

## VISUELLE UNTERSUCHUNG TURBULENTER JET-STRÖMUNG UNTER PASSIVER BEEINFLUSSUNG

### VISUAL INVESTIGATIONS OF PASSIVE CONTROL OF TURBULENT JET FLOW

Ö. Ertunç, H. Derlien, Ç. Köksoy, A. Delgado

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, FAU Erlangen-Nürnberg, Cauerstr. 4 91058 Erlangen, Deutschland

Freistrahler, Passive Strömungskontrolle, Visualisierung, Konturen-Detektion

Cylindrical jet, passive flow control, visualization, contour detection

#### Einleitung

Für technische Anwendungen, wie zum Beispiel Verbrennung- oder Beschichtungsverfahren, kann es von Interesse sein, Strömungen hinsichtlich ihres Zustandes, Zustandsänderungen und der daraus resultierenden Strukturen steuern zu können. Eine Möglichkeit, die Eigenschaften einer Strömung diesbezüglich zu beeinflussen, ist die Verwendung von Strömungsgleichrichtern. Sie dienen im Allgemeinen dazu, die Strömung zu homogenisieren. Das Prinzip eines Gleichrichters besteht darin, eine Strömung in kleinere Teilströme aufzusplitten und dadurch großskalige Strukturen zu zerstören. Gegenstand der Untersuchung ist der Einfluss eines solchen Strömungsgleichrichters auf die Eigenschaften eines Freistrahls. In einem Wasserbecken werden „liquid-into-liquid-jets“ mit verschiedenen Reynoldszahlen erzeugt. Durch die Zugabe von Tracerpartikeln und mit Hilfe des Laserschnittverfahrens werden die Strömungen visualisiert und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Ein wabenförmiger Gleichrichter befindet sich innerhalb der emittierenden Düse und kann in seiner Position variiert werden. Verglichen werden Strömungen, die innerhalb der Düse den Gleichrichter passieren, mit Strömungen, die direkt durch den Gleichrichter in die ruhende Umgebung austreten. Da es sich weitestgehend um turbulente Strömungen handelt, wurde ein Bildverarbeitungsprogramm entwickelt, das trotz der instationären Vorgänge qualitative Aussagen über relevante Größen zulässt. Das Programm erzeugt automatisch gemittelte Bilder, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Strömung wiedergeben, und detektiert die Kontur des Freistrahls. Auf diese Weise können die Auswirkungen der Gleichrichter-Position und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Jet-Ausbreitung aufgezeigt werden. Anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden die Strukturen und Abläufe in den Strömungen analysiert, und die für die Jet-Gestalt ursächlichen Mechanismen geklärt.

#### Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Erzeugt werden „liquid-into-liquid-jets“ in einem 2 m<sup>2</sup> Becken mit destilliertem Wasser. Die Strömung wird durch eine Wasserpumpe angetrieben und der Volumenstrom mittels Durchflussmeter reguliert. Über eine zylindrische Düse, in der sich der Strömungsgleichrichter befindet, tritt das beschleunigte Wasser in Form eines Freistrahls in die ansonsten ruhende Umgebung aus. Durch die Zugabe von Tracerpartikeln und mit Hilfe des Laserschnittverfahrens werden die Strömungen visualisiert und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet.

