

Konzeption und Inbetriebnahme eines kleinen Messaufbaus für Freistrahllärm

Emre Kara¹, Anna-Sophia Henke², Thomas F. Geyer¹

¹ *Arbeitsgebiet Technische Akustik, BTU C - S, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@b-tu.de*

² *Fachgebiet Arbeitswissenschaft und Arbeitspsychologie, BTU C - S, 03046 Cottbus, Deutschland*

Einleitung

Turbulente Freistrahlen, wie sie zum Beispiel an den Triebwerken von Flugzeugen vorkommen, sind eine wesentliche Quelle strömungsinduzierten Schalls. Um dieses Phänomen am Arbeitsgebiet Technische Akustik der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus experimentell untersuchen zu können, wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit [1] ein kleiner Prüfstand konzipiert und in den vorhandenen aeroakustischen Windkanal [2] integriert. Basierend auf einer Literaturrecherche wurde im ersten Schritt eine Düse konstruiert, die bei Verwendung des im Windkanal vorhandenen Ventilators und unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen (Versperrung der Düse, Druckerhöhung) eine Strömung mit möglichst hoher subsonischer Geschwindigkeit ermöglicht. Diese Düse wurde anschließend additiv gefertigt und in den Windkanal integriert. Um die Eignung des Messaufbaus zu testen, wurde in einem zweiten Schritt die Qualität der austretenden Strömung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe von Hitzdrahtmesstechnik untersucht. Abschließend wurden akustische Messungen mit Hilfe von acht im Fernfeld befindlichen Mikrofonen durchgeführt.

Grundlagen

Als Freistrahler wird eine Strömung bezeichnet, die aus einer Düse und in eine freie Umgebung ohne Begrenzung austritt. Dieser Strahl lässt sich in drei Bereiche einteilen, wie Abbildung 1 als Übersicht darstellt: Der erste Bereich ist die sogenannte Mischzone inklusive dem Strahlkern. In diesem kegelförmigen Kernbereich, mit einer Reichweite von ungefähr $5D$ (Düsensdurchmessern) ab Düsenöffnung in Strömungsrichtung, wird das außerhalb der Düse befindliche Fluid vom aus der Düse mit der Geschwindigkeit U strömendem Fluid mitgerissen, sodass das Geschwindigkeitsprofil aufgrund der laminaren Strömung eben ist. Um diesen Kernbereich vermischen sich die Fluide. Die Folge dessen ist die Entstehung kleiner Verwirbelungen und damit die Bildung einer turbulenten Scherschicht. In dieser Mischzone entsteht der Schall, der als Lärm wahrnehmbar ist. Der zweite Bereich von $5-10D$ ist die sogenannte Übergangszone. Die anfangs kleinen Verwirbelungen bilden sich zu größeren weiter. Bereich drei ist der Ähnlichkeitsbereich, beginnend ab einem Abstand vom 10-fachen des Düsensdurchmessers. In diesem Bereich erreichen die Verwirbelungen ihre maximale Intensität, sodass der Freistrahler voll ausgebildet ist und als voll turbulent charakterisiert werden kann.

Als Motivation dieser Forschungsarbeit dienen vorhandene Studien, die sich theoretisch sowie experimentell mit der Akustik von Freistrahlen beschäftigten. Von beson-

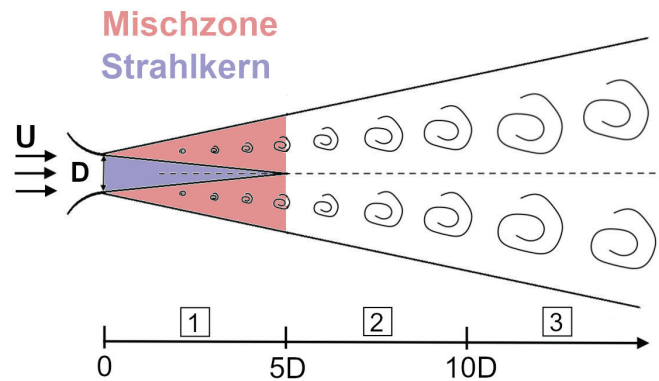


Abbildung 1: Charakteristische Zonen in einem Freistrahler (Strömungsgeschwindigkeit U , Düsenaustrittsdurchmesser D , 1: Mischzone, 2: Übergangszone, 3: Ähnlichkeitsbereich)

