierten Fluoreszenz.

Die detektierten Signale werden mit einem Personal Computer gespeichert. Anschließend werden das PIV-Signal mit dem Softwarepaket Dantec FlowManager Version 4.71 und das LIF-Signal als auch die Zuordnung der Daten beider Messsysteme mit einem in MatLab geschriebenen Programm ausgewertet.

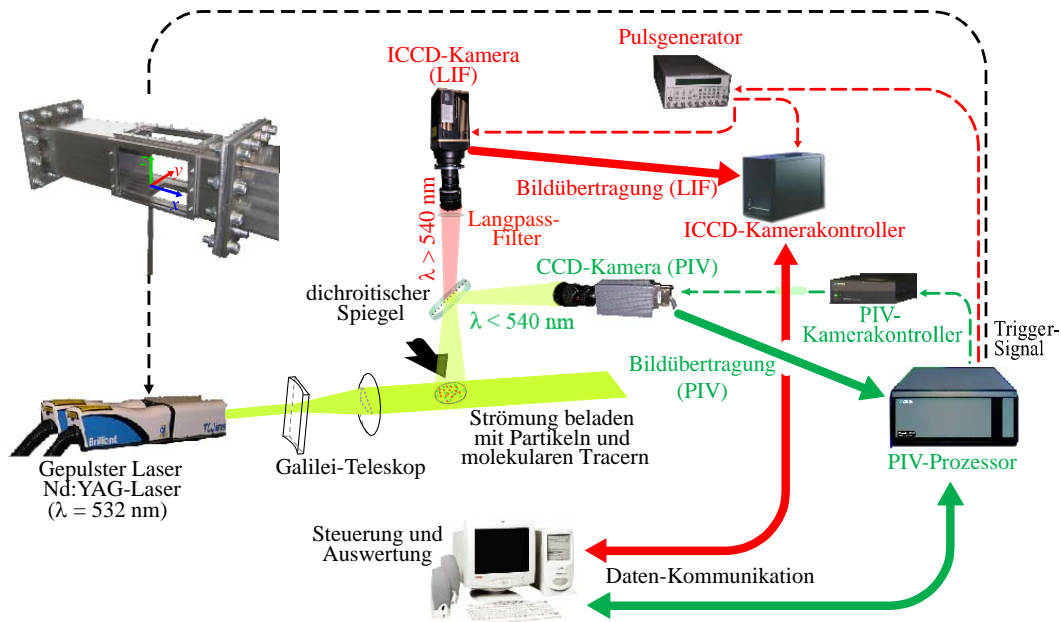


Abb. 2: Experimentelle Konfiguration des simultanen 2D-LIF/PIV- Messverfahrens. Zudem sind die Messstrecke und die Lage des Koordinatensystems dargestellt. $D_j = 8$ mm ist der Jetdurchmesser und $D_\infty = 108$ mm der hydraulische Durchmesser der Messstrecke.

Die Synchronisierereinheit besteht aus einem Pulsgenerator (SRS DG- 535), zwei Kamera-Controllern (Roper Scientific ST-133 Controller und DANTEC HiSense-Kamera-Controller) und einem PIV-Prozessor (Dantec FlowMap 1500 PIV System). Die Synchronisierereinheit dient dabei der zeitlichen Synchronisation zwischen dem Laserpuls und den beiden Kameras. Die Erfassung des gesamten Messbereichs mit dem Lichtband wird mittels einer 3d-Traversiereinheit realisiert. Eine detailliertere Beschreibung des Messsystemes ist in Cárdenas et al. 2007 zu finden.

Ergebnisse und Diskussion

Auswirkung eines drallbehafteten Jets-in-Crossflow

Um die Wirkung einer drallbehafteten Strömung auf die Mischgüte einer JCF-Konfiguration zu untersuchen, wurde die Jet-Strömung mit der in Abb. 3 dargestellten Dralldüse verdrallt. Die Motivation hierfür war, dass Drallströmungen häufig in Strahlmischern-Konfigurationen, wie z.B. bei Ventilationssystemen und Verbrennungsprozessen, eingesetzt werden, um das Mischen zu intensivieren.