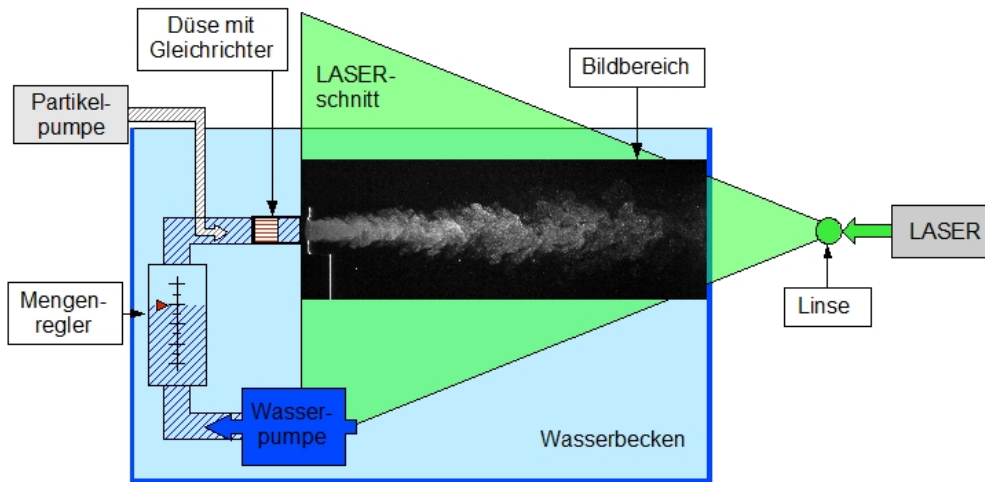


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Die verwendete Düse hat einen Durchmesser  $D$  von 20 mm, die Länge beträgt 150 mm. Innerhalb der Düse befindet sich der Strömungsgleichrichter (GR) mit einer Länge von 80 mm. Er besteht aus einer Anzahl kleiner Röhren in wabenförmiger Anordnung (Abb. 2). Um den Einfluss des Gleichrichters auf den Jet zu untersuchen, wird dieser innerhalb der Düse an zwei verschiedenen Positionen fixiert (Abb. 3). In der hinteren Position fallen die durch den GR erzeugten Teilströme noch innerhalb der Düse zusammen und treten als eine Gesamtströmung aus. Mit dem GR in der vorderen Position treten hingegen die Teilströme in Form eines Bündels aus der Düse aus.

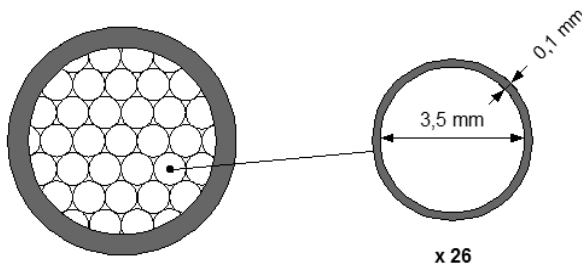


Abbildung 2: Geometrie des Gleichrichters

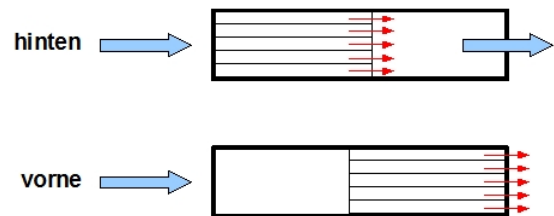


Abbildung 3: Position des Gleichrichters

Aufgrund der Druckverhältnisse werden lediglich die Röhren des Gleichrichters durchströmt, wodurch sich die Querschnittsfläche gegenüber der Düse um 20 % verkleinert. Das hat zur Folge, dass mit dem GR in der vorderen Position die Teiljets mit entsprechend höherer Geschwindigkeit die Düse verlassen. Die Austrittsgeschwindigkeit  $U$  berechnet sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der durchströmten Fläche  $A$

$$U = \frac{\dot{V}}{A}$$

Mit der jeweiligen Austrittsgeschwindigkeit  $U$  und dem Düsen- beziehungsweise Röhren- durchmesser als charakteristische Größe  $L$  errechnet sich die Reynoldszahl  $Re$  wie folgt ( $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ).

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$$

Mit den Durchflussvolumina von 200, 600, 1000, 1400 und 2000 Liter pro Stunde ergeben sich für den Versuch die in Abbildung 4 dargestellten Reynoldszahlen und Austrittsgeschwindigkeiten.

