

## Analyse des Strömungs- und Transitionsverhaltens freier synthetischer Jets mittels Direkter Numerischer Simulation und optischer Messverfahren

### Analysis of the flow and transition to turbulence of free synthetic jets with direct numerical simulations and optical measurement techniques

**Robert Glowienko<sup>1,2,4</sup>, Hans Derlien<sup>1</sup>, Özgür Ertunç<sup>1,3</sup>, Antonio Delgado<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

<sup>2</sup>AUDI AG, Ingolstadt

<sup>3</sup>Özyeğin University, Istanbul

<sup>4</sup>Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), Erlangen

Synthetische Jets, Direkte Numerische Simulation, Laser-Vibrometer, Visualisierung  
Synthetic jets, direct numerical simulation, laser Doppler vibrometer, visualisation

#### Zusammenfassung

Der Inhalt dieser Arbeit ist die Analyse des Strömungs- und Transitionsverhaltens freier synthetischer Jets unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden. Hierbei wird ein geschlossener Ansatz aus Versuch und direkter numerischer Simulation mit STAR-CD verfolgt. Der Aufbau des Jet-Ejektors und des Prüfstands sowie das CFD-Modell und seine Randbedingungen werden kurz vorgestellt. Zunächst werden Messungen des Membranhubes am Ejektor mithilfe eines Laser-Vibrometers der Firma Polytec bei definierten Betriebspunkten durchgeführt. Der Membranhub stellt eine wichtige Eingangsgröße für das CFD-Modell dar. Im Anschluss erfolgt eine Visualisierung der Strömung der unterschiedlichen Betriebspunkte zur Bewertung ihrer Struktur sowie zur Validierung des Simulationsmodells. Für die Visualisierung der Jets wird eine Laser-Schnittebene (Gas-Ionen-Laser Klasse IV der Firma Spectra-Physics, Wellenlänge 514.5 nm, maximale Leistung 4 W) mit einer Strahlführung durch die Symmetrieachse der Düse aufgespannt und die gekapselte Umgebung durch einen Nebelgenerator mit Tracerpartikeln (mittlerer Partikeldurchmesser 3 µm) versetzt. Die eingesetzten Hochgeschwindigkeits-Kameras (PCO 1200 HS, Shimadzu HPV2 und PCO SensiCam) zur Aufnahme der Strömung werden jeweils senkrecht zur Schnittebene angeordnet. Die bei der Visualisierung gewonnenen Aufnahmen werden abschließend mit den Simulationsergebnissen verglichen.

#### Einleitung

Synthetische Jets werden durch die periodische Bewegung einer Membran innerhalb einer Kavität, welche durch eine Düse an das Umgebungsfluid (in dieser Arbeit Luft) gekoppelt ist, erzeugt. Bei der Vergrößerung des Volumens der Kavität entsteht Unterdruck und Fluid aus der Umgebung strömt durch die Düse in die Kavität hinein. Während der anschließenden Verringerung des Volumens wird das gleiche Fluidvolumen aus der Kavität ausgestoßen. Die Strömung löst an den Kanten der Düse ab und es bildet sich eine freie Scherschicht zwischen ausgestoßenem Fluid und der ruhenden Umgebung aus. Dabei kommt es - bei einer

runden Düse - zum „Aufrollen“ eines torusförmigen Wirbels, welcher sich nach Überschreiten einer Energieschwelle in axialer Richtung in Bewegung setzt. Aufgrund der Viskosität wird Umgebungsfluid mitgerissen und es kommt zur Bildung eines Freistrahls. Der primäre Wirbel selbst zerfällt in Ausbreitungsrichtung in kleinere Wirbel und verbindet sich zugleich mit dem Jet [1]. Die Bildung eines solchen Jets ist in Abb. 1 in einer Prinzipskizze gezeigt.