Die Dralldüse besteht aus drei Teilen: (1) der Abdeckung und Führung der Düse ins Kanal-loch der Messstrecke, (2) dem Drallkörper und (3) dem Strömungsgleichrichter. Letzterer ist

gleichzeitig Verbindungsstück zwischen dem Zuleitungssystem des Jets und der Dralldüse. Hierbei wird die anfängliche Vertikalströmung durch die Kanäle im Drallkörper zunächst horizontal umgelenkt. Der Drall wird durch die Exzentrizität e der Kanäle erzeugt, wobei mit zunehmender Exzentrizität die Drallzahl $S = (D_j \cdot e \cdot \pi) / (2 \cdot n \cdot A_k)$ erhöht werden kann (Mundus et al. 1989). Hierbei stellt n die Anzahl der Tangentialkanäle und $A_k = h \cdot w$ deren Querschnittsfläche (siehe Abb. 3) dar.

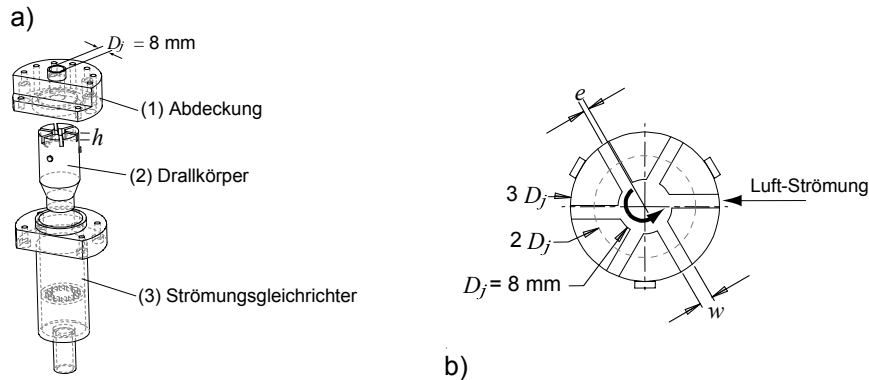


Abb. 3: a) Schematische Darstellung der Dralldüse, die aus drei Hauptkomponenten besteht: (1) Abdeckung, (2) Drallkörper und (3) Strömungsgleichrichter. b) Ansicht von oben des Drallkörpers: $S = 0,2$; $e = 0,8 \text{ mm}$ (Drehungsrichtung gegen den Uhrzeigersinn).

Wenn sowohl der Austrittsdurchmesser des Jets als auch das Geschwindigkeitsverhältnis r konstant gehalten und gleichzeitig die Drallstärke erhöht werden, würde die Eindringtiefe der Jet-Strömung in den Crossflow wesentlich abnehmen. Dieser Umstand ist im Hinblick auf die Zielsetzung einer möglichst guten Vermischung nachteilig. Siehe hierbei die Stromlinientrajektorie für die Fälle B, C und D in Abb. 4. Diese entsprechen jeweils einer drallbehafteten JCF-Konfiguration mit $S = 0,2, 0,4$ und $0,6$ und einen Austrittsdurchmesser gleich 8 mm .