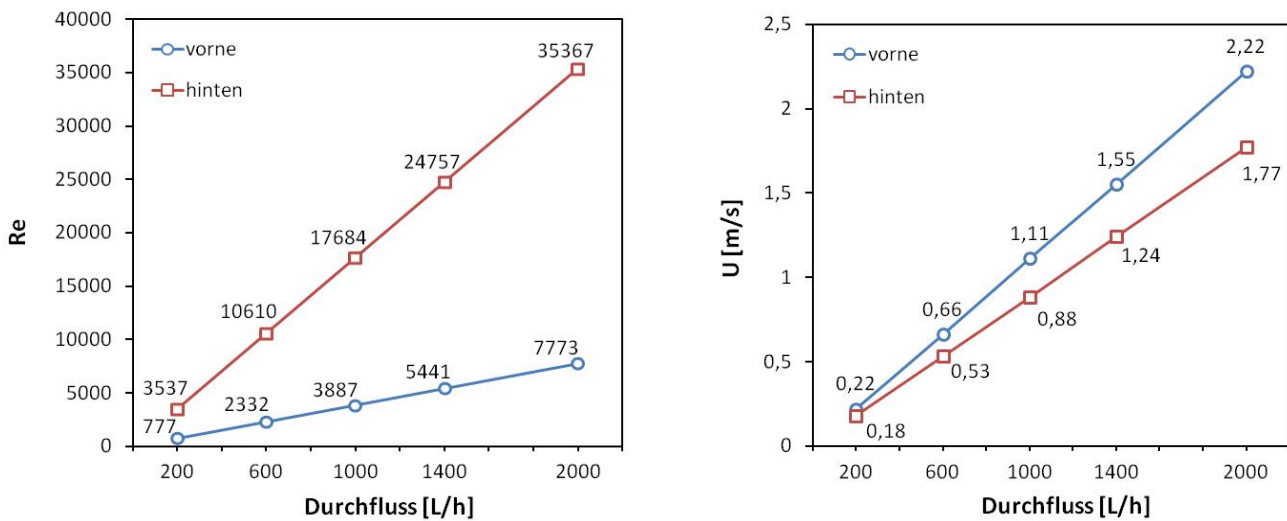


Abbildung 4: Reynoldszahlen und Austrittsgeschwindigkeiten zu den verschiedenen Durchflüssen und Gleichrichter-Positionen

### Bildbearbeitung

Anhand von Filmsequenzen können Strukturen und Abläufe in den Strömungen analysiert werden. Sollen hingegen Aussagen über den Jet-Durchmesser und damit über die Ausbreitung getroffen werden, so ist dies nur am stehenden Bild möglich. Da aber aufgrund von turbulenten Fluktuationen die Gestalt des Jets im ständigen Wandel ist, sind Momentaufnahmen diesbezüglich wenig aussagekräftig (Abb. 5). Hinzu kommt, dass in den meisten Fällen Jet und Umgebung nicht eindeutig voneinander abgegrenzt werden können, und sich die Grenze je nach Wahl des Histogrammbereichs verschiebt.

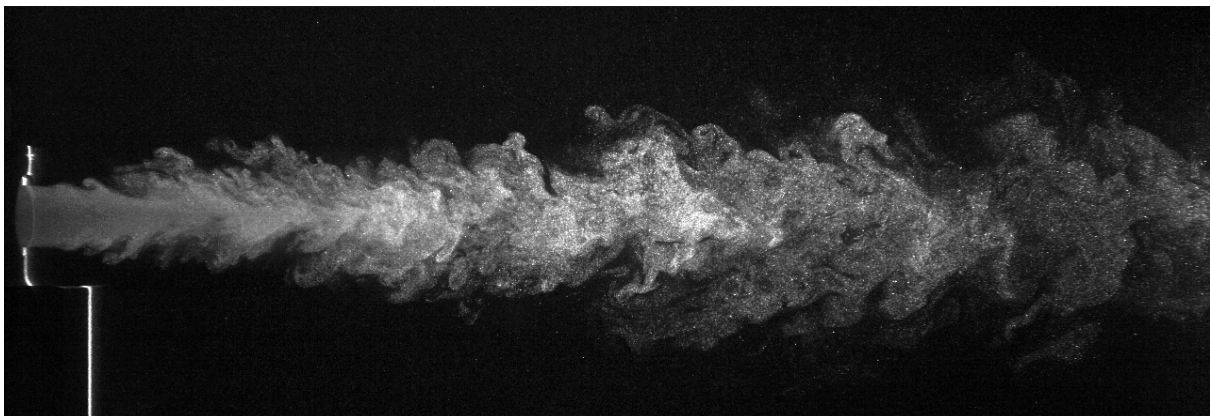


Abbildung 5: Einzelbild mit manueller Bildeinstellung

Daher wurde ein Programm entwickelt, das die Aufnahmen einheitlich verarbeitet und automatisch die Kontur des Jets ermittelt. Ausgehend von unbearbeiteten Originalbildern werden Bildeinstellungen und Tonwertkorrekturen vorgenommen, und der Bereich der Düsenhalterung mittels Interpolation entfernt. Anschließend wird eine der Austrittsgeschwindigkeit entsprechende Anzahl von Bildern durch pixelweises Aufsummieren und Dividieren zu einem gemittelten Bild verarbeitet. Durch spaltenweise Normierung der Tonwerte wird eine konstante Belichtungsintensität entlang der Jetachse erreicht. Abbildung 6 zeigt ein gemitteltes und normiertes Bild mit bereits detektierter Jet-Kontur.