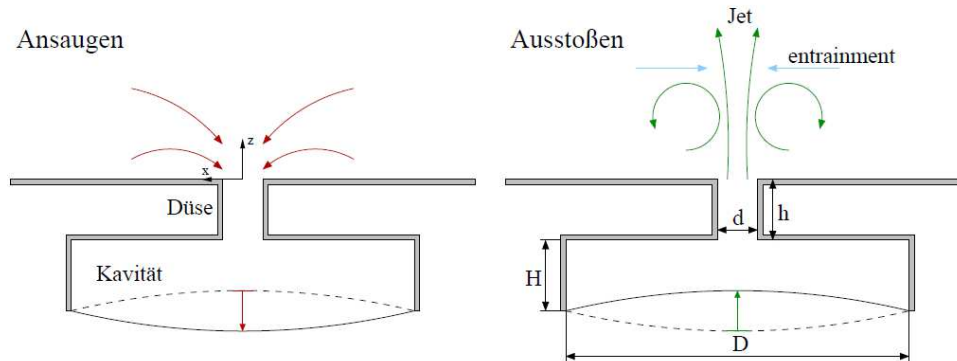


Abb. 1: Bildung eines synthetischen Jets

## Prüfstandsaufbau und Messtechnik

Die Membran wird dem Jet-Lüfter PAR-38 der Firma Nuventix [3] entnommen. Sie wird elektrodynamisch in Schwingung versetzt und besteht aus einer Kreisscheibe mit einem Durchmesser von 28.5 mm, welche durch eine umlaufende Gummisicke schwingfähig gelagert ist. Die Membran wird in ein massives Gehäuse eingebettet. In den Abschlussdeckel wird die Düse, die einen Durchmesser und eine Höhe von jeweils 1 mm besitzt, eingearbeitet. Das Gehäuse und der Abschlussdeckel werden miteinander verschraubt und bilden gemeinsam die Kavität. Die vollständigen Abmessungen von Kavität und Membran sind in Abb. 2 links zusammengefasst. Der fertige Jet-Ejektor ist in Abb. 2 rechts gezeigt.

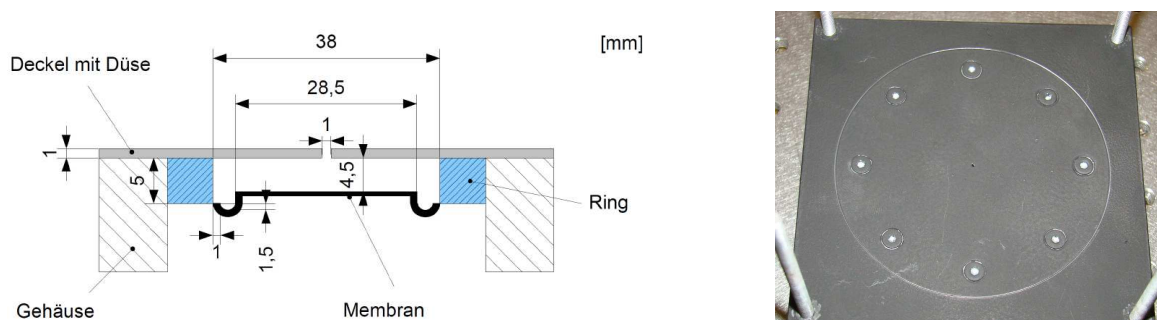


Abb. 2: Maße der Kavität und Düse (links) und Deckel mit Düse des Jet-Ejektors (rechts) [2]

Da die Membran elastisch am Träger aufgehängt ist, wirken sich die Druckverhältnisse innerhalb der Kavität auf ihre Bewegung aus. Um den Hub der Membran quantifizieren zu können, werden mithilfe eines Laser-Vibrometers Messungen für jeden einzelnen Betriebspunkt durchgeführt. Bei diesem Messprinzip, vergleiche Abb. 3, wird ein Laserstrahl auf eine reflektierende Oberfläche eines bewegten Messobjekts fokussiert. Durch die Phasenlage des reflektierten Lichts zum ursprünglichen Laserstrahl wird anschließend mittels Interferometrie die Verschiebung des Messobjekts bestimmt. Die Messung erfolgt somit kontaktlos und be-

einflusst die Schwingung der Membran nicht. In Abb. 3 rechts ist die Anordnung des Messkopfes über dem Jet-Ejektor gezeigt. Der Laserstrahl besitzt einen Durchmesser von wenigen  $\mu\text{m}$ , so dass dieser durch die Düse hindurch direkt auf die Membran fokussiert werden kann. [2]