derem Interesse ist dabei zum Beispiel die Frequenz, bei der das entstehende Fernfeld-Schalldruckpegelspektrum sein Maximum besitzt. So zeigt sich beispielsweise in der Arbeit von Olsen et al. [3], die eine Runddüse mit $D = 101$ mm bei einem radialem Abstand von $r=4,57$ m verwendeten, dass das Maximum bei einer Frequenz von $f=2$ kHz auftritt. Das entspricht einer Strouhalzahl (bezogen auf den Düsensdurchmesser) von ungefähr 0,27. Bei dieser Frequenz besitzen die in den Messungen von Lush [4] ($D=25$ mm) ermittelten Spektren ebenfalls ihr Maximum ($St = 0,26$). Narayanan et al. [5] ($D=82$ mm und $r=2,47$ m) zeigen in ihrer Arbeit das Maximum bei $f=1$ kHz, was $St = 0,4$ entspricht. In der Studie von Tam et al. [6] findet sich das Schalldruckpegelmaximum bei einer Strouhalzahl von $St = 0,2$ durch den Vergleich von Ergebnissen mit verschiedenen Düsen, Winkeln und Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Abständen.

Messaufbau

Entwurf der Düse

Als Vorüberlegungen für den Entwurf der Düse dienen Berechnungen, die zu einer geeigneten Wahl der Geometrie beitragen. Dabei ist das Ziel, eine möglichst hohe Strömungsgeschwindigkeit hoher Güte bei gleichzeitig noch akzeptabler Versperrung durch die vorhandene Messtechnik (Prandtlrohre und Hitzdrahtsonden) zu erreichen. Der vorhandene Windkanal wird von einem Radialventilator mit einer Wellenleistung von 18.5 kW angetrieben.

Die finale Geometrie der Düse ist an ein Modell angelehnt, das im Rahmen einer Diplomarbeit an der Georg-August-Universität in Göttingen zur Untersuchung kohärenter Strukturen in einem turbulenten Freistrahler [7] verwendet wurde. Dabei wurden die Seiten-

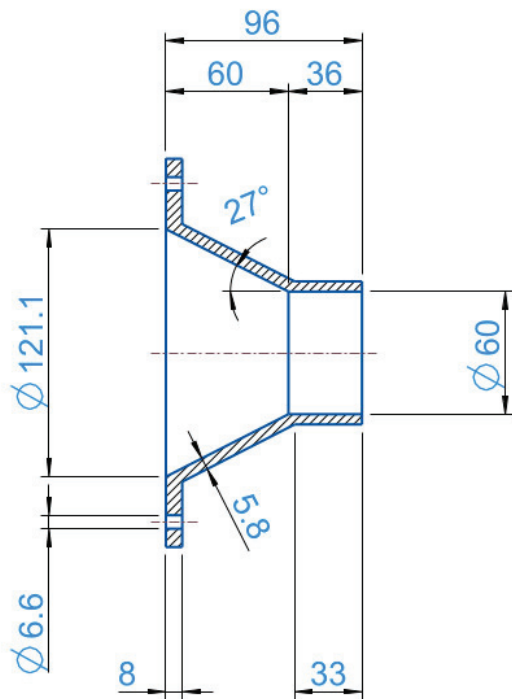


Abbildung 2: Konstruktionsaufbau der Düse (Angaben in mm)

und Winkelverhältnisse beibehalten. Da die Düse an den Windkanal des Lehrstuhls angepasst werden musste, unterscheidet sie sich jedoch in der Größe. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Düse hat einen Austrittsdurchmesser von $D=60$ mm und eine Gesamtlänge von $L=96$ mm. In der Abbildung 2 sind die Konstruktionsmaße vollständig aufgetragen. Die Düse wurde schließlich mittels selektivem Lasersintern (SLS) hergestellt und besteht aus dem Werkstoff Polyamid PA2201 (siehe Abbildung 3).