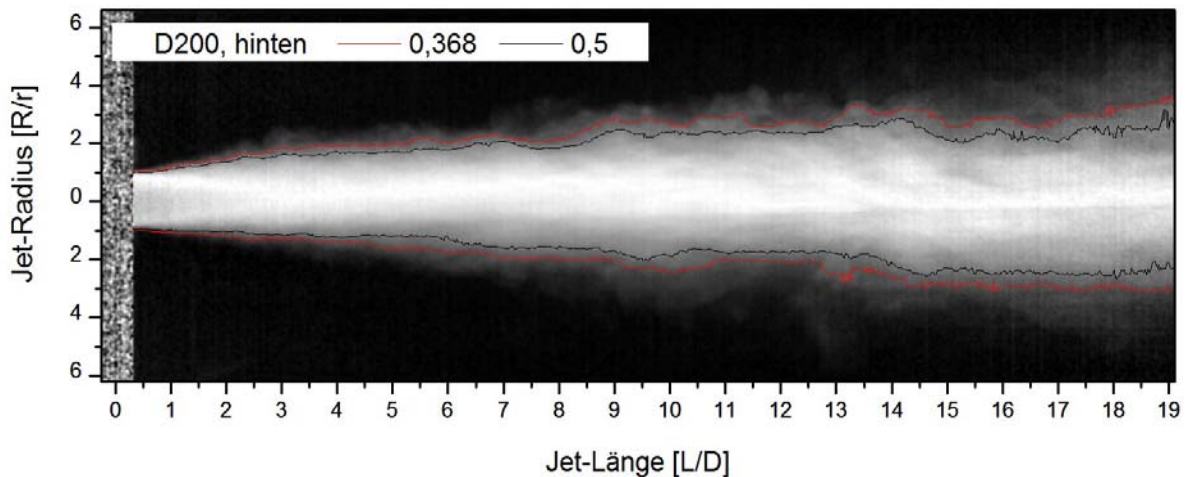


Abbildung 6: gemittelt und normiertes Bild mit detektierten Konturen für die Schwellenwerte  $1/e = 0,368$  und  $0,5$

Das Prinzip der Konturendetektion ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Nach der Normierung weist jede Pixelspalte eine Intensitätsverteilung auf, die der gauß'schen Normalverteilung ähnelt. Das Programm tastet diese Kurve vom Bildrand her ab und notiert nach Erreichen eines definierten Schwellenwertes die entsprechenden Pixelkoordinaten. Als Schwellenwerte sind  $1/e = 0,368$  und  $0,5$  gewählt, wie sie als Jetgrenze für Geschwindigkeitsprofile gelten (siehe Pope 2000, Jianacho et al 2011).

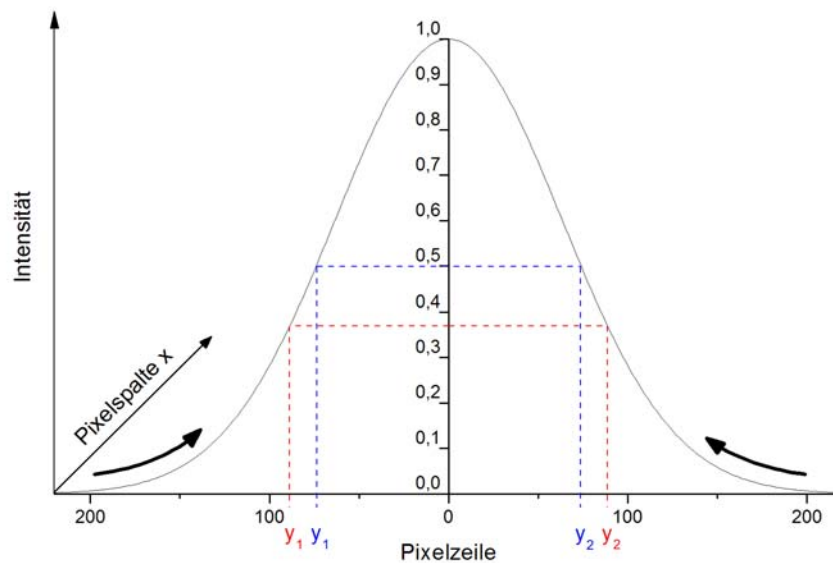


Abbildung 7: Prinzip der Konturendetektion

## Ergebnisse

Die ermittelten Konturen zeigen den Einfluss der Gleichrichter-Position auf die Ausbreitung des Jets (Abb. 8). Bei der hinteren Position nehmen die Jet-Durchmesser bis zu einer Jet-Länge von  $6D$  für alle Durchflüsse gleichermaßen zu. Darüber hinaus entwickeln sich die Jets unterschiedlich. Die Konturen sind zueinander versetzt und die Durchmesser nehmen unterschiedlich stark zu. Erst bei einer Länge von  $19D$  ist ein Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit und -durchmesser erkennbar. Je höher die Geschwindigkeit um so größer der Durchmesser des Jets.