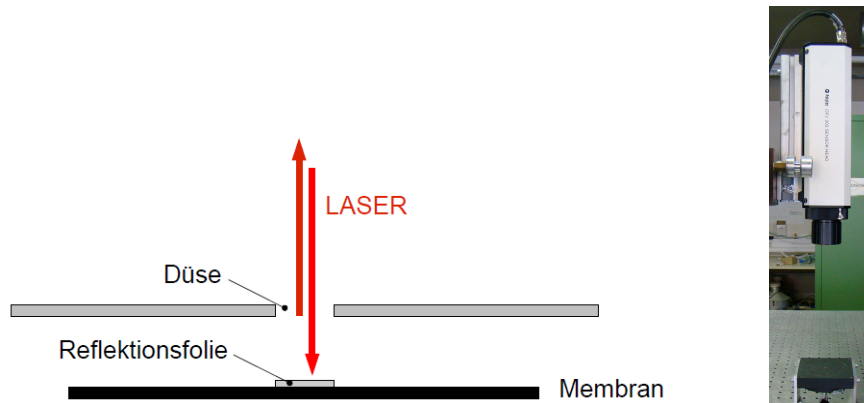


Abb. 3: Messprinzip des Laser-Vibrometers (links) und Anordnung zum Jet-Ejektor (rechts) [2]

Das Ergebnis der Messung mit dem Laser-Vibrometer ist in Abb. 4 dargestellt.

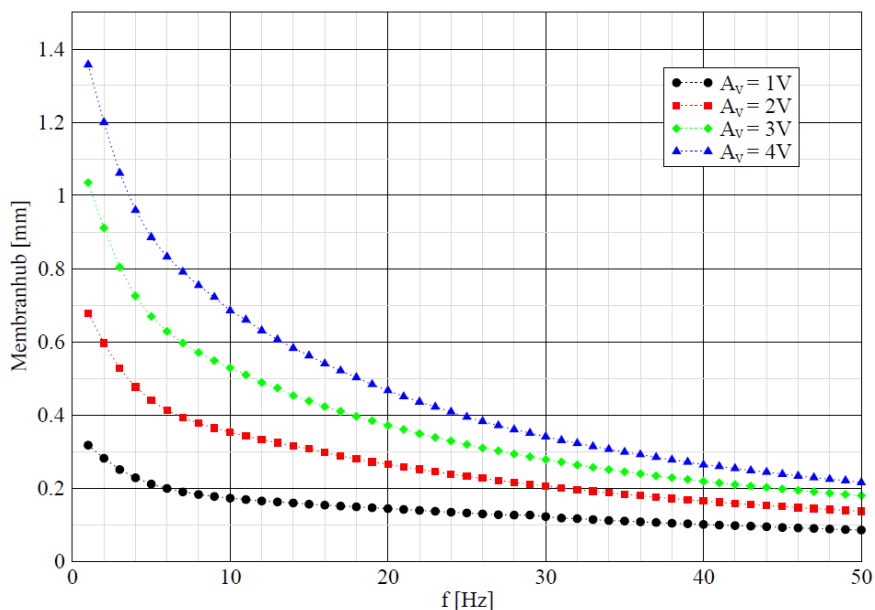


Abb. 4: Gemessener Membranhub [2]

Der Aufbau des Prüfstands ist in Abb. 5 skizziert. Der Jet-Ejektor wird auf einer Grundplatte montiert und kann definierte Orientierungen annehmen, so dass der Einfluss der Schwerkraft auf den Jet und den untersucht werden kann. In diesem Artikel wird lediglich die senkrechte Ausrichtung betrachtet. Für die Visualisierung der Jets wird eine Laser-Schnittebene nach Abb. 5 mittels einer Strahlführung durch die Symmetrieachse der Düse aufgespannt. Die eingesetzten Kameras zur Aufnahme der Strömung werden jeweils senkrecht dazu angeordnet. Die Laser-Schnittebene wird durch einen Gas-Ionen-Laser der Klasse IV von der Firma Spectra-Physics erzeugt. Dieser hat eine Wellenlänge von 514.5 nm sowie eine maximale Leistung von 4 W. Zur Visualisierung der Jets wird die gekapselte Umgebung durch einen Nebelgenerator mit Tracerpartikeln (mittlerer Partikeldurchmesser 3  $\mu\text{m}$ ) versetzt. Diese besitzen sehr gute Schwebefähigkeiten und bleiben für einen Zeitraum von mehreren Minu-

ten erhalten. Somit kann sich vor Einschalten des Jet-Ejektors ein Ruhezustand einstellen. [2]