Aufbau der Hitzdrahtmessung

Ziel der Hitzdrahtmessungen ist die Untersuchung der Strömungsqualität, insbesondere der Geschwindigkeit und des Turbulenzgrades. Für den Versuch verwendet wurde eine 3D-Traversierung der Firma Dantec Dynamics, ein Multichannel CTA-Messsystem (54 N80 Dantec Dynamics), ein A/D Board Wandler (USB-4431 National Instruments) und eine Dantec-Eindrahtsonde. Für die Kalibrierung der Hitzdrahtsonde wurde ein Prandtl-Rohr verwendet. Bei der Wahl des Prandtl-Rohres und der Sonde inklusive der Halterung wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Messtechnik die Austrittsfläche der Düse nur in einem akzeptablen Ausmaß versperrt, sodass die Strömungsgeschwindigkeit nur minimal beeinflusst wird.

Bevor eine Hitzdrahtmessung durchgeführt werden konnte, musste die Sonde kalibriert werden, um möglichst präzise Ergebnisse zu erhalten. Bei diesem Vorgang wurde die Hitzdrahtsonde 10 mm von der Austrittsfläche entfernt positioniert und in Strömungsrichtung ausgerichtet. Die Kalibrierung setzt eine turbulenzarme Strömung vor-

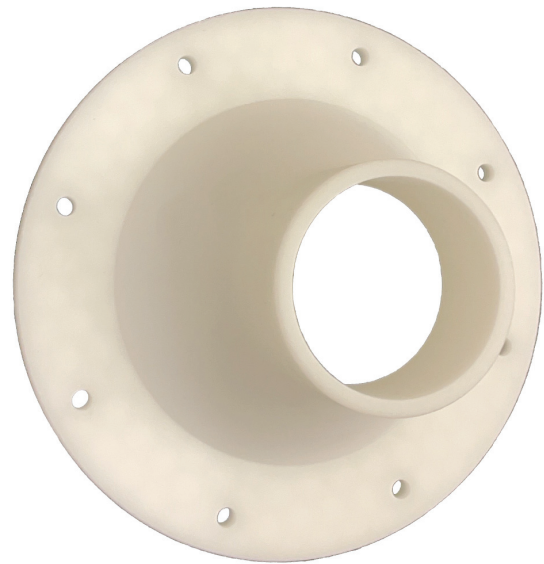


Abbildung 3: Foto der per Rapid Prototyping gefertigten Düse

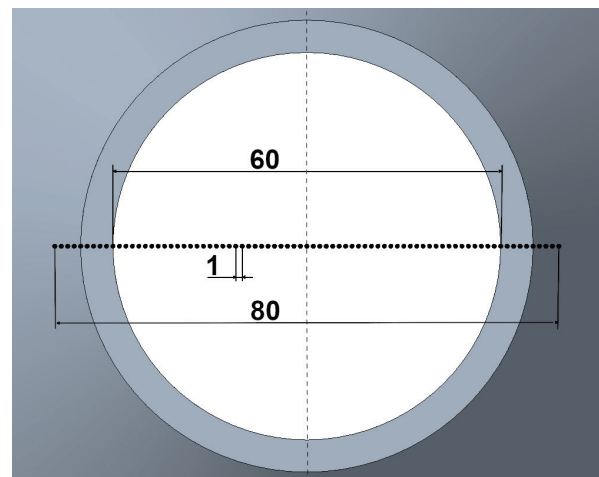


Abbildung 4: Hitzdraht-Messpunkte quer zur Strömungsrichtung (Angaben in mm)

aus, die an dieser Position gewährleistet ist. Zur Kalibrierung der Hitzdrahtsonde dient das Prandtl-Rohr als Referenzmessgerät. Die Sonde wurde bei der Kalibrierung insgesamt 12 Geschwindigkeiten von etwa 5 m/s bis 80 m/s ausgesetzt.