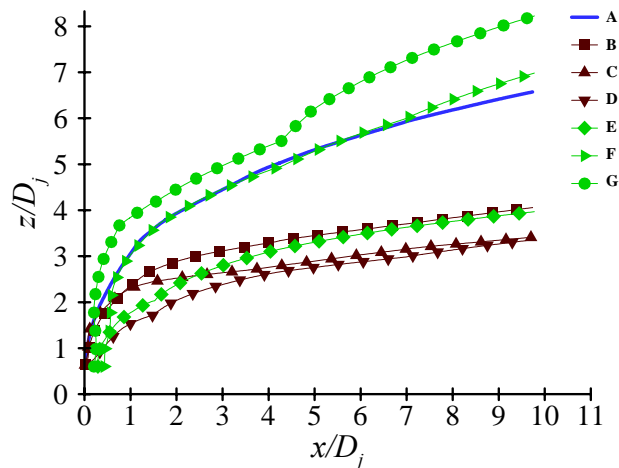


Abb. 4: Stromlinientrajektorie unterschiedlicher JCF-Konfigurationen: A: $Re_\infty = 3.000$, $r = 3$, $S = 0$ und $D_j = 8 \text{ mm}$. B: $Re_\infty = 3.000$, $r = 3$, $S = 0,2$ und $D_j^* = 8 \text{ mm}$. C: $Re_\infty = 3.000$, $r = 3$, $S = 0,4$ und $D_j^* = 8 \text{ mm}$. D: $Re_\infty = 3.000$, $r = 3$, $S = 0,6$ und $D_j^* = 8 \text{ mm}$. E: $Re_\infty = 3.000$, $r = 4$, $S = 0,4$ und $D_j^* = 6,9 \text{ mm}$. F: $Re_\infty = 3.000$, $r = 6$, $S = 0,4$ und $D_j^* = 5,7 \text{ mm}$. G: $Re_\infty = 3.000$, $r = 3$, $S = 0,4$ und $D_j^* = 4,9 \text{ mm}$.

Aus diesem Grund ist es zu erwarten, dass die Vermischung positiv beeinflusst werden kann, wenn die drallbehaftete Jet-Strömung so tief wie beim nicht verdrallten Fall den Crossflow penetriert. Hierbei wird die gesamte Querschnittsfläche des Crossflows für den Mischvorgang zur Verfügung stehen. Demzufolge wurde das Geschwindigkeitsverhältnis r so erhöht, dass die Trajektorie des drallbehafteten Jets zu der entsprechenden des nicht verdrallten Falls vergleichbar war. Um die damit einhergehende Änderung im Durchsatz der Jet-

Strömung zu vermeiden, wurde der Austrittsdurchmesser der Dralldüse D_j^* entsprechend reduziert, vergleiche Legende Abb. 4. Eine zum unverdrallten Fall A vergleichbar Trajektorie unter Beibehaltung des Durchsatzes wurde für den Fall F erhalten.

Ein Vergleich der Konfigurationen A und F bei zwei voneinander verschiedenen xy -Messebenen bei $z = 12$ und 24 mm ist in Abb. 5 dargestellt. Diese zeigt die zeitlich gemittelte, normierte Jet-Konzentration $\langle c \rangle = N^{-1} \sum_{i=1}^N C_i / C_{Jet}$ im Crossflow, der drallfreien (linke Spalte) und der drallbehafteten (rechte Spalte) Konfiguration, mit einer Reynoldszahl im Crossflow von $Re_\infty = U_\infty D_\infty / \nu_{kin} = 3.000$ und Geschwindigkeitsverhältnis $r = U_j / U_\infty = 3$. Hierbei stellen C_i die lokale NO_2 -Konzentration, C_{Jet} die maximale NO_2 -Konzentration im Jet (5.000 ppm), N die Anzahl der Aufnahmen und U_j und U_∞ die entsprechende Bulk-Geschwindigkeit im Jet bzw. im Crossflow dar.