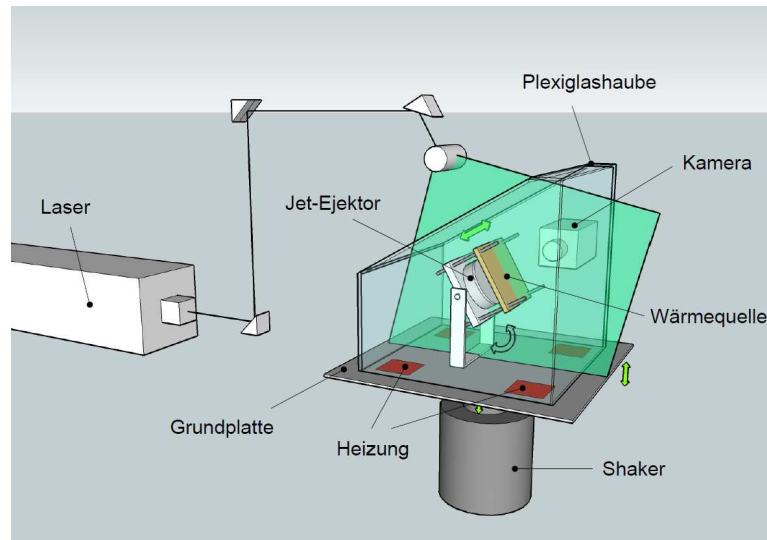


Abb. 5: Aufbau des Prüfstands [2]

Die verwendeten Hochgeschwindigkeits-Videokameras sowie ihre wesentlichen Eigenschaften sind in Abb. 6 zusammengefasst. Für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird die Kamera PCO 1200 HS eingesetzt. Mit dieser sind bei maximaler Auflösung und Belichtungszeiten von 1 ms Bildwiederholungsraten von 636 fps über einen längeren Aufnahmezeitraum möglich. Phasenaufgelöste Aufnahmen werden mit der PCO SensiCam erzeugt. Dabei wird die Phasenverschiebung der Membranbewegung gegenüber dem Erregersignal berücksichtigt und das Triggersignal zur Ansteuerung der Kamera um den gleichen Winkel verschoben. Somit wird gewährleistet, dass das Auslösen der Kamera und die Membranbewegung in Phase sind. Es werden Bilder in 5°-Schritten aufgenommen, so dass bei einer Periode von 360° 72 Aufnahmen erfolgen. [2]



Quelle: PCO

PCO 1200 HS  
bis zu 1.357 fps  
max. 1280 x 1024 Pixel (636 fps)



Quelle: Shimadzu

Shimadzu HPV2  
bis zu 1 Mio. fps  
max. 102 Bilder



PCO SensiCam  
Mehrfachbelichtung möglich  
max. 115 Bilder

Abb. 6: Eingesetzte Kameratechnologie zur Visualisierung der Jet-Strömung [2]

## CFD-Modell

Alle Berechnungen in dieser Arbeit werden mit dem kommerziellen CFD-Tool STAR-CD von CD-adapco [4] durchgeführt, da dieses Programm bereits viele der zu modellierenden Me-

chanismen abdeckt und relativ einfach durch Subroutinen erweitert werden kann. Zudem ermöglicht es die Parallelisierung der Rechnungen sowie die Auswertung der Simulationsergebnisse durch Routinen und Makros. Die erforderliche Gitterbewegung für die Abbildung der Membranschwingung wird mittels der Subroutine `newxyz.f` gesteuert.

Da die Berechnung der Jet-Strömungen mit Turbulenzmodellen zu sehr ungenauen Lösungen (k-epsilon- und k-omega-Modelle) oder zur Divergenz der Rechnungen (Reynolds-Spannungs-Modelle) führte, werden in dieser Arbeit ausschließlich direkte numerische Simulationen mit linearer Interpolation durchgeführt. Aufwindmethoden kommen nicht zum Einsatz, da diese dissipativ sind. Daher sind sie für den Einsatz in einer DNS nicht geeignet, da die numerisch erzeugte Dissipation die der Viskosität übersteigen und so einen großen Fehler einführen kann. [5]