In den Strömungsmessungen befinden sich alle Messpunkte innerhalb der Mischzone des Freistrahls. Die Abstände zur Düse betragen $1D$ bis $3D$. Die Messpunkte liegen entlang der horizontalen y -Achse achsensymmetrisch und somit quer zur Strömungsrichtung (siehe Abbildung 4). Jede Messreihe befindet sich in derselben Höhe (auf Höhe des Austrittsflächenmittelpunktes). Das Abtasten jedes Profilquerschnitts erfolgte in einem Abstand von 1 mm. Wie in der Abbildung ersichtlich, wird auch am Rand und außerhalb der Austrittsfläche des Freistrahls gemessen. Für jeden Messpunkt wurde eine Messdauer von 14 Sekunden bei einer Abtastfrequenz von 25,6 kHz gewählt.

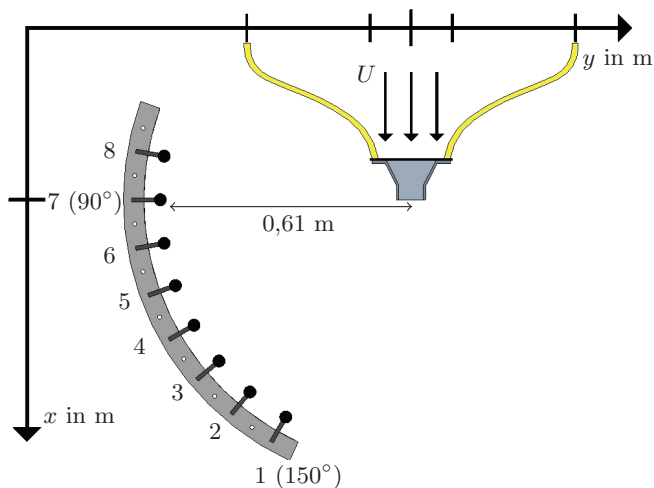


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Akustikmessung

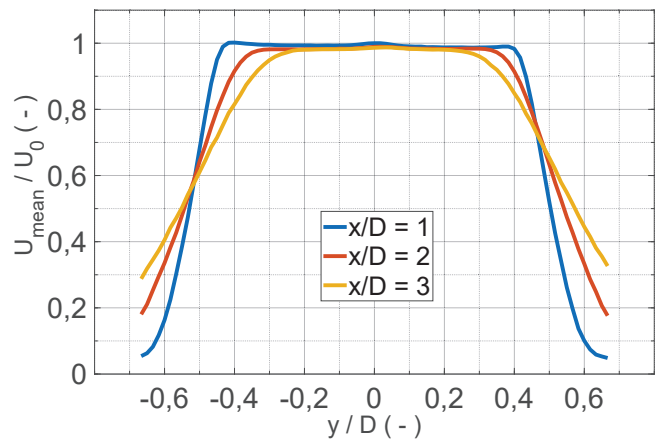


Abbildung 6: Foto des Messaufbaus mit den Messmikrofonen

Aufbau der Akustikmessung

Für die akustischen Messungen wurden acht Viertelzoll-Freifeldmikrofone eingesetzt, um den Schalldruckpegel des Freistrahls außerhalb der Scherschicht im akustischen Fernfeld zu bestimmen. Wie in Abbildung 5 zu sehen, befinden sich diese Mikrofone im Winkel von 80° – 150° jeweils im Abstand von 10° voneinander. Jedes Mikrofon hat einen radialen Abstand von $r = 0,61$ m zum Austrittsflächenmittelpunkt der Düse. Die Höhe der Mikrofone war mit dem Mittelpunkt identisch.

Alle Mikrofone wurden mit einem Handkalibrator mit einer Frequenz von 1 kHz auf einen Referenzton von 94 dB kalibriert. Die akustischen Messungen wurden bei Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 30 m/s bis 90 m/s durchgeführt. Die von den Mikrofonen erfassten Daten wurden mit einer Dauer von 40 Sekunden pro eingestellter Geschwindigkeit und mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz erfasst und gespeichert. Mit Hilfe einer Fast Fourier-Transformation wurden die Zeitdaten mit einer Blockgröße von 16384 Abtastwerten und einer Überlappung (überlappende Hanningfenster) von 50 % in den Frequenzbereich übertragen. Dies führte zu einer Frequenzauflösung von 3,125 Hz.