Die Jets mit dem GR vorne zeigen hingegen über die gesamte Länge ein einheitliches Bild. Kurz nach der Düse kommt es durch das Zusammenfallen der einzelnen Teilströme zur Verjüngung der Jets. Ab der Länge von 1D nehmen die Durchmesser beinahe linear zu und erreichen bis zum Bildrand, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, die gleiche Größenordnung.

Der Gleichrichter in der vorderen Position wirkt sich demnach in zweierlei Hinsicht stabilisierend auf die Jets aus. Zum einen breiten sich die Jets über die betrachtete Länge linear aus und weisen somit im Gegensatz zu GR hinten eine stärkere räumliche Orientierung auf. Zum anderen weiten sich die Jets unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit gleichermaßen auf. Dieser Effekt kommt allerdings erst ab Längen  $L > 6D$  wirklich zum Tragen, da bis dahin die Jets mit GR hinten ebenfalls räumlich stabil sind.

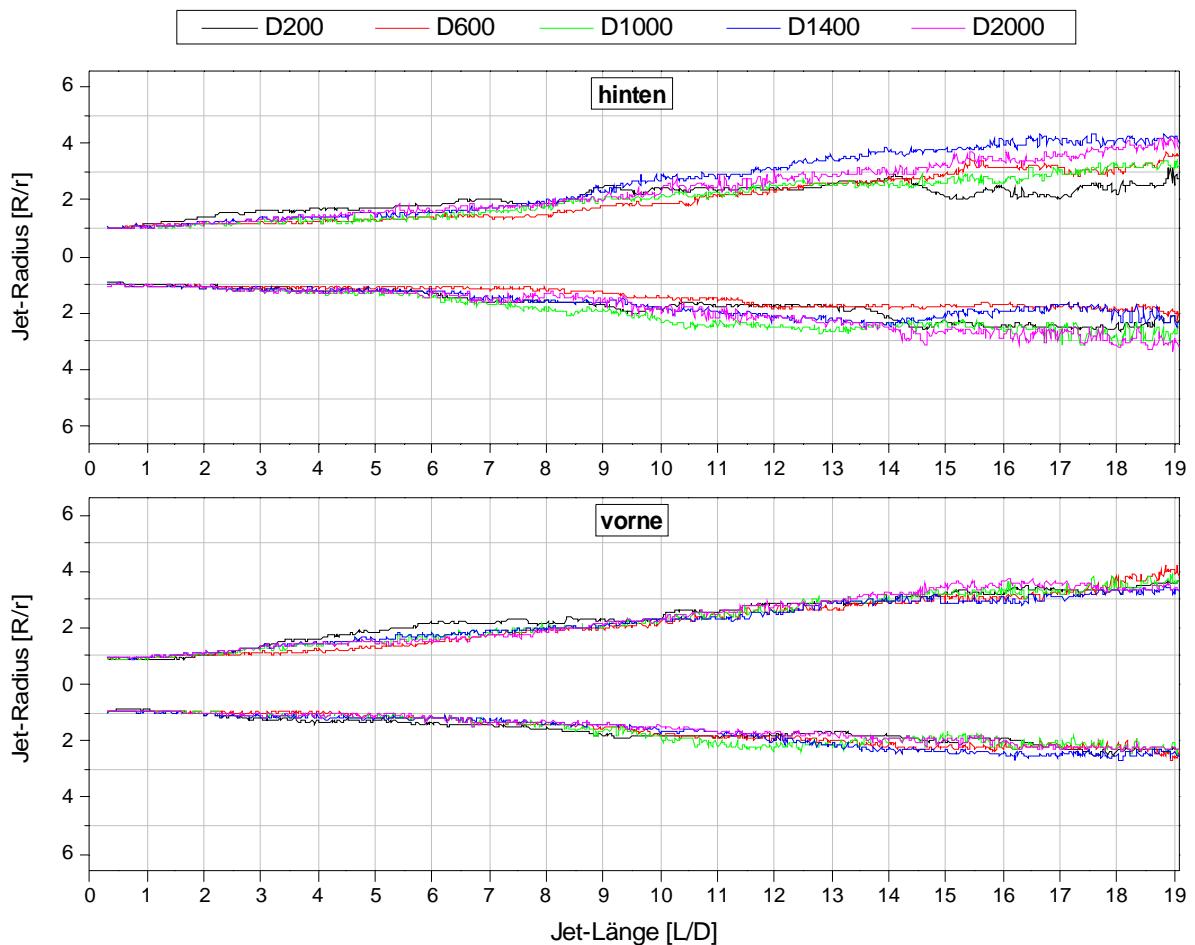


Abbildung 8: Jet-Konturen bei den Gleichrichter-Positionen vorne und hinten bei verschiedenen Durchflüssen