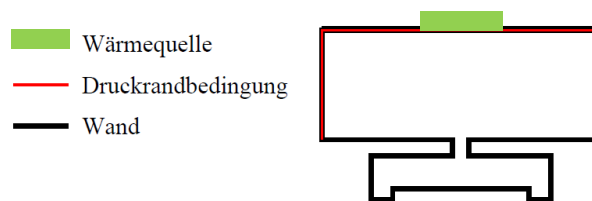
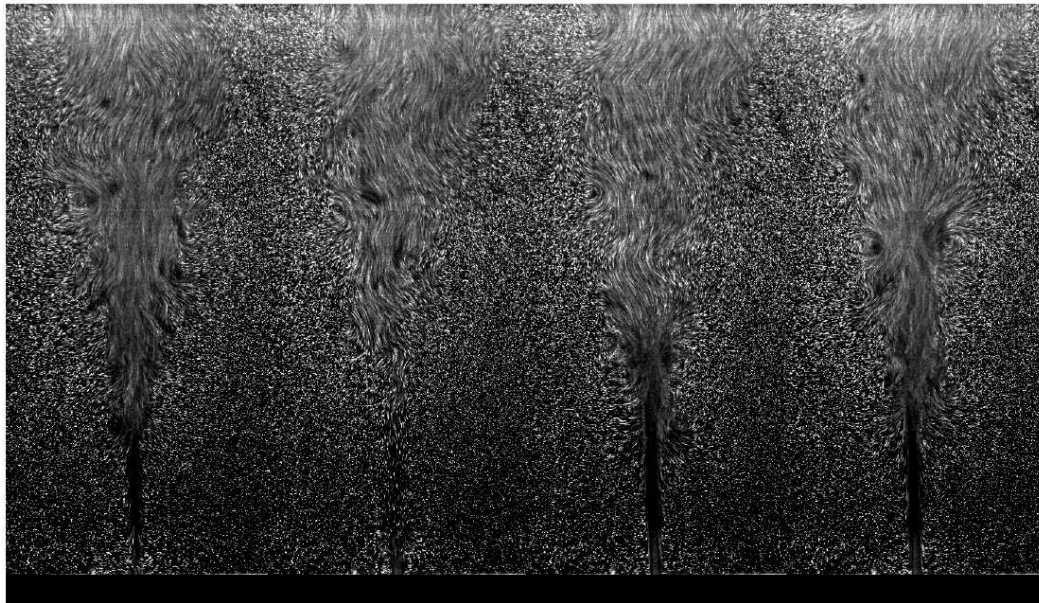


Abb. 7: Prinzipieller Aufbau des CFD-Modells

Zunächst werden die Abmessungen des CFD-Modells festgelegt, welche sich an den Maßen des realen Jet-Ejektors orientieren müssen. Als einzige Abweichung zur realen Geometrie wird die Gummisicke bzw. das von ihr enthaltene Luftvolumen vereinfacht als fester Ring modelliert, da ihre Bewegung nicht exakt bekannt ist und die Abbildung ihrer Radien die Zellenanzahl in diesem für die Strömung irrelevanten Bereich unnötig erhöhen würde. Daher wird lediglich die Schwingung der Membranscheibe über die Subroutine `newxyz.f` dargestellt. Die Umgebung wird soweit mitgenommen, dass das seitliche Zu- und Abströmen der Luft nicht durch den Rand beeinflusst wird und sich die freie Jet-Strömung nach oben hin ausreichend weit ausbilden kann. Der seitliche Rand der zylinderförmigen CFD-Umgebung erhält eine Druckrandbedingung mit einem relativen statischen Druck von 0 Pa. Die gleiche Randbedingung gilt für die obere Seite der Umgebung im Falle der in diesem Artikel betrachteten freien Jet-Strömung (für Berechnungen des Wärmeübergangs an der Prallplatte wird im entsprechenden Abstand zur Düse eine Wand-Randbedingung angesetzt). Alle übrigen Ränder werden ebenfalls als adiabate Wände, deren Temperatur der Umgebungstemperatur entspricht, ausgeführt. Der Aufbau des CFD-Modells samt seiner Randbedingungen ist als Prinzipskizze in Abb. 7 zu sehen.