Abbildung 7: Geschwindigkeitsprofil bei $M=0,2$

Neben- bzw. Hintergrundgeräusche (Störquellen) wurden bestmöglich vermieden, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Wie in Abbildung 6 zu sehen, sorgen akustische Absorberplatten aus Basotect (Melaminharzschaumstoff) als Seitenwände für eine reflexionsarme Messumgebung.

Auswertung

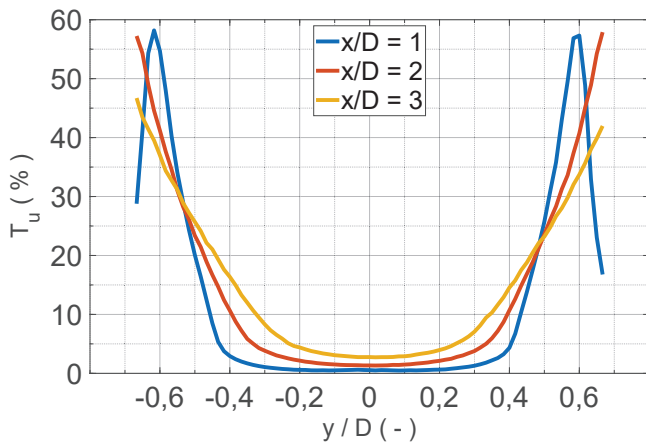
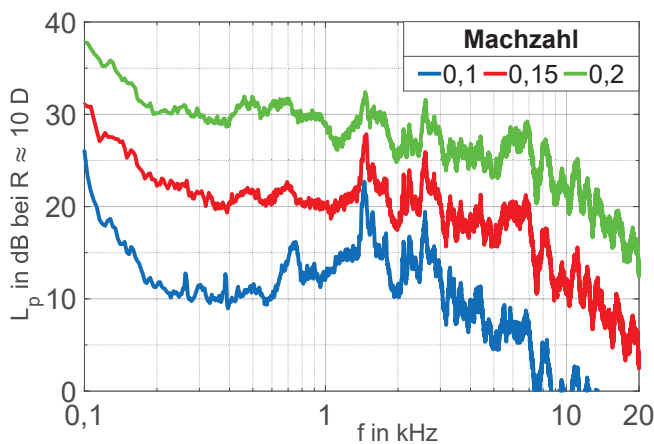
Ergebnisse der Strömungsmessung

Als Ergebnis der Hitzdrahtmessungen zeigen sich die typischen Eigenschaften eines runden, ungestörten Freistrahls. Für eine Machzahl von 0,2 zeigt Abbildung 7 beispielhaft ein sehr ebenes Strömungsprofil mit laminarer Strömung im Kernstrahl. Dort sind die Geschwindigkeiten am größten und werden nach außen zur Scherschicht hin kleiner. Somit wird der Kernbereich mit zunehmendem Abstand zum Düsenaustritt schmaler.

Zusätzlich zum Geschwindigkeitsprofil wurde das Profil des Turbulenzgrades bestimmt, welches in Abbildung 8 ebenfalls für eine Machzahl von 0,2 dargestellt ist. Der Turbulenzgrad ist an jenen Stellen am kleinsten, an denen die Strömung die größten Geschwindigkeiten erreicht. Während im Kernstrahl eine geringe Turbulenz zu erkennen ist, treten die größten Verwirbelungen in der Scherschicht auf. Das erreichte Ziel einer turbulenzarmen Strömung im Kernstrahl bedeutet gleichzeitig eine erfolgreiche Integration der Düse und eine Bestätigung der Funktionalität des Messaufbaus.

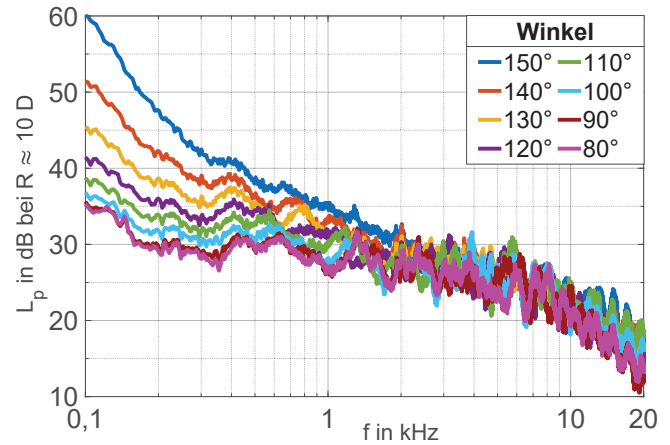
Ergebnisse der Akustikmessung

Abbildung 9 zeigt mit dem Mikrofon bei 90° gemessene Schalldruckpegelspektren für verschiedene Geschwindigkeiten des Freistrahls. Das spektrale Maximum liegt bei einer Frequenz von $f=25$ Hz (nicht dargestellt). Dieses sehr tieffrequente und unterhalb des gültigen Messbereiches des Windkanals liegende Störgeräusch ist nicht auf die Schallentstehung des Freistrahls zurückzuführen, sondern wird vermutlich durch eine Raummode des Windkanalmessraums hervorgerufen. Deshalb beschränken sich die Auswertungen im Folgenden auf einen Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 20 kHz. Die Ergebnisse zeigen den erwarteten Abfall des Schalldruckpegelspektrums bei

Abbildung 8: Turbulenzgrad bei $Ma=0,2$ Abbildung 9: Gemessene Schalldruckpegelspektren bei 90° und verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten

mittleren und hohen Frequenzen. Die Stärke des Abfalls der Schalldruckpegels ist von der Geschwindigkeit abhängig: Während sich ein Schalldruckpegelabfall von etwa 14 dB pro Dekade bei einer Machzahl von 0,1 ergibt, besitzen die Kurven für $M=0,15$ einen Abfall von 9 dB und für $M=0,2$ einen Abfall von 8 dB pro Dekade. Das bedeutet, dass mit zunehmender Geschwindigkeit der Schalldruckpegelabfall geringer ausfällt.

In Abbildung 10 sind unter verschiedenen Winkeln gemessene Schalldruckpegelspektren bei einer Machzahl von 0,2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls den Abfall des Schalldruckpegels bei mittleren und hohen Frequenzen, während das charakteristische Schalldruckpegelmaximum aufgrund des nicht gültigen Messbereichs nicht sichtbar ist. Laut Literatur steigt der Pegelabfall mit steigendem Mikrofonwinkel (in [6] bei 90° 7 dB/Dekade und bei 150° 10 dB/Dekade bei $M=0,3$). Dieser Trend ist auch in den Spektren dieser Studie sichtbar, auch wenn die konkreten Werte von denen der Literatur abweichen. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Abbildung 10: Gemessene Schalldruckpegelspektren bei $M=0,2$ und verschiedenen Winkeln

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Stefan Rohark für seine Hilfe beim Erstellen des Messaufbaus. Der erste Autor bedankt sich für die Bewilligung des "DEGA Student Grants" zum Besuch der DAGA 2023 in Hamburg.

Literatur

- [1] Kara, E.: Konzeption und Erprobung eines Aufbaus zur Messung der Schallentstehung an Freistrahlen. Bachelorarbeit, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, 2022.
- [2] Sarradj, E., Fritzsche, C., Geyer, T. F., Giesler, J.: Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics*, 70(8), 1073-1080, 2009.
- [3] Olsen, W. A., Gutierrez, O. Dorsch, R. G.: The effect of nozzle inlet shape, lip thickness, and exit shape and size on subsonic jet noise. Ohio: NASA Lewis Research Center, 1973.
- [4] Lush, P. A.: Measurements of subsonic jet noise and comparison with theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 46(3), pp. 477-500, 1971.
- [5] Narayanan, S., Barber, T. J. Polak, D. R.: High Subsonic Jet Experiments: Turbulence. *AIAA Journal*, 40(3), pp. 430-437, 2002.
- [6] Tam, C. K. W., Viswanathan, K., Ahuja, K. K. Panda, J.: The sources of jet noise: experimental evidence. *Journal of Fluid Mechanics*, Band 615, pp. 253-292, 2008.
- [7] Staack, K.: Untersuchung von kohärenten Strukturen im turbulenten Freistrahle mit Hilfe der tomographischen Particle Image Velocimetry, Göttingen: Physikalisches Institut der Georg-August-Universität Göttingen [Diplomarbeit], 2008.