Die Ursachen zeigen sich anhand von Aufnahmen des düsennahen Bereichs (Abb. 9). Mit dem GR hinten tritt die Strömung als ein homogener Jet aus der Düse aus. Interaktionen mit der ruhenden Umgebung erfolgen daher gleichmäßig auf dem gesamten Umfang und die Strömung wird symmetrisch gestört. Dies zeigt sich im symmetrischen Anschwellen des Jets, was als variköse Instabilität bezeichnet wird.

Sitzt der GR vorne am Düsenausgang, besteht die Strömung aus mehreren Teiljets, die mit der Umgebung und untereinander interagieren. Ausgehend von den nicht durchströmten Flächen bilden sich hinter dem Gleichrichter aufgrund von Geschwindigkeitsgradienten Scherschichten aus, deren Längen auf die Geschwindigkeitsverteilung in der Gesamtströmung schließen lassen. Während im Zentrum die Jets nahezu ohne Geschwindigkeitsverlust zu einer Kernströmung zusammenfallen, werden im Randbereich die Jets abgebremst und

ein Angleichen der Geschwindigkeiten verhindert. Dadurch sind die Randjets separiert und die Strömung weist das in Abbildung 10 skizzierte Geschwindigkeitsprofil auf. Die Randjets sind aufgrund der Mehrfach-Interaktion besonders instabil, was aus Filmsequenzen hervorgeht. In unregelmäßigen Abständen treten Fluktuationen auf, die zur Abspaltung der Teiljets in Form kleinskaliger Wirbel führen. Der Gesamt-Jet erfährt dadurch eine asymmetrische instationäre Störung.

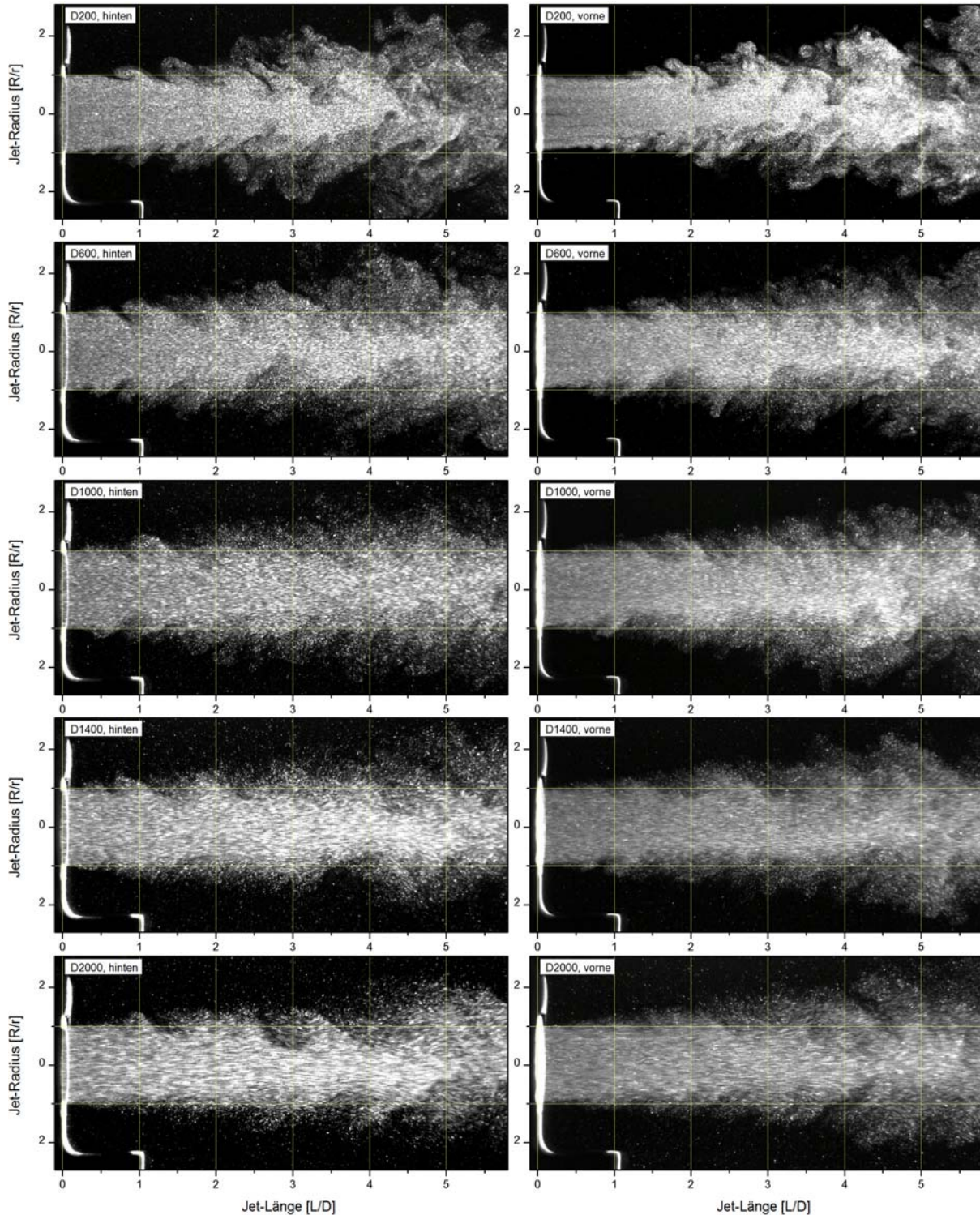


Abbildung 9: Aufnahmen des düsenahen Bereichs mit Gleichrichter hinten (links) und vorne (rechts)

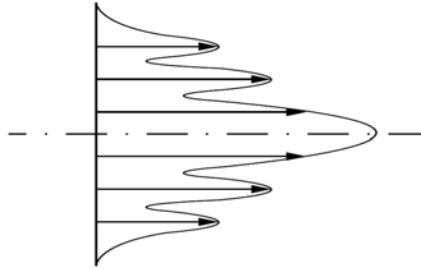


Abbildung 10: Geschwindigkeitsprofil kurz nach der Düse bei GR vorne

Mit Hilfe schematischer Darstellungen (Abb. 11 und 12) sollen alle diese Aspekte nochmals aufgegriffen und zur Klärung der unterschiedlichen Jet-Ausbreitungen zusammengefasst werden. Die Jets mit GR hinten treten als homogene Strömung aus der Düse, die auf ihrem gesamten Umfang gleichmäßig mit der Umgebung interagiert. Dadurch ist ein Kräftegleichgewicht gegeben, das die Entstehung von variköser Instabilität und die symmetrische Bildung großskaliger Wirbel begünstigt, ohne dass der Jet signifikant abgelenkt wird. Es bilden sich symmetrische Segmente, die überwiegend großskalige Strukturen enthalten. Mit dem Übergang in den turbulenten Zustand geht die Symmetrie des Jets schließlich verloren und es treten turbulente Fluktuationen auf. Die bis hierher geradlinige Strömung wird in eine wellenförmige Bewegung versetzt, wodurch es zu Versetzungen der Jet-Segmente kommt. Weil die Strömungen mit hohen Reynoldszahlen austreten, ist der Einfluss der Viskosität auf die großskaligen Wirbel sehr gering. Sie bleiben über den Turbulenzumschlag hinaus erhalten und werden durch die nun fluktuierenden Segmenten in die Umgebung gestreut.

Mit dem GR vorne setzt sich Strömung am Düsenausgang aus mehreren kleinen Teilströmen zusammen. Dadurch ist die Strömung nicht homogen, und es kommt zu keiner gleichmäßigen Interaktion mit der Umgebung. Stattdessen erfährt die Strömung eine instationäre und ungleichmäßige Störung, die sich aus den Wechselwirkungen mit der ruhenden Umgebung und der Teiljets untereinander zusammensetzt. Daher variiert der Ort der ersten Wirbelbildung, wodurch diese asymmetrisch erfolgt. Dies wirkt sich destabilisierend auf den Jet aus, der schon in kurzer Distanz zur Düse in eine sinusförmige Wellenbewegung übergeht und diese über die gesamte Länge beibehält. Im Vergleich zu GR hinten treten die Teiljets mit hoher Geschwindigkeit aber niedrigen Reynoldszahlen aus, wodurch die Wirbelbildung später erfolgt. Während sich im Zentrum eine abgeschirmte Kernströmung bildet, werden die Randjets instabil und schließlich von der Strömung abgespalten. Dabei entstehen Wirbel, die in ihrer Größe in etwa dem Durchmesser eines Teiljets entsprechen, und damit deutlich kleiner sind als bei GR hinten. Weil die Wirbel asymmetrisch zueinander versetzt sind, nimmt der eigentliche Jet-Durchmesser nur geringfügig zu. Erst zusammen mit der Wellenbewegung, deren Amplitude entlang der Ausbreitungsrichtung allmählich zunimmt, ergibt sich schließlich eine linear anwachsende Jet-Breite. Da durch den GR jegliche großskalige Struktur im Vorfeld eliminiert wurde, weist die Strömung einschließlich der ersten Wirbelbildung nur kleine Skalen auf. Erst in größerer Distanz zur Düse kommt es durch den Fluideintrag und Interaktionen mit tiefer liegenden Teiljets zur Bildung größerer Skalen mit längerer Lebensdauer. Im Gegensatz zu GR hinten ist die Geschwindigkeit dieser Skalen vergleichsweise hoch, weil sie nahe am Zentrum der Strömung entstehen und noch nicht über eine längere Distanz mit der ruhenden Umgebung interagierten. Dadurch sind sie in ihrer Bewegungsrichtung stabiler und werden durch die Wellenbewegung weniger stark in die Umgebung gestreut.