Aufgrund der größeren Ausbreitung der Konzentrationsverteilung des drallbehafteten Jets bei der niedrigen Messebene ($z = 12$ mm) ist eine intensivere Vermischung beider Strömungen in der verdrallten Konfiguration zu erkennen. Andererseits zeigt bei der höheren Messebene ($z = 24$ mm) die dralldfreie Konfiguration eine bedeutsame Vergrößerung der Konzentrationsverteilung des Jets im Bezug auf die entsprechende der tieferen Messebene. Für den drallbehafteten Fall ist dieser Zuwachs wenig ausgeprägt. Dies ist der Beeinträchtigung des so genannten counter rotating vortex pair (CRVP) im verdrallten Fall zu zuschreiben. Das CRVP stellt eine für Transportphänomene bzw. für Vermischung maßgebliche Struktur einer JCF-Konfiguration dar, welche direkt am Austritt des Jets noch nicht vollständig entwickelt ist. Dieses ist erst nach einigen Strahldurchmessern entlang der Trajektorie des Jets voll ausgebildet und es dann letztendlich das Strömungsfeld des Jets dominiert (Smith et al. 1998, Perry et al. 1993).

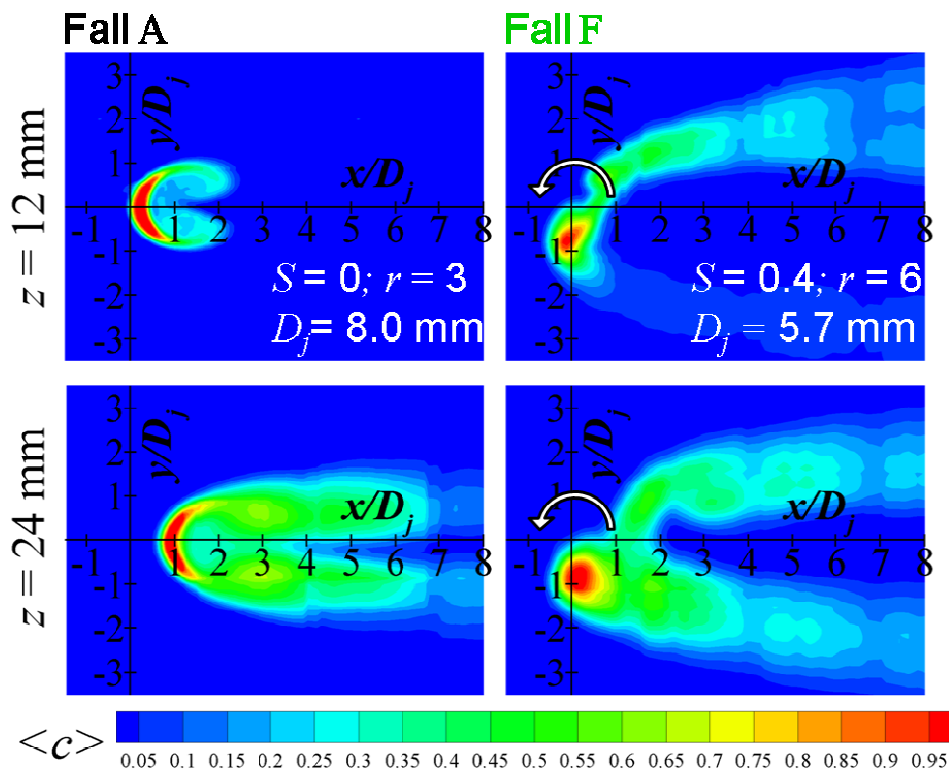


Abb. 5: Mittlere normierte Jet-Konzentration $\langle c \rangle$ für die dralldfreie Konfiguration A (linke Spalte) und für die drallbehaftete Konfiguration F (rechte Spalte) bei $z = 12$ mm (oben) und 24 mm (unten).

Beeinfluss der Reynoldszahl auf die Vermischung

In weiteren Untersuchungen wurden zwei ähnliche JCF-Konfigurationen mit unterschiedlichem Turbulenzniveau ausgewählt, „Low-Re“ ($Re_\infty = 4.120$, $Re_j = 1.070$, $r = 3,5$) und „High-Re“ ($Re_\infty = 8.240$, $Re_j = 2.140$, $r = 3,5$).

Abb. 6 zeigt exemplarisch einen Vergleich experimentell ermittelter axialer (linke Spalte) und lateraler (mittlere Spalte) Reynolds-Flüsse zusammen mit jeweils einer entsprechenden momentanen LIF-Aufnahme bei einer Höhe von $z/D_j = 2,5$ für die beiden JCF-Konfigurationen, „Low-Re“ und „High-Re“.

Aus dieser Abbildung kann man entnehmen, dass bei der Low-Re-Konfiguration bei beiden Reynolds-Flüssen schärfere Konturen der Strukturen im Gegensatz zu den entsprechenden bei der High-Re-Konfiguration zu erkennen sind. Darüber hinaus ist es ersichtlich, dass die Größe der Wirbelstrukturen bei höherer Reynolds-Zahl wesentlich größer ist. Dies zeigt einerseits, dass bei höherer Reynolds-Zahl eine instabilere Strömung vorliegt. Ferner stellen die Reynolds-Flüsse und -Spannungen rein mathematisch gesehen nicht normierte Korrelationskoeffizienten dar, so dass andererseits die größeren Werte für die Reynolds-Flüsse bei höherer Reynolds-Zahl stärkere Korrelationen zwischen den Schwankungen der Geschwindigkeit und denjenigen der Konzentrationen anzeigen. Aufgrund dessen ist unmittelbar einsichtig, dass die Werte für die Reynolds-Flüsse und -Spannungen ein Maß für den (erhöhten) Stoffaustausch einer turbulenten Strömung darstellen, wie dies aus der Gleichung (3) zu erwarten ist.

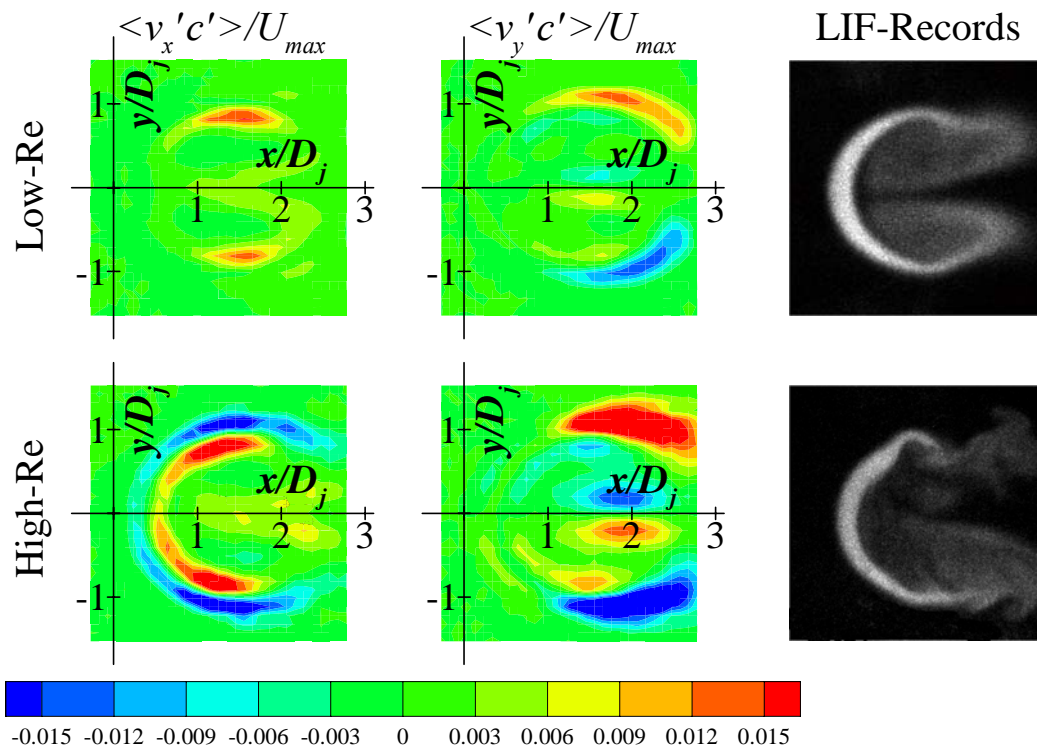


Abb. 6: Experimentell ermittelte axiale (linke Spalte) und laterale (mittlere Spalte) Reynolds-Flüsse und LIF-Aufnahmen (rechte Spalte) bei einer Höhe von $z/D_j = 2,5$. Reynolds-Zahl ist $Re_\infty = 4.120$ (oben) und $Re_\infty = 8.240$ (unten) und das Geschwindigkeitsverhältnis von jeweils $r = 3,5$.