## Ergebnisse Visualisierung

Je nach Frequenz des synthetischen Jets kommt es zu einem unterschiedlich starken Kontakt der Jet-Front mit der Nachlaufströmung, wie beispielhaft in Abb. 8 zu sehen ist. Dieses zeigt die Interaktion bei der Jet-Konfiguration 4 V 50 Hz zu mehreren Zeitpunkten. Es wird die Konfiguration 4 V 50 Hz betrachtet, da diese aufgrund der maximal einstellbaren Frequenz und Amplitude im Hinblick auf den Vergleich mit der Berechnung die höchste Anforderung an das Lösungsverfahren stellt. Durch diese Interaktion erfahren die nachfolgenden Jets eine Störung, die sich zwar mit Sicherheit destabilisierend auswirkt, allerdings nicht allein für die Transition verantwortlich ist. So erfolgt bei hohen Amplituden und niedrigen Frequenzen ein Übergang zur Turbulenz, obwohl die Überlagerung des Jets mit der Nachlaufströmung nur sehr schwach ausgeprägt ist. [2]



Ausstoßende      Beginn des nächsten Ausstoßes      Kontakt mit Nachlaufströmung      weitere Entwicklung

Abb. 8: Interaktion mit der Nachlaufströmung bei hoher Reynolds-Zahl  $Re = 1078$  (4V 50 Hz) [2]

Ein weiterer beobachteter Effekt ist die Störung der Jet-Strömung durch innere Überholvorgänge. Da die Membranbewegung sinusförmig ist, ist die Austrittsgeschwindigkeit über den Düsenquerschnitt nicht konstant und das Fluid strömt beim Durchgang durch die Nulllage schneller aus als zuvor. Durch den Geschwindigkeitsüberschuss wird der Wirbelring durchstoßen, wie in Abb. 9 zu sehen. Dadurch wird eine Scherung des Jets verursacht, welche die Strömung bei hohen Amplituden und Frequenzen derart stören kann, dass es zur Transition des Jets kommen kann. [2]

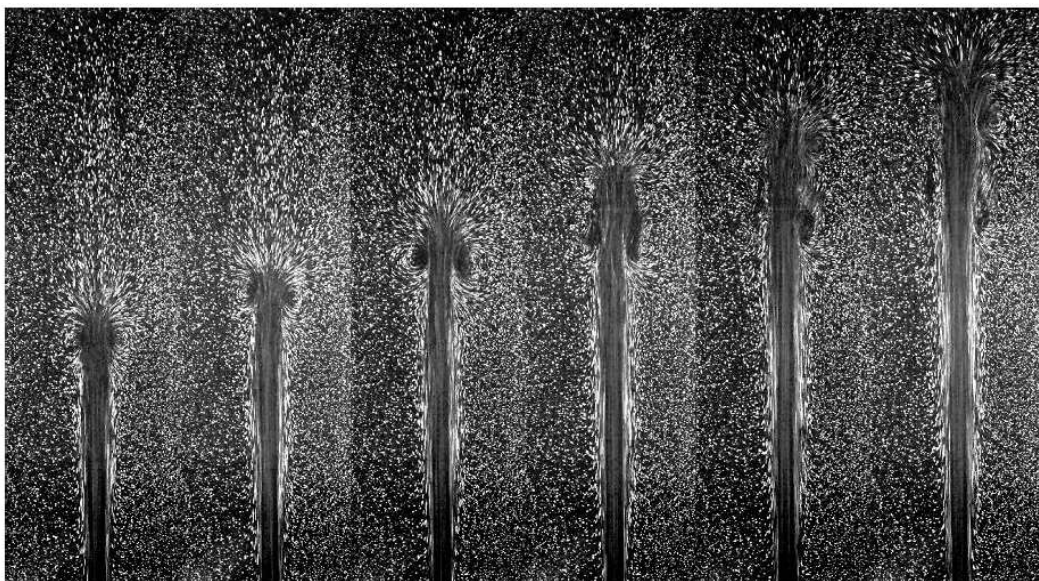


Abb. 9: Durchstoßen des Wirbelrings bei innerem Überholvorgang (4V 5 Hz) [2]

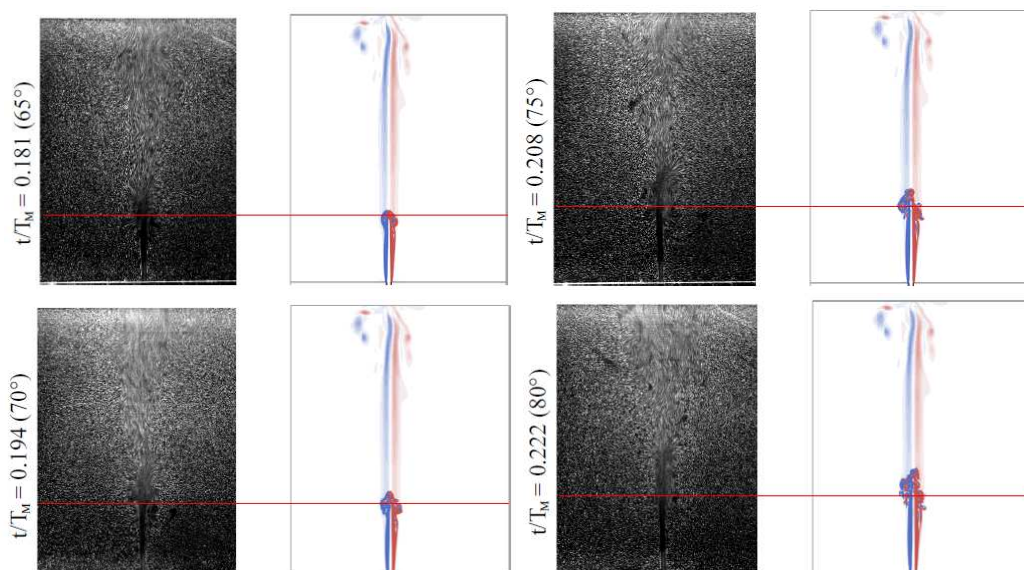
## Vergleich Visualisierung - Simulation

Zu sehen sind unterschiedliche Zeitpunkte des Ausstoßtakts. Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen die dimensionslose Wirbelstärke um die y-Achse, so dass der Wirbelring eindeutig zu erkennen ist. Die Höhe der Umgebung ist für das Berechnungsergebnis und die Visualisierung identisch und beträgt 53 d. Der Betriebspunkt entspricht den bisherigen 4 V 50 Hz. Wie in Abb. 10 zu erkennen ist, wird die Jet-Strömung sehr genau berechnet. Die Penetrationen des realen und des berechneten Jets stimmen für den gesamten Ausstoßtakt nahezu überein. Gleiches gilt für den Zeitpunkt der Transition, die etwa bei 70° einsetzt. Es fällt lediglich auf, dass der Wirbelring in der Visualisierung, abweichend zur Simulation, bei 160° noch zu erkennen ist.

Für den Vergleich bzw. das Modell gilt, dass die Breite des realen Jets höher als in der Simulation ist. Dies liegt zu einem kleinen Teil sicherlich an der Gitterstruktur, welche die Strömung aufgrund eines O-Gitters stärker in z-Richtung ausrichtet. Viel mehr macht sich jedoch bemerkbar, dass die Visualisierung eine gewisse Zeit nach Einschalten des Jet-Ejektors gestartet wurde, wohingegen bei den Simulationen erst der 2. Zyklus zu sehen ist, da die Berechnung jedes weiteren Zyklus sehr aufwändig ist. Somit ist die gesamte Umgebung in der Visualisierung zwangsläufig mehr in Bewegung. In weiteren Untersuchungen, die an dieser Stelle nicht gezeigt werden, wurde jedoch das gleiche Verhalten auch in der Simulation beobachtet.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden nach einer kurzen Einführung zu synthetischen Jets der Prüfaufbau und die eingesetzte optische Messtechnik vorgestellt. Der Aufbau und die Randbedingungen des CFD-Modells wurden erläutert. Es wurden beispielhaft Visualisierungen gezeigt, welche die beobachteten Effekte Interaktion mit der Nachlaufströmung und Störung des Jets durch innere Überholvorgänge, welche die Transition synthetischer Jets beschleunigen können, verdeutlicht haben. Den Abschluss bildete der Vergleich der Ergebnisse aus Visualisierung und Simulation.



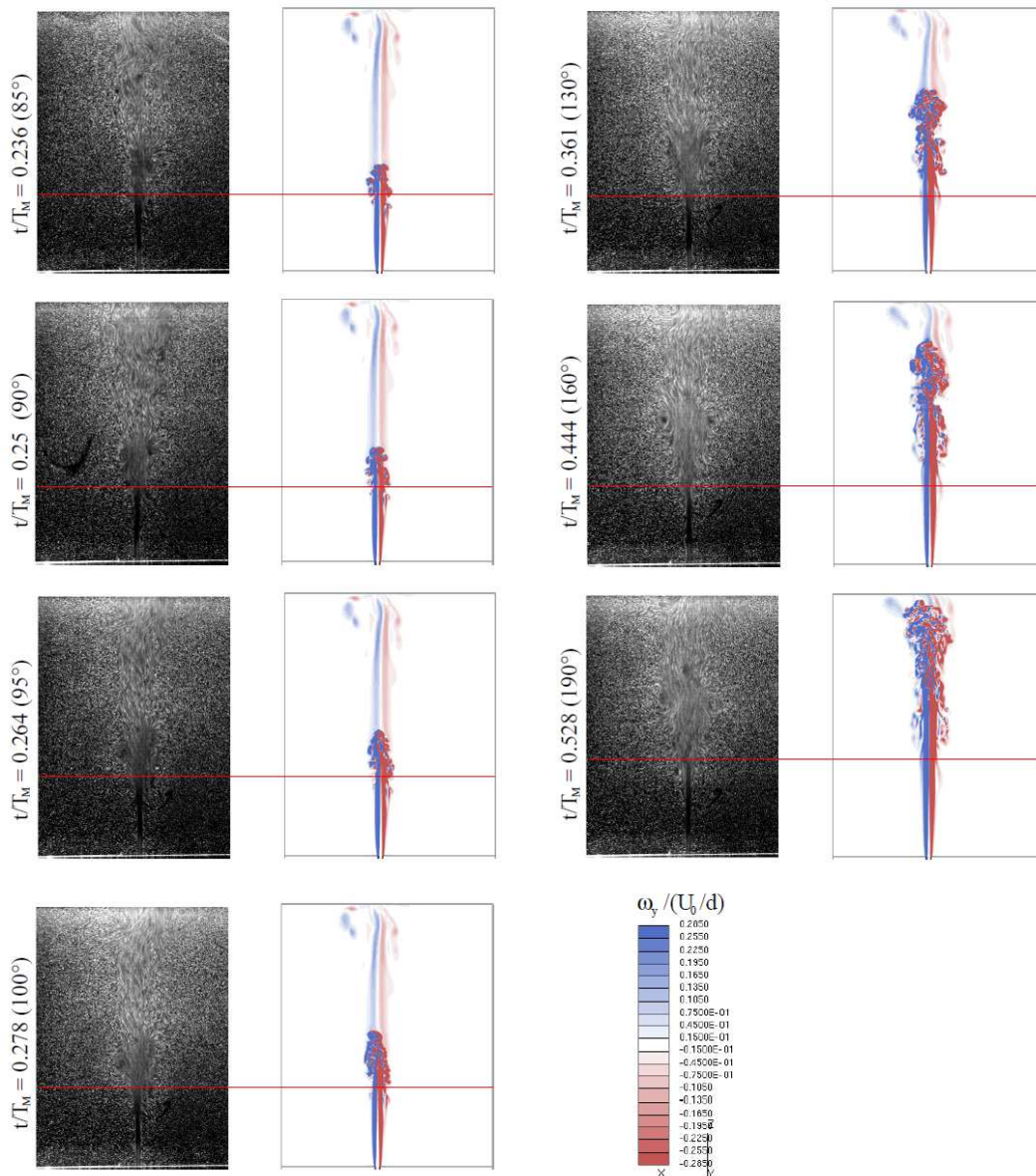


Abb. 10: Vergleich der Lösung des CFD-Modells mit einer Visualisierung (4 V 50 Hz)

## Dankesworte

Diese Arbeit wurde in Kooperation mit der Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT) durchgeführt.

## Literatur

- [1] Smith, B. L., Glezer, A., 1998: "The formation and evolution of synthetic jets", Physics of fluids
- [2] Derlien, H.-R., 2012: "Synthetische Jets zur Kühlung von punktuellen Wärmequellen - Experimentelle Untersuchung des Strömungsverhaltens und dessen Einfluss auf die Kühlleistung", Diplomarbeit
- [3] [www.nuventix.com](http://www.nuventix.com)
- [4] [www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)
- [5] Ferziger, J. H., Peric, M., 2008: „Numerische Strömungsmechanik“, 1.Auflage, Erlangen