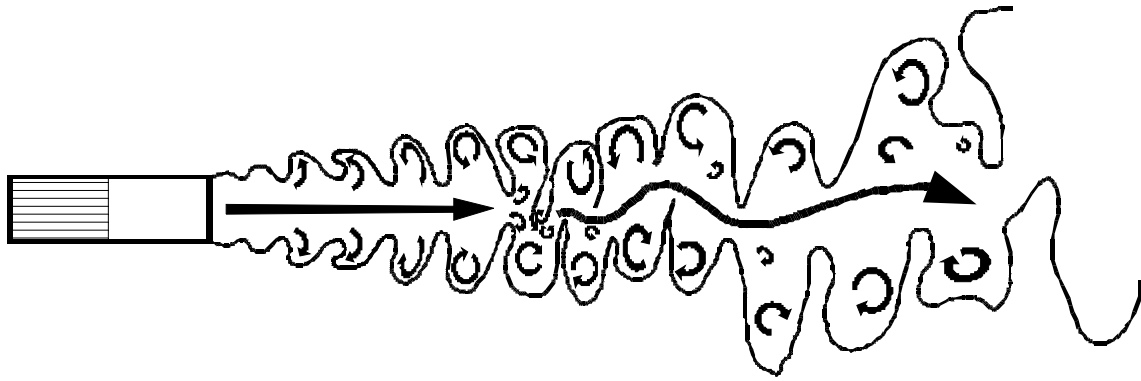


Abbildung 11: Entwicklung eines Jets mit GR hinten

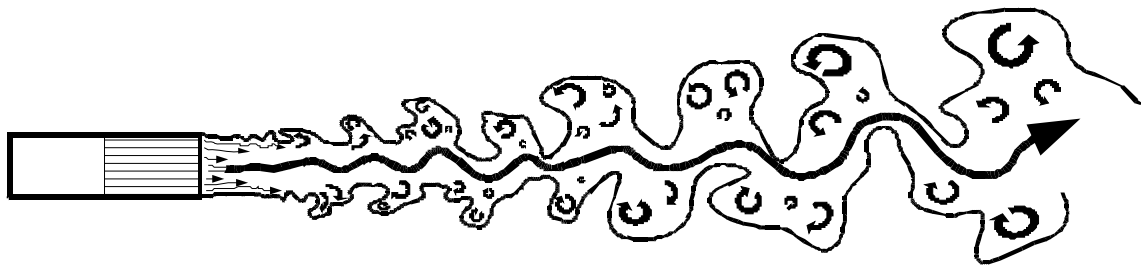


Abbildung 12: Entwicklung eines Jets mit GR vorne

### Zusammenfassung

Anhand der Aufnahmen konnte gezeigt werden, dass die GR-Positionen unterschiedliche Strukturen in der Strömung zur Folge haben. Diese wirken sich auf die Form der Instabilität und Wirbelbildung, auf die Größe von Skalen und Fluideintrag, die Zustandsänderungen und schließlich auf die Jet-Gestalt und -Ausbreitung aus.

### Literatur

Pope, Stephen B., 2000: „Turbulent Flows“, Cambridge University Press.

Jiancho, L., Tangjun, L., Hongxia, S., Ge, M., 2011: “A novel formula to describe the velocity profile of free jet flow”, Arch Appl Mech (2011) 81: 397–402, DOI 10.1007/s00419-010-0418-7.