Dies hat zur Folge, dass die experimentelle Ermittlung der Reynolds-Flüsse nicht nur in Hinblick der Validierung und Entwicklung von Turbulenz- bzw. Mischungs-Modelle von Bedeutung sind, sondern auch eine wichtige Rolle bei der Quantifizierung der Mischgüte spielen. Aus der Literatur sind über 35 unterschiedlich statistische Mischungsindizes bekannt (Boss 1986, Bothe et al. 2007). Diese weisen dennoch für die Charakterisierung der Vermischung

in einer JCF-Konfiguration im Allgemeinen Inkonsistenzen auf. Manche benötigen sogar die Festlegung eines Evaluationskriteriums, das den Wert des entsprechenden Indizes stark beeinflussen kann. Beispielweise sei die für die Bestimmung des Indexes betrachtende Fläche und der Betrag der Jet-Konzentration in der betrachtenden Stelle genannt.

Dankesworte

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Vorhabens im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1141: „Analyse, Modellbildung und Berechnung von Strömungsmischern mit und ohne chemische Reaktionen“. Weiterhin möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. B. Ruck für die hilfreiche Beratung beim Entwurf des Jet-in-Crossflows sowie bei Herrn Prof. Dr. M. Gabi bedanken, in dessen Werkstatt die Kontraktionsdüse gefertigt wurde.

Literaturverzeichnis

- Boss, J., 1986: "Evaluation of a homogeneity degree of a mixture" Bulk Solids Handling, pp: 1207.
- Bothe, D., Warnecke, H., 2007: "Berechnung und Beurteilung strömungsbasierter komplex-laminarer Mischprozesse." Chemie Ingenieur Technik, pp. 1001-1014.
- Cárdenas, C., Suntz, R., Denev, J.A., und Bockhorn, H., 2007: "Two-dimensional estimation of reynolds-fluxes and -stresses in a jet-in-crossflow arrangement by simultaneous 2d-LIF and PIV." Applied Physics B: Lasers and Optics, pp. 581–591.
- Hixson, A., 1944: "Agitation and mixing - nature and measure of agitation." Industrial and Engineering Chemistry, pp. 487-496.
- Margason, R.J., 1999: "Fifty years of jet in cross flow research" In Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow, CP-534. AGARD.
- Mundus, B., Kremer, H., 1989: "Untersuchung der strömungstechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Bauformen von Drallerzeugern." Gas Wärme International, pp. 1989: 205-211.
- Özcan, O., Meyer H., Larsen, P., Westergaard, P., 2001: "Simultaneous measurements of velocity and concentration in a jet in channel-crossflow." Proceedings of FEDSM, ASME Fluids Eng. Div. Summer Meeting.
- Perry, A., Kelso, M., Lim, T. 1993: "Topological structure of a jet in cross flow." AGARD-CP- 534 conf. proc. Winschester, U.K.
- Pope, S., 2000: Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rushton, J., 1946: "Mixing." Industrial and Engineering Chemistry.
- Schlünder, E-U., 1996: "Einführung in die Stoffübertragung." Wiesbaden, Vieweg
- Smith, S., Mungal, G., 1998: "Mixing, structure, and scaling of the jet in crossflow." J.Fluid Mech., pp. 83-122.
- Su, L., Mungal, M., 1999: "Simultaneous measurements of velocity and scalar fields: application in crossflowing jets and lifted diffusion flames". Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs.