

ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG DER WANDNAH LED-INDUZIERTEN FLUORESCENZ-METHODE

DEVELOPEMENT AND APPLICATION OF THE NEAR WALL LED-INDUCED FLUORESCENCE METHOD

M. Kuschewski, R. Kulenovic, E. Laurien

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart

LED-induzierte Fluoreszenz, wandnahe Messung, Schweißnaht, Dichteschwankungen
LED-induced Fluorescence, near wall measurement, weld seam, density fluctuations

Zusammenfassung

Die detaillierte Untersuchung von instationären Strömungen bedarf der Anwendung bildgebender Messverfahren. Mit der wandnahen, LED-induzierten Fluoreszenz-Methode steht erstmals ein optisches Messverfahren zur Verfügung, welches auch für Flüssigkeitsströmungen mit großen Dichteunterschieden eingesetzt werden kann. Im Fokus der vorliegenden Untersuchung steht der Einfluss einer Schweißnahtwurzel auf die geschichtete Strömung in der Mischungszone eines horizontal liegenden T-Stücks. Mittels PIV wurde das Strömungsfeld einer isodensen Vermischung in der Nähe eines Schweißnahtwurzelmodells vermessen. Anschließend wurde eine mit gelöstem Zucker erzeugte Schichtenströmung mittels induzierter Fluoreszenz untersucht und der Einfluss der Schweißnahtwurzel auf die Vermischung und wandnahe Dichtefluktuationen ermittelt. Die Kreuzkorrelation erweist sich als probates Mittel zur Bestimmung der Kohärenzlängen und Konvektionsgeschwindigkeiten von Strukturen in der Wandnähe auf Basis der Fluoreszenzbilddaten.

Einleitung

Instationäre, nicht-isotherme Strömungen verursachen Temperaturfluktuationen in den sie umgebenden Strukturen. Die resultierenden inhomogenen Temperaturfelder in den Strukturen führen zu einer Änderung des lokalen Spannungszustandes. Infolge mechanischer Dissipation kann es hierdurch zur lokalen Rissbildung und zum Versagen der Struktur kommen. Besonders gefährdet sind z. B. Rohrleitungssysteme mit T-Stück-Verbindungen. Dort wird mitunter kalte Flüssigkeit in einen warmen Strang eingespeist, was zur Ausbildung einer Schichtenströmung führt (Chapuliot 2009), (Hofstötter 1999). In der Schichtenströmung sind die Mischungswege aufgrund der stabilisierenden Dichteunterschiede länger. Dadurch bedingt treten relativ große Temperaturfluktuationen weit stromab der Verbindungsstelle auf. Von besonderem Interesse sind diesbezüglich Schweißnahtwurzeln, in deren Umgebung vermehrt Rissbildung beobachtet wird. Unbeschliffene Schweißnahtwurzeln ragen aus der zähen Fluidunterschicht in die Strömung hinein und nehmen potenziell Einfluss auf die Strömungs-/Strukturinteraktionen. Auf Basis hoch konzentrierter, fluoreszierender Farbstoffe ist es mit der induzierten Fluoreszenz-Methode möglich, den Einfluss der Schweißnahtwurzel auf die Vermischung und die wandnahen Dichte-/Mischungsskalar-fluktuationen zu untersuchen. Es stellt ein bildgebenes Messverfahren für Flüssigkeitsströmungen mit großen Dichteunterschieden dar, da sich der örtliche Messbereich auf den wandnahen Bereich beschränkt und es deshalb unabhängig vom Brechungsindexverlauf im Strömungsmedium ist.

Versuchsanlage

Die Versuchsanlage besteht aus einem offenen Wasserkreislauf mit zwei separaten Versorgungstanks und einem Sammelbehälter. Das unbeheizte Wasser wird mittels zweier Tauchpumpen in zwei horizontal ausgerichtete Rohrstränge gepumpt, welche sich in einem scharfkantigen, rechtwinkligen T-Stück vereinigen. Mittels Schrägsitzventilen wird der Volumenstrom reguliert. Die Innendurchmesser (ID) der Rohre betragen für den Neben- bzw. Hauptstrang 35,5 mm und 71 mm. Beide Rohre sind mit Einlasskonditionierern ausgestattet, welche unterschiedliche Netze und einen Gleichrichter beinhalten. Sie sind an Zuleitungen mit Einlaulängen größer 48 ID angeschlossen. Für den optischen Zugang ist ein Glasrohr eingebaut. Dieses ist zur Kompensation der Brechungsindexunterschiede von einem transparenten Behälter aus PVC- und Glas-Elementen umgeben. Stromabwärts vom transparenten Behälter sind zwei Rohrelemente installiert, bevor ein Schlauch das Wasser in den Sammelbehälter leitet. Jedes Segment hat eine Länge von 340 mm (4,7-ID der Hauptleitung), so dass eine Rückwirkung des ausströmende Fluids vernachlässigt werden kann.

Eine vereinfachte schematische Darstellung der Leitungssysteme und Instrumentierung ist in Abb. 1 zu sehen.

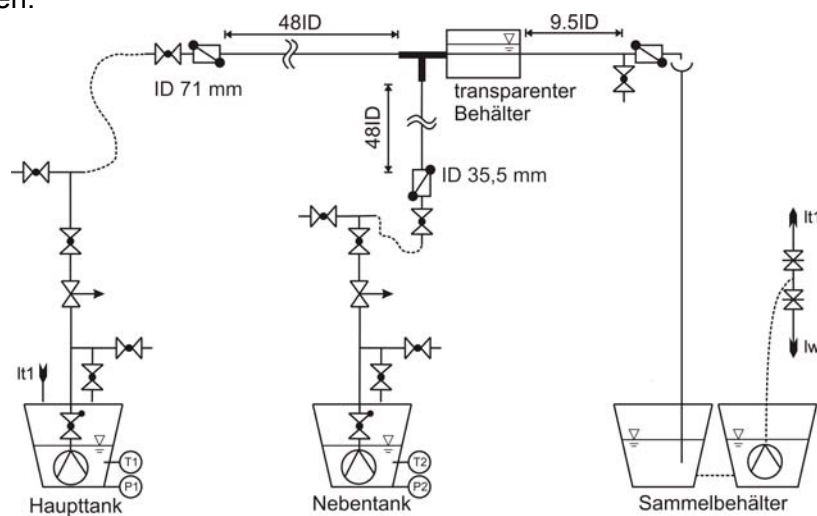


Abbildung 1: Versuchsanlage mit T-Stück und optischer Zugänglichkeit

Messverfahren

Die Massenströme und die entsprechenden mittleren Temperaturen werden konventionell mittels Durchflussmessern und Thermoelementen gemessen. Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsprofile wurde die Particle-Image-Velocimetry (PIV) Messtechnik verwendet. Für die klassische planare Zwei-Komponenten PIV (2C-PIV) wurden zwei senkrecht zueinander stehende Fenster des transparenten Behälters verwendet. Eine Laserlichtebene wurde durch ein Schlitzfenster parallel zur Rohrachse orientiert. Die PIV-Kamera war senkrecht zum Lichtschnitt ausgerichtet.

Optische Methoden wie die PIV können nicht für Systeme mit relativen Brechungsindexunterschieden von mehr als 0,25 % im Strömungsmedium verwendet werden. Dies entspricht einer Dichtedifferenz von 1 % in Wasser, z. B. hervorgerufen durch einen Temperaturunterschied von 30 K. Aus diesem Grund ist der Einsatz der PIV-Methode auf Fälle ohne oder mit sehr kleine Dichtedifferenzen beschränkt. Für alle anderen Untersuchungen ist es erforderlich, optische Verfahren zu verwenden, die den wandnahen Bereich fokussieren.

Das sogenannte wandnah LED-induzierte Fluoreszenz-Verfahren ermöglicht die Bestimmung der instationären Temperatur- oder Dichtefelder in einem wandparallelen Messbereich. Hierfür wird mittels hoher Konzentrationen fluoreszierender Farbstoffe im Strömungsmedium ein optisch „dichtes“ System eingestellt, welches mittels Leuchtdiodenlicht angeregt wird. Die in die Farbstofflösung einfallende Lichtintensität fällt exponentiell mit dem Wandabstand ab. Dadurch bedingt erfolgt die Absorption des Anregungslichts innerhalb einer dünnen Schicht

nahe der Wand. Die gewonnenen Informationen stammen nur aus dieser angeregten, wandparallelen Schicht. Das LED-IF-Verfahren ist somit unabhängig vom Brechungsindexverlauf im restlichen Strömungsmedium. Der in dieser Arbeit verwendete LED-IF-Aufbau ist in Abb. 2 darstellt.

Eine LED-Lichtquelle (1) emittiert grünes Licht, welches mit einem Anregungsfilter gereinigt wird. Der diachronische Spiegel (2) lenkt das Licht in Richtung des Rohres. Seine Reflektivität ist eine Funktion der Wellenlänge, so dass eine Kamera (3) das Fluoreszenzlicht, welches vom Farbstoff in der Anregungszone (4) ausgesendet wird und den Emissionsfilter passiert, erfassen kann. Mit Hilfe eines Photodetektors wird die Leistung der LED überwacht. Die Position der Kamera bleibt für beide Messverfahren (PIV, LED-IF) und allen beschriebenen Messungen unverändert.

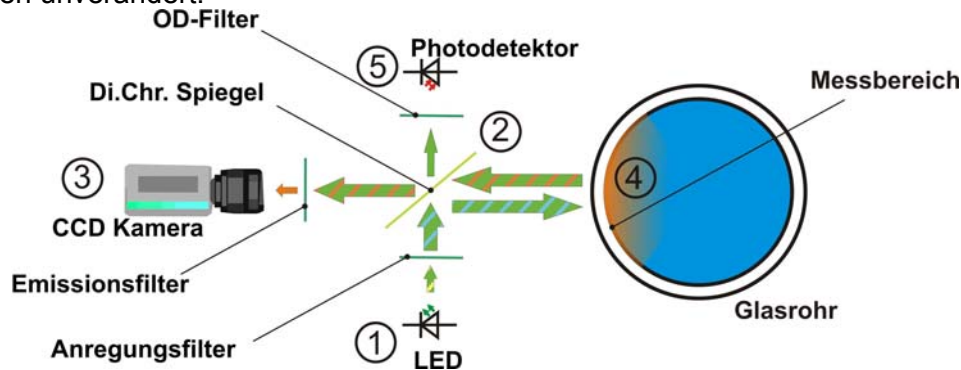


Abbildung 2: Aufbau der wandnah LED-induzierten Fluoreszenz-Methode

Die Bestimmung der Mischungsskalarverteilung bzw. der Dichteverteilung bei isothermen Bedingungen bedarf zweier Farbstoffe, die getrennt in das System eingebracht werden (vgl. Walker 1985). Für die vorgestellten Experimente wurden Rhodamin 6G und Rhodamin B verwendet. Beide Farbstoffe absorbieren Licht im Wellenlängenbereich um 532 nm, emittieren Fluoreszenzlicht im optischen Bereich > 570 nm und können unter Zuhilfenahme von Lösungsvermittlern hinreichend hoch konzentriert werden. Der Unterschied in der Lichtausbeute bei gleicher Anregungsintensität ermöglicht die Mischungsskalarbestimmung.

Schweißnahtwurzelmodell

Die Rohrleitungssegmente bestehen aus gezogenen Polymerrohren. Resultierende Spalte zwischen den Segmenten wurden auf ein Minimum reduziert, um mögliche Einflüsse zu minimieren. Die einzige geometrische Diskontinuität, welche für das Rohr vorgesehen wurde, ist ein Schweißnahtwurzelmodell (siehe Abb. 3). Dabei handelt es sich um einen Torus aus Edelstahl, dessen Außendurchmesser reduziert wurde. Weniger als die Hälfte des Rings blieb nach der Bearbeitung erhalten, sodass der Kontaktwinkel zwischen Glas und Ring kleiner als 90° ist. Der Torusring ist an einer Stelle geöffnet. Auf diese Weise kann er vorgespannte wie eine Feder in das Glasrohr eingesetzt werden.

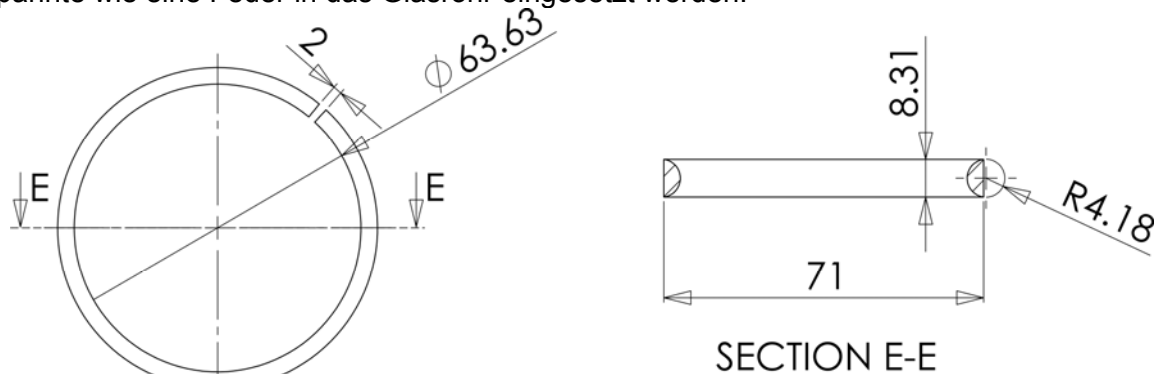


Abbildung 3: Geometrie der Schweißnahtwurzelnachbildung

PIV-Experimente

An der Versuchsanlage wurde eine Vielzahl von PIV-Messungen mit und ohne Schweißnahtwurzelmodell unter isodensen Bedingungen durchgeführt. Eine genaue Übersicht mit Beschreibung der Versuchsparameter und Auswerteeinstellungen findet sich in (Kuschewski 2011). In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Versuchsergebnisse mit Schweißnahtmodell und T-Stück-Vermischung vorgestellt. Das Schweißnahtmodell wurde mit einer Übermaßpassung im Hauptstrang 2,6 Durchmesser stromab des T-Stücks positioniert. Als Steupartikel wurden HGS10 Partikel von Dantec Dynamics verwendet. Die Datenaufnahme und Datenanalyse wurde mit Dynamic Studio V3.14, ebenfalls von Dantec Dynamics durchgeführt. In Tabelle I sind die Messeinstellungen für die PIV-Messungen aufgeführt.

Tabelle I Messeinstellungen der PIV-Messungen

| | |
|--|---|
| Kamera | FlowSense 4M |
| Objektiv | Zeiss Macro Planar T* 2/50 + 5 mm Zwischenring |
| Blendeneinstellung | 22 |
| Bildaufnahmerate | 7,4 Hz |
| Bildpaare | 400 |
| Bildelementabstand | 7,4 μm x 7,4 μm |
| Messbereichsgröße | 75,78 x 75,78 mm |
| Grauwertauflösung | 12 Bit |
| Dicke der Laserebene | ca. 0,4 mm |
| Ausrichtungs-/ Positionierungs-/ Kalibrierfehler | +/- 0,5 mm |
| Max. Partikelverschiebung | 9-14 Bildelemente |
| Partikelbilddurchmesser | 3-4 Bildelemente |

Experimentelle Ergebnisse

In Tabelle II sind die ausgewählten, isodensen T-Stück-Experimente mit den entsprechenden Volumenstromberechnungen basierend auf PIV-Ergebnissen zusammengefasst.

Tabelle II Versuchsrandbedingungen und PIV-Ergebnisse

| Experiment Nr. | Drucksensoren | | PIV | |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| | Q_{Haupt} [l/s] | Q_{Neben} [l/s] | Q_{Misch} [l/s] | Erkennungsrate |
| 7 | 0,41 +/- 0,07 | 0,16 +/- 0,06 | 0,68 | ~ 90 % |
| 8 | 0,74 +/- 0,08 | 0,33 +/- 0,07 | 1,29 | ~ 92 % |
| 9 | 0,72 +/- 0,07 | 0,51 +/- 0,07 | 1,43 | ~ 92 % |
| 10 | 0,73 +/- 0,08 | 0,96 +/- 0,08 | 1,76 | ~ 84 % |

Die resultierenden Vektorkarten des PIV-Experiments Nummer 7 wurden statistisch ausgewertet und die Stromlinien für das zeitlich gemittelte Strömungsfeld berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Strömung tritt von links in den Messbereich ein und passiert die Schweißnahtwurzel in der Bildmitte. Zwei Rezirkulationszonen stromabwärts der Schweißnaht können identifiziert werden. Sie haben eine axiale Ausdehnung von ungefähr drei Schweißnahtdurchmessern, was $l / D = 0,23$ entspricht.

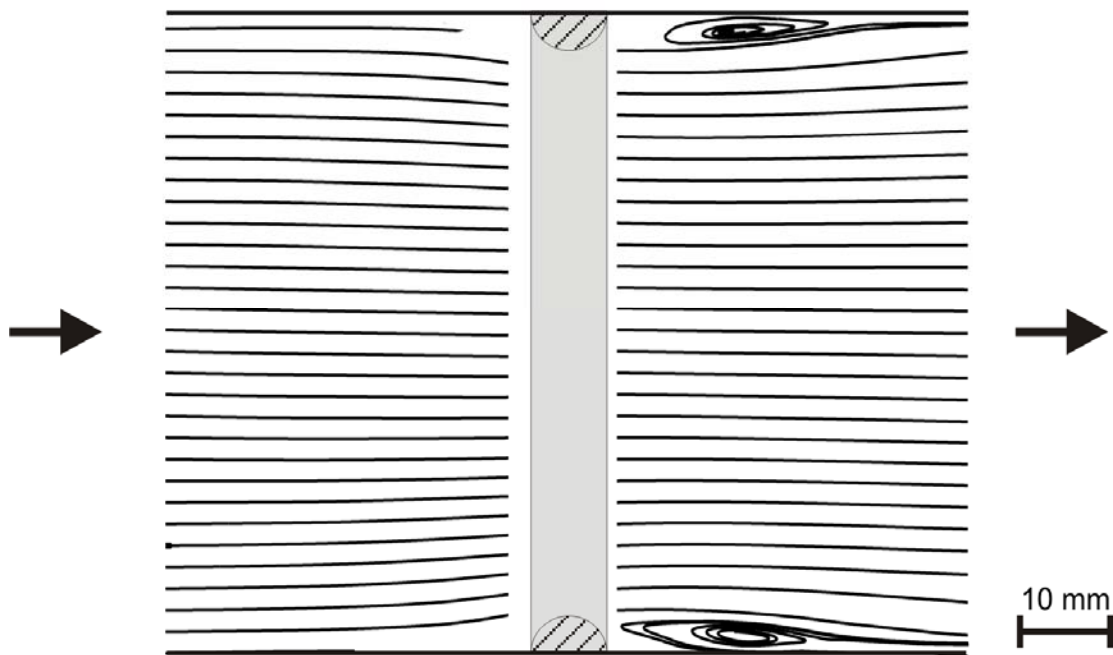


Abbildung 4: Stromlinienbild des Strömungsfeld einer Schweißnahtwurzelnachbildung in einem Rohr

Die mittleren axialen Geschwindigkeiten für die Experimente 7 bis 10 sind in Abb. 5 (links) zusammengefasst. Für die Untersuchungsfälle $Q_{\text{Haupt}} / Q_{\text{Neben}} > 1$ besitzen die Profile nur ein Maximum, welches zumeist nicht auf der Rohrachse liegt. In den Versuchen mit kleineren Volumenstromverhältnissen liegt ein M-förmiger Geschwindigkeitsverlauf vor. Die Schweißnahtwurzel führt zu einer Kompression und Abflachung der Geschwindigkeitsprofile mit normierten Werten zwischen 1,1 und 1,2 über 70% des Rohrdurchmessers.

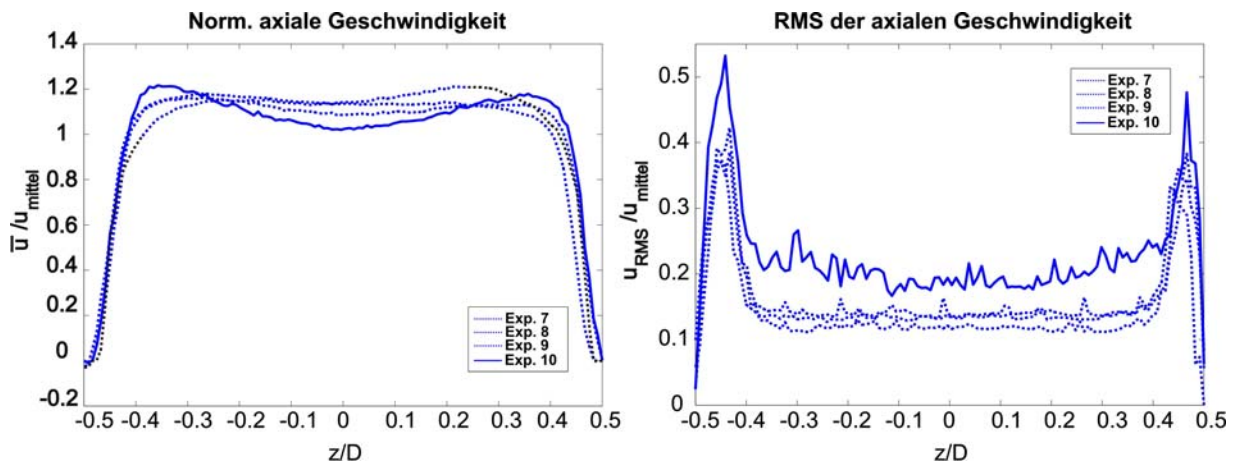


Abbildung 5: Zeitlich gemittelte und RMS-Profile der axialen Geschwindigkeitskomponente $x/D = 0,3$ stromab des Schweißnahtwurzelmmodells

Die mittleren Geschwindigkeitsgradienten in der Nähe der Wände sind gegenüber den Konfigurationen ohne Schweißnaht reduziert. Die RMS-Verteilungen sind in Abb. 5 (rechts) dargestellt. Sie besitzen relativ flache Profile in der Mitte des Rohrs und steile Flanken nahe an der Wand. Die Schweißnaht führt in allen Fällen zu einer Erhöhung der Fluktuationen in Wandnähe.

Wandnahe LED-induzierte Fluoreszenz Untersuchungen

Ergänzend zu den PIV-Experimenten wurden Untersuchungen mit der wandnah LED-induzierten Fluoreszenz-Methode durchgeführt. Die Versuchsstandskonfiguration war unverändert zu den T-Stück-Untersuchungen. Zucker wurden dem Wasser des Nebenstrangs zugeführt, um die Dichte zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurden 36,35 kg Saccharose in 219,6 kg Leitungswasser gelöst. Der resultierende Dichteunterschied zwischen den beiden Strängen entsprach dem einer nicht-isothermen Vermischen von Wasser mit 20 °C und 120 °C. Die Schweißnaht wurde in der Mischungszone des T-Stücks $x/D = 4$ stromabwärts von der Verbindungsstelle installiert. Das Kamera-Objektiv (60 mm AF Micro-Nikkor) war auf Blende 11 eingestellt und fokussiert auf die Rohrrinnenwand. Dies gewährleistete eine gute Ausleuchtung des CCD-Sensors und eine geringe optische Verzerrung. Die Hamatsu 0804C Kamera wurde mit 2 x 2 Bildelementverknüpfung betrieben, um die Empfindlichkeit und die Aufzeichnungsrate des Systems auf 15 Bildern pro Sekunde zu erhöhen. Die daraus resultierende Größe des Beobachtungsbereichs war 638 Pixel x 504 Pixel entsprechend einer Bilddimension 54,59 mm x 43,13 mm. Die Bilder wurden mit niedriger Verstärkung und 12 Bit Graustufenauflösung aufgezeichnet.

In Tab. III sind die Einstellungen für das Experiment zusammengefasst. Die Fließgeschwindigkeit wird anhand von Drucksensor-Signalen berechnet und ist um die Dichteunterschiede korrigiert. Es sei angemerkt, dass die PIV-Ergebnisse auf eine Unterschätzung der Strömungsrate auf Basis der Druckmessungen von etwa 10-25% hinweisen.

Tabelle III Versuchparameter und Flüssigkeitseigenschaften in den Fluoreszenz-Untersuchungen

| | Temperaturen [°C] | Volumenstrom [l/s] von Drucksensoren | Dichte [kg/m³] | Viskosität [mPa s] | Reynoldszahl |
|--------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------|--------------|
| Hauptstrang (ID 71 mm) | 20 +/- 1,5°C | 0,182 +/- 0,09 | 998,21 | 1,0016 | 3253 |
| Nebenstrang (ID 35.5 mm) | 20 +/- 1,5°C | 0,0686 +/- 0,06 | 1056 | 1,5299 | 1605 |
| Mischstrang | 20 +/- 1,5°C | Summe: 0,247 | 1013 | 1,077 | 4165 |

Der im Nebenstrang zugeführte Zucker erhöht die Dichte und Viskosität des Wassers. Das Dichteverhältnis einer Zuckerwassermischung und einer nicht-isothermen Vermischung von Wasser ist gleich, falls $T_{kalt} = 20\text{ °C}$ und $T_{warm} = 120\text{ °C}$ sind (Schiweck 2002).

$$\frac{\rho_{\text{Zuckerwasser}(brix=14,2)}}{\rho_{\text{Wasser}20\text{ °C, std. Druck}}} = \frac{1056}{998,21} \approx 1,05789 \approx \frac{\rho_{\text{Wasser}20\text{ °C, 75bar}}}{\rho_{\text{Wasser}120\text{ °C, 75bar}}} = \frac{1001,6}{946,72} \approx 1,05797$$

Die Dichteverhältnisse sind in diesem Fall:

$$\frac{\eta_{\text{Zuckerwasser}(brix=14,2)}}{\eta_{\text{Wasser}20\text{ °C, std. Druck}}} = \frac{1,5299}{1,0016} \approx 1,527 < \frac{\eta_{\text{Wasser}20\text{ °C, 75bar}}}{\eta_{\text{Wasser}120\text{ °C, 75bar}}} = \frac{0,99862}{0,23397} \approx 4,225$$

Für die Anwendung des wandnah LED-induzierten Fluoreszenz-Verfahrens bedurfte es in jedem Strang eines absorbierenden Farbstoffs. Die Konzentration von Rhodamin 6G und Rhodamin B lag bei $0,5\text{ mol / m}^3$, sodass in beiden Flüssigkeiten eine Eindringtiefe von grünem Licht von circa 1 mm erzielt wurde.

Experimentelle Ergebnisse

Die Aufzeichnung der Daten startete 10 Sekunden nach Einschalten der Pumpen. Innerhalb von 20 Sekunden wurden 300 Bilder aufgezeichnet. Über den Messzeitraum variierte die LED-Leistung um vernachlässigbare +/-0,065%.

Im Folgenden sind die Auswertungsschritte für die Bilddaten dargestellt:

- Aufnahme von Dunkelbildern für die Korrektur des Dunkelstromfehlers.
- Aufzeichnung der Fluoreszenzlichtverteilung in Abhängigkeit von der Anregungslichtintensität.
- Auswertung der aufgezeichneten Anregungslichtintensität und Berechnung der Normierungsmatrix auf Basis der bestimmten Werte.
- Normierung der Einzelbilder.
- Umrechnen der Grauwerte zu Dichteinformationen (Annahme: direkt proportional) .
- Auf Basis der Standardtabellen der IAPWS werden die Dichteinformationen zu assoziierte Temperaturen umgerechnet (IAPWS 1996), (Wagner 2002).

Der resultierende Messfehler für die assoziierten Temperaturen ist abhängig von der gemessenen Temperatur. Für die kleinsten berechneten Temperaturen (nur Flüssigkeit aus dem Seitenstrang) lag der Fehler bei +/- 2 K. Für die maximale Temperatur (nur Flüssigkeit aus dem Hauptstrang) betrug die Unsicherheit +/- 12 K bei einer Einzelauswertung der Bildelemente.

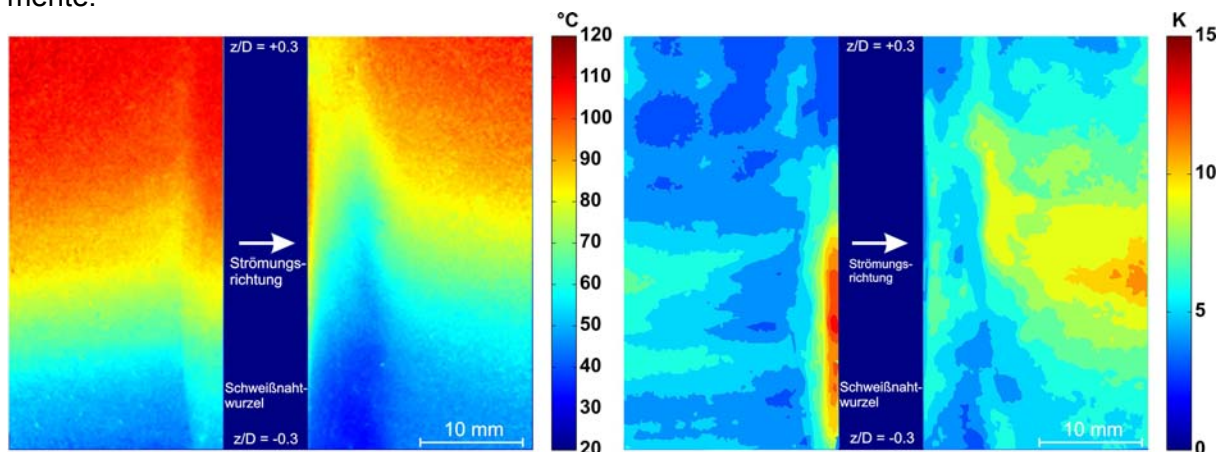


Abbildung 6: Dichteverteilung der Schichtenströmung umgerechnet in assoziierte Temperaturen; Mittlere Temperaturverteilung (links), RMS-Werte (rechts)

Die zeitlich gemittelte, assoziierte Temperaturverteilung ist in Abb. 6 (links), dargestellt. Die Strömung tritt von links in den Messbereich ein und überströmt die Schweißnahtwurzelbildung in der Bildmitte. Letztere verursacht zwei Rezirkulationszonen. Eine Rezirkulationszone liegt stromab mit einer Länge von etwa einem Schweißnahtdurchmesser. Die andere Rezirkulationszone bildet sich stromaufwärts mit einer Länge von etwa 1/3 des Schweißnahtwurzeldurchmessers. Die Rezirkulationszone stromab transportiert dichtere Flüssigkeit von unten nach oben, während stromaufwärts das Gegenteil der Fall ist. Letzteres verursacht RMS-Temperaturwerte bis zu 14 K (entspricht 14 % der Temperaturdifferenz) in einer Zone nahe an und parallel zu der Schweißnahtwurzel (s. Abb. 6 (rechts)). Ein ähnlicher Effekt kann in der zweiten Rezirkulationszone nicht gesehen werden. Eine Überhöhung der RMS-Werte tritt erst weiter stromab im Scherschichtbereich der Strömung auf.

Für die nähere Betrachtung der Vorgänge in der Nähe der Schweißnaht wurden die Bilddaten in 32 x 32 Bildsegmente unterteilt und die mittleren Grauwerte zu jedem Zeitpunkt für diese Segmente bestimmt. Die resultierenden Zeitreihen wurden mittels einer normierten Kreuzkorrelation ausgewertet. Ergebnis der Berechnung ist zum einen eine Korrelationsebene R_{xy} mit 32 x 32 Segmenten, wobei jedes Segment reelle Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Sie gibt Auskunft über die Formähnlichkeit von Strukturen einzelner Segmente. Zum anderen resultiert aus der Phasenauswertung der Kreuzkorrelation eine Zeitverschiebungsebene. Diese gibt Auskunft über die zeitliche Abfolge von Ereignissen bzw. die Ausbreitungsrichtung von Strukturen.

In Abb. 7 bis 10 sind die Korrelations- und Zeitverschiebungsebenen von unterschiedlichen Elementen dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber werden nur Segmente mit Korrelationswerten $> 0,5$ und in der Zeitverschiebungsebene mit Werten $< 0,5$ s angezeigt.

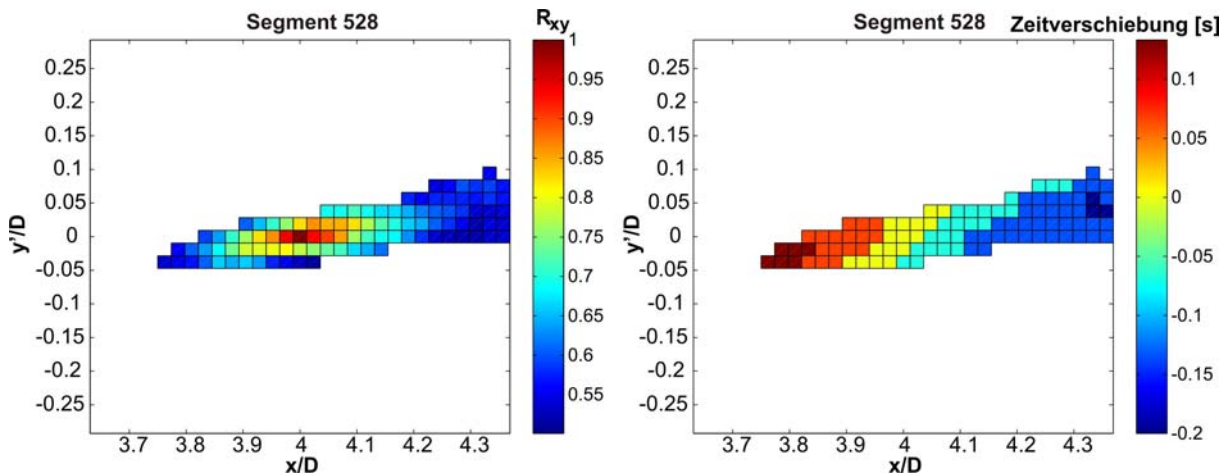


Abbildung 7: Kreuzkorrelationskoeffizient R_{xy} (l) und Zeitverschiebungsverteilung (r) für die wandnahen Dichteschwankungen ohne Schweißnahtwurzelnachbildung

Für Abb. 7 wurde das Element 528 für den Fall ohne Schweißnahtwurzelnachbildung ausgewählt. Das Segment liegt bildmitten bei $x/D = 4$ und $y'/D = 0$. Es ist gut zu erkennen, dass die Kohärenzlänge der Strukturen im Bereich von $l/D = 0,3$ liegen und das Längen zu Höhenverhältnis etwa 3 beträgt. Die Strukturen konvektieren in axialer Richtung mit einer kleinen Umfangskomponente. Unter der Annahme einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit errechnet sich aus der Zeitverschiebung und den räumlichen Abmessungen eine Konvektionsgeschwindigkeit von 136 mm/s.

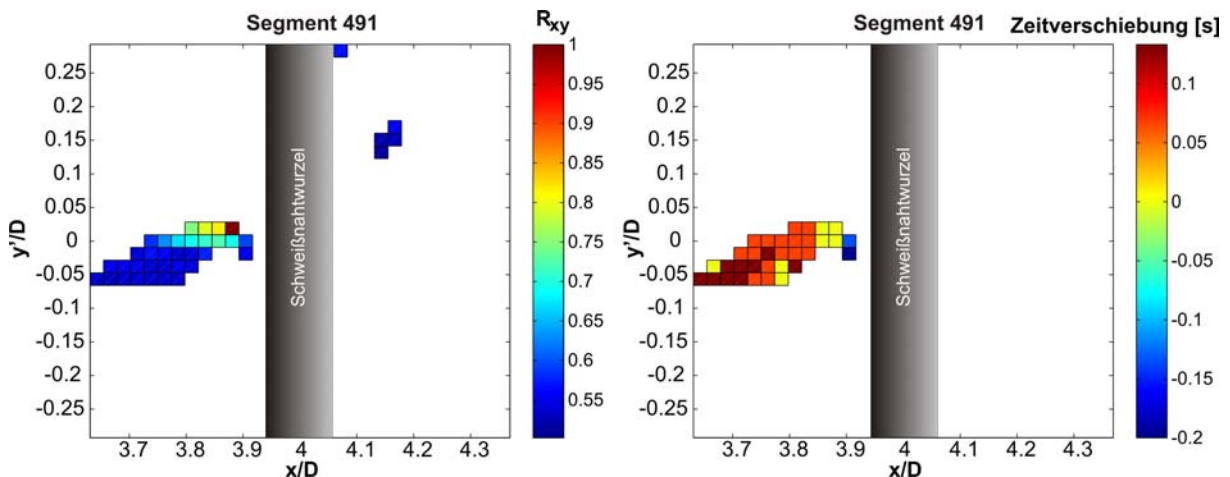


Abbildung 8: Kreuzkorrelationskoeffizient R_{xy} (l) und Zeitverschiebungsverteilung (r) für die wandnahen Dichteschwankungen mit Schweißnahtwurzelnachbildung

Für Abb. 8 ist das Element 491 im Fall mit Schweißnaht betrachtet worden. Die Anwesenheit der Schweißnaht führt zu einer Reduktion der Kohärenzlänge. Das betrachtete Segment liegt stromauf der Schweißnahtwurzelnachbildung und der durch sie verursachten Rezirkulationszone. Die wandnahen Strukturen treffen auf die Rezirkulationszone, werden von der Wand abgelenkt und entziehen sich somit der Beobachtung. Innerhalb von 0,5 s kann stromab der Schweißnaht keine Struktur identifiziert werden, die mit diesen abgelenkten Strukturen in Verbindung steht.

Abbildung 9 zeigt die Korrelationsergebnisse für das Segment 526, welches in der ersten Rezirkulationszone liegt. Das Kohärenzgebiet beschränkt sich auf den Bereich der Rezirkula-

tion mit sehr geringer Verknüpfung zu einer Zone stromauf der Rezirkulation. Innerhalb der Zirkulation treten über die Kohärenzlänge die Fluktuationen instantan auf.

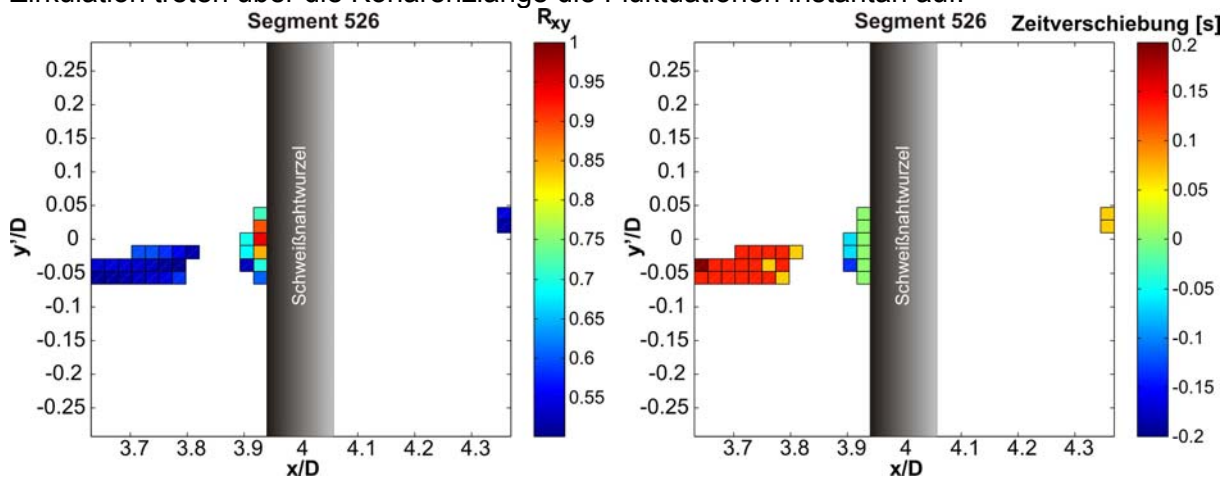


Abbildung 9: Kreuzkorrelationskoeffizient R_{xy} (l) und Zeitverschiebungsverteilung (r) für die wandnahen Dichteschwankungen mit Schweißnahtwurzelbildung

Im Weiteren wird das Segment 543 betrachtet. Auf der linken Seite der Abb. 10 ist die Korrelationsebene für den Fall ohne Schweißnaht auf der rechten Seite das Ergebnis mit Schweißnahtwurzel dargestellt. Ohne die Wurzelnaht entspricht die Lage des Kohärenzgebiets dem Fall aus Abbildung 7. Die Schweißnaht unterbricht die wandnahe Ausbreitung der Strukturen und führt stromab zu einer über den Umfang verteilten Kohärenzebene parallel zur Schweißnaht.

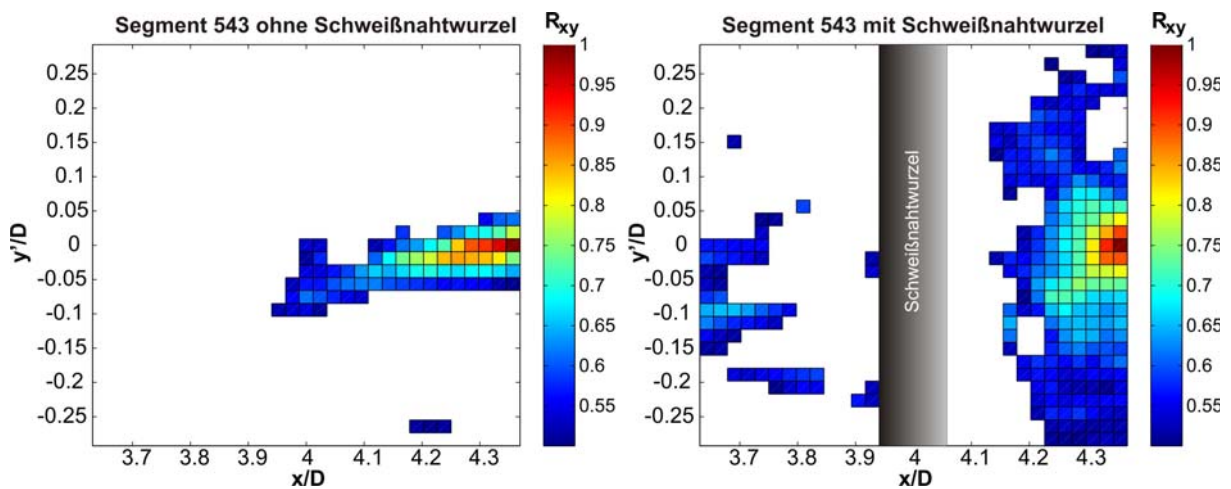


Abbildung 10: Kreuzkorrelationsebenen für die wandnahen Dichteschwankungen mit und ohne Schweißnahtwurzelbildung

Zusammenfassung

Der Einfluss einer Schweißnaht auf das Strömungsfeld in der Mischungszone eines T-Stücks wurde an einem isothermen Wasserkanal untersucht. Experimentelle Daten wurden mittels PIV und der wandnah LED-induzierten Fluoreszenz-Messtechnik aufgenommen. Die PIV lieferte bei der Vermischung von Wasserströmen mit gleicher Dichte Geschwindigkeitsfelder vor und nach der Schweißnahtwurzelbildung, aus denen das Stromlinienbild bestimmt werden konnte. Die normierten mittleren Geschwindigkeitsprofile und RMS-Geschwindigkeitsprofile zeigen ein hohes Maß an Ähnlichkeit für alle untersuchten Volumenströme mit Ausnahme einer Konfiguration, bei der das Volumenstromverhältnis nahe bei oder kleiner als eins war.

Ein signifikanter Einfluss der Schweißnahtwurzel auf die turbulente Strömung konnte nachgewiesen werden. Die Schweißnahtwurzel führt zur Ausbildung von Rezirkulationsströmungen, welche die mittleren Geschwindigkeitsgradienten in Wandnähe reduzieren und über induzierte Scherströmungen zu einer Erhöhung der RMS-Geschwindigkeitswerte beitragen. Mittels Zucker wurde ein Dichteunterschied von 5,8 % zwischen den sich vermischenden Wasserzuläufen eingestellt. Fluoreszierende Rhodamin-Farbstoffe wurden verwendet, um die Flüssigkeiten unterschiedlich einzufärben. Die wandnahen mittleren Dichtefelder und RMS-Dichtefelder, welche in assoziierte Temperaturen umgerechnet wurden, konnten für diese Konfiguration mit Hilfe der wandnah LED-induzierten Fluoreszenz-Messtechnik erfasst werden. Es konnte beobachtet werden, dass die Rezirkulationsströmung stromaufwärts der Schweißnaht dichtere Flüssigkeit aufwärts transportiert, während stromabwärts das Gegenteil eintritt. Letzteres verursacht erhöhte Temperaturschwankungen parallel zur Schweißnaht und ist ein Hinweis auf die Ursache der in Schweißnahtnähe auftretenden Risse in den Strukturen.

Danksagung

Dank gilt den Mitarbeitern des Projektträgers PTKA-WTE (Karlsruhe-Institute of Technology KIT) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMWF) für die Finanzierung dieser Arbeiten (Projektnummer 02NUK009B).

Literatur

- Chapuliot, S., 2009: "Thermal fatigue in mixing areas, Overview of the industrial problem", Vortrag, NEA Headquarters, AREVA.
- Hofstötter, P., Dittmar, S., Maile, K., Metzner, K. J., 1999: „In-Service monitoring of piping and vessels in nuclear power plants: report on BMU Study SR 2218“, Nuclear Engineering and Design, Vol. 193, pp. 233-241.
- IAPWS, 1996: Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use.
- Kuschewski, M., Klören, D., Kulenovic, R., Laurien, E., 2011: "Influence of weld-seams on the fluid-structure interactions in pipe flows", International Conference On Fatigue Design, Senlis, Paris.
- Schiweck, H., van der Poel, P. W., Schwartz, T., 2000: Zuckertechnologie: Rüben- und Rohrzuckergewinnung, Bartens, Germany.
- Wagner, W., Pruß, A., 2002: „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“, J. Phys. Chem. Ref. Data, 31, 387.
- Walker, D. A., 1985: „A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids“, J. Phys. E: Sci. Instrum., Nr. 20, pp. 22